



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**Εργαστήριο Τηλεπικοινωνιών και Ηλεκτρομαγνητικών**  
**Εφαρμογών**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Διερεύνηση εφαρμογής του γραφενίου ως παρασιτικό στοιχείο σε  
ορθογωνική κεραία τύπου patch**

**ΣΜΥΡΝΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ**  
**(Α.Μ.:ΤΛ20173)**

**Χανιά, Αύγουστος 2023**

Αφιέρωση



# Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σαν αντικείμενο τη σχεδίαση, προσομοίωση, και βελτιστοποίηση κεραίας patch ορθογωνικής γεωμετρίας υπό την παρουσία ορθογωνικών παρασιτικών στοιχείων γραφενίου. Εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Δρ. Θεόδωρου Καπετανάκη με τον Αν. Καθηγητή κ. Ιωάννη Ο. Βαρδιάμπαση ως σύμβουλο καθηγητή και εντάσσεται στα πλαίσια της ερευνητικής δραστηριότητας του τμήματος Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου.

Στο σημείο αυτό, ως ελάχιστο δείγμα αναγνώρισης θέλω να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου και στους δύο. Τους ευχαριστώ όχι μόνο για την δυνατότητα που μου έδωσαν να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία και την απόκτηση εμπειρίας και γνώσεων, αλλά και τις αξίες που μου δίδαξαν με το παράδειγμα τους. Θεωρώ ότι είμαι τυχερός το ότι εργάστηκα κοντά τους ενώ η εμπειρία που αποκτήθηκε ήταν παραπάνω από πολύτιμη.

Από την θέση αυτή, επιθυμώ να εκφράσω την εκτίμησή μου στον Δρ. Θεόδωρου Καπετανάκη, σαν ελάχιστη ανταπόδοση για την αμέριστη συμπαράσταση του, την ουσιαστική συμβολή του και την συμπόρευση του σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής. Τον ευχαριστώ για τον άφθονο χρόνο που κατανάλωσε, καθοδηγώντας και ενθαρρύνοντας με. Η εμπιστοσύνη με την οποία με περίβαλλε και η αμέριστη συμπαράσταση του ήταν παραπάνω από καταλυτική.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην σύζυγό και τα παιδιά μου που με ανέχτηκαν όλο αυτό το διάστημα της προσπάθειας μου καθώς επίσης και στους γονείς μου για την στήριξη τους στην επιλογή μου αυτή. Χωρίς την αγάπη τους, την πολύτιμη συμπαράσταση και τις θυσίες που έκαναν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου η εκπόνηση της παρούσας εργασίας θα ήταν ανέφικτη για αυτό και τους την αφιερώνω.

Χανιά, Αύγουστος 2023

Σμυρνής Γ. Ευάγγελος



# Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σαν αντικείμενο τη σχεδίαση, προσομοίωση, και βελτιστοποίηση κεραίας patch ορθογωνικής γεωμετρίας υπό την παρουσία ορθογωνικών παρασιτικών στοιχείων γραφενίου.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια σύντομη αναφορά στον τρόπο λειτουργίας επίπεδης κεραίας από γραφένιο (στη συχνότητα μικροκυμάτων και terahertz) και των ιδιοτήτων της καθώς επίσης και στον τρόπο που επηρεάζεται η αγωγιμότητα της κεραίας συναρτήσει της συχνότητας.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται λόγος για μια πολλά υποσχόμενη τεχνική εκτύπωσης ηλεκτρονικών στοιχείων με τη χρήση φύλλων γραφενίου. Ειδικότερα γίνεται αναφορά σε μια τυπωμένη κεραία υψηλών επιδόσεων από γραφένιο στα 2,4 GHz. Το αγωγίμο μελάνι γραφενίου, το οποίο παρασκευάζεται με χρήση διαδικασίας αποφλοιώσης σε υγρή φάση, τυπώνεται επί ενός χαρτιού με ικανότητα water-transferable με χρήση τεχνικής εκτύπωσης blade printing, ενώ στη συνέχεια από εκείνο σχεδιάζεται μια διπολική κεραία και μεταφέρεται επί ενός υποστρώματος-στόχου. Η διπολική κεραία ( $43 \times 3$  mm) που κατασκευάστηκε, και η οποία επιδεικνύει τα τυπικά διαγράμματα ακτινοβολίας ιδανικής διπολικής κεραίας, επιτυγχάνει  $-10$  dB εύρος ζώνης κατά 8,9% και μέγιστη απολαβή 0,7 dBi. Όπως θα δούμε οι τυπωμένες κεραίες γραφενίου ικανοποιούν τις απαιτήσεις των εφαρμογών για το διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) και δυνητικά θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τις συμβατικές μεταλλικές κεραίες σε αυτές τις εφαρμογές.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται μια μέθοδος διπλασιασμού του εύρους ζώνης για κεραίες με ορθογώνιο κάλυμμα μικροταινίας (microstrip patch) μέσω της τοποθέτησης χωρητικά διεγερμένων  $\lambda/4$  παρασιτικών στοιχείων βραχυκυκλώματος στα ακτινοβολούντα άκρα των κεραιών. Τα χαρακτηριστικά της κεραίας επεξηγούνται ως προς ένα μοντέλο αντίθεσης φάσης ενός ζεύγους συζευγμένων συντονιστών και φαίνεται ότι η βελτίωση του εύρους ζώνης είναι ανεξάρτητη από τη χωρητικότητα σύζευξης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται για τις κεραίες γραμμικής όσο και κυκλικής πόλωσης και επαληθεύουν τις θεωρητικές προβλέψεις. [1980, C. Wood].

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται περιγραφή της διάταξης γραφενίου και αναλύουμε την επίδραση των παρασιτικών στοιχείων γραφενίου και εξετάζουμε την επίδρασή τους στη διάταξη. Αρχικά σχεδιάσαμε την κεραία σαν να ήταν μια κοινή χάλκινη κεραία, όπου τόσο τα παρασιτικά όσο και το ενεργό στοιχείο ήταν χαλκός και μετά με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων βελτιστοποιήσαμε τις διαστάσεις έτσι ώστε τα χαρακτηριστικά της κεραίας μας, να ικανοποιήσουν κάποια standards όπως είναι η συχνότητα συντονισμού και η σύνθετη αντίσταση.

# ABSTRACT

The object of this dissertation is the design, simulation, and optimization of an orthogonal geometry patch antenna in the presence of orthogonal parasitic graphene elements.

Chapter 1 provides a brief overview of how a graphene flat antenna operates (at microwave and terahertz frequencies) and its properties, as well as how the antenna conductivity is affected as a function of frequency.

Chapter 2 discusses a promising technique for printing electronic data using graphene sheets. In particular, reference is made to a high-performance printed graphene antenna at 2.4 GHz. The conductive graphene ink, which is prepared using a wet-phase peeling process, is printed on water-transferable paper using a blade printing technique, and then a bipolar antenna is drawn from it and transferred to a target substrate. The built-in bipolar antenna (43 × 3 mm), which displays the standard radiation diagrams of an ideal bipolar antenna, achieves –10 dB bandwidth by 8.9% and a maximum gain of 0.7 dBi. As we will see, printed graphene antennas meet the requirements of Internet of Things (IoT) applications and could potentially replace conventional metal antennas in these applications.

Chapter 3 describes a method of doubling the bandwidth for antennas with a microstrip patch by placing capacitively excited  $\lambda_m / 4$  parasitic short-circuit elements at the radiating ends of the antennas. The characteristics of the antenna are explained in terms of a phase contrast model of a pair of coupled tuners and it appears that the bandwidth improvement is independent of the coupling capacity. The experimental results are presented for both linear and circular polarization antennas and verify the theoretical predictions. [1980, C. Wood].

Chapter 4 describes the graphene device and analyzes the effect of parasitic elements on graphene and examines their effect on the device. We first designed the antenna as if it were a common copper antenna, where both the parasites and the active element were copper and then with the help of genetic algorithms we optimized the dimensions so that the characteristics of our antenna meet some standards such as frequency, coordination and impedance. Closing the chapter, the numerical results are presented, the different architectures are compared and the necessary conclusions are drawn.





# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1-12</b>
1.1	Λειτουργία επίπεδης κεραίας από γραφένιο σε συχνότητα μικροκυμάτων και terahertz	1-12
1.2	Ιδιότητες γραφενίου	1-13
1.3	Συμπεριφορά αγωγιμότητας του γραφενίου σε συχνότητες MW και THz	1-14
<b>2</b>	<b>Κεραία υψηλών επιδόσεων από γραφένιο στα 2,4 GHz με δυνατότητα εκτύπωσης με τη χρήση τεχνολογίας water-transferring</b>	<b>2-19</b>
2.1	Εισαγωγή	2-19
2.2	Πειραματικά στοιχεία	2-20
2.3	Αποτελέσματα	2-22
<b>3</b>	<b>Βελτιωμένο εύρος ζώνης για κεραίες μικροταινίας με χρήση παρασιτικών στοιχείων</b>	<b>3-27</b>
3.1	Εισαγωγή	3-27
3.2	Θεωρία	3-28
3.3	Πειραματικά αποτελέσματα	3-33
<b>4</b>	<b>Σχεδίαση patch κεραίας με παρασιτικά στοιχεία γραφενίου και αποτελέσματα προσομοίωσης.</b>	<b>4-36</b>
4.1	Εισαγωγή	4-36
4.2	Πρόγραμμα σχεδίασης/προσομοίωσης CST Studio Suite 2000 & Antenna Magus	4-37
4.3	Πίνακας γεωμετρικών χαρακτηριστικών προσομοίωσης patch	4-40
4.4	Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης & χαρακτηριστικών των patch	4-41
4.5	Διαγράμματα $Z_{re}$ συναρτήσει της συχνότητας – Αποτελέσματα προσομοίωσης	4-42
4.6	Διαγράμματα $Z_{im}$ συναρτήσει της συχνότητας – Αποτελέσματα προσομοίωσης	4-46
4.7	Διαγράμματα VSWR συναρτήσει της συχνότητας - Αποτελέσματα προσομοίωσης	4-49
4.8	Διαγράμματα $S_{11}$ (dB) συναρτήσει της συχνότητας - Αποτελέσματα προσομοίωσης	4-52
4.9	Διάγραμμα ακτινοβολίας για Antenna $G(\theta, \varphi=0^\circ)$ – Αποτελέσματα προσομοίωσης	4-53
4.10	Διάγραμμα ακτινοβολίας για Antenna $G(\theta, \varphi=90^\circ)$ - Αποτελέσματα προσομοίωσης	4-55
4.11	Συμπεράσματα αποτελεσμάτων προσομοίωσης	4-56
<b>5</b>	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>5-59</b>

# Σχήματα

Σχήμα 1: Γραφενίο (Α) Εξαγωνική Δομή, Και (Β) Δομή Ζώνης .....	1-13
Σχήμα 2: Το Πραγματικό Και Το Φανταστικό Μέρος Της Αγωγιμότητας Του Γραφενίου Σε (Α) Ζώνη Μω Και (Β) Ζώνη Thz. ....	1-18
Σχήμα 3: (Α) Γεωμετρία Σχεδιαζομένης Διπολικής Κεραίας Γραφενίου. Φωτογραφίες Της (Β) Τυπωμένης Διπολικής Κεραίας Με Βάση Το Γραφενίο Στην Επιφάνεια Μιας Γυαλινής Διαφανείας, Όπου Χρησιμοποιήθηκε Αγωγιμή Παστα Για Την Τροφοδοσία Ισχύος Στην Κεραία Με Βάση Το Γραφενίο Και (C) Διπολική Κεραία Με Βάση Το Γραφενίο Τυπωμένη Σε Κυρτή Επιφάνεια Πλαστικού Petri Dish Χρησιμοποιώντας Την Τεχνική Water-Transferring.....	2-20
Σχήμα 4: (Α) Σχηματική Προετοιμασία Graphene-Based Ink, Blade Printing Και Μεταφορά Κεραίας Γραφενίου. (Β) Φωτογραφία Παρασκευασμένης Μελανής Γραφενίου. (C) Φωτογραφία Τυπωμένου Στρώματος Γραφενίου Σε Χαρτί Με Τεχνική Water-Transferring. (D) Ηλεκτρονική Σαρώση Μικροσκοπίας Τυπωμένου Στρώματος Γραφενίου. ....	2-21
Σχήμα 5: Μέτρηση Συντελεστή Ανακλάσης (S11 Τυπωμένης Διπολικής Κεραίας Με Βάση Το Γραφενίο Σε Γυαλινή Διαφάνεια. ....	2-23
Σχήμα 6: (Α) Κανονικοποιημένα Μοτίβα Ακτινοβολίας Επίπεδου Ε Της Τυπωμένης Διπολικής Κεραίας Με Βάση Το Γραφενίο Και Της Χαλκινής Κεραίας Του Ίδιου Σχεδίου Σε Γυαλινή Διαφάνεια. (Β) Κανονικοποιημένα Σχεδια Ακτινοβολίας Επίπεδου Η Της Τυπωμένης Διπολικής Κεραίας Με Βάση Το Γραφενίο Και Της Χαλκινής Κεραίας Του Ίδιου Σχεδίου Σε Γυαλινή Διαφάνεια. ....	2-24
Σχήμα 7: Ορθογωνίες Κεραίες Μικροταινίας (Patch).....	3-29
Σχήμα 8: Παρασιτική Κεραία Μικροταινίας (Patch) [1980, C. Wood] .....	3-30
Σχήμα 9: Ανάλυση Βραχυκυκλωμένων Κεραίων Με Παρασιτικό Στοιχείο. ....	3-32
Σχήμα 10: Διαγράμμα Συνθετής Αντίστασης Κεραίας Διπλού Βραχυκυκλώματος .....	3-33
Σχήμα 11: Αποδοση Πολωμένης Παρασιτικής Κεραίας .....	3-34
Σχήμα 12: Διατάξη Κεραίας Γραφενίου.....	4-36
Σχήμα 13 (Α,Β,Γ,Δ): Zre Συναρτησει Της Συχνότητας Για Antenna: (Α) 1, 2,... (Β) 15, 16,... (Γ) 19, 20,... (Δ) 27, 28,.....	4-45
Σχήμα 13 (Ε): Zre Συναρτησει Της Συχνότητας Για Antenna: (Ε) 39, 40,.....	4-45
Σχήμα 14 (Α,Β,Γ,Δ): Zim Συναρτησει Της Συχνότητας Για Antenna: (Α) 1, 2,... (Β) 15, 16,... (Γ) 19, 20,... (Δ) 27, 28,.....	4-48
Σχήμα 14 (Ε): Zim Συναρτησει Της Συχνότητας Για Antenna: (Ε) 39, 40,.....	4-48
Σχήμα 15 (Α,Β,Γ,Δ): Vswr Συναρτησει Της Συχνότητας Για Antenna: (Α) 1, 2,... (Β) 15, 16,... (Γ) 19, 20,... (Δ) 27, 28,.....	4-51
Σχήμα 15 (Ε,Στ): Vswr Συναρτησει Της Συχνότητας Για Antenna: (Ε) 39, 40,...(Στ) 23, 24,.....	4-51
Σχήμα 16 (Α,Β,Γ,Δ): S11 (Db) Συναρτησει Της Συχνότητας Για Antenna: (Α) 1, 2,... (Β) 15, 16,... (Γ) 19, 20,... (Δ) 27, 28,.....	4-53
Σχήμα 16 (Ε,Στ): S11 (Db) Συναρτησει Της Συχνότητας Για Antenna: (Ε) 39, 40,...(Στ) 23, 24,.....	4-53
Σχήμα 17 (Α,Β,Γ): Διαγράμμα Ακτινοβολίας $G(\theta, \phi=0^\circ)$ Για Antenna: (Α) 1, 4,... (Β) 2, 17,... (Γ) 3, 10,....	4-55
Σχήμα 18 (Α,Β,Γ): Διαγράμμα Ακτινοβολίας $G(\theta, \phi=90^\circ)$ Για Antenna: (Α) 1, 4,... (Β) 2, 17,... (Γ) 3, 10,.....	4-56
Σχήμα 19: Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Κεραίας Γραφενίου.....	4-57

# Πίνακες

Πίνακας 1: Οι Ιδιότητες Του Γραφενιου .....	1-14
Πίνακας 2: Συγκριση Αποδοσης Τυπικων Τυπωμενων Κεραιων Γραφενιου Με Διπολικες Δομες .....	2-25
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικα Κεραιας Διπλου Βραχυκυκλωματος Στο Οριο $Bc^2 > 8g^2$ .....	3-31
Πίνακας 4: $Q_0$ - Ευρος Ζωνης Κεραιων Microstrip Με Και Χωρις Παρασιτικα Στοιχεια .....	3-34
Πίνακας 5: Γεωμετρικα Χαρακτηριστικα Προσομοιωσης Patch .....	4-41
Πίνακας 6: Αποτελεσματα Προσομοιωσης & Χαρακτηριστικων Των Patch .....	4-42
Πίνακας 7: Πίνακας Διαστασεων Κεραιων Νο24 & Νο39 .....	4-57
Πίνακας 8: Πίνακας Ηλεκτρικων Χαρακτηριστικων Κεραιων Νο24 & Νο39 .....	4-57

## 1 Εισαγωγή

### 1.1 Λειτουργία επίπεδης κεραίας από γραφένιο σε συχνότητα μικροκυμάτων και terahertz

Ο σχεδιασμός μεταλλικών επίπεδων κεραιών έχει προκαλέσει τεράστιο ενδιαφέρον στην κοινότητα (κατασκευής/παραγωγής) κεραιών λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών αυτών των κεραιών, όπως είναι το μικρό μέγεθος, το χαμηλό βάρος, η εύκολη κατασκευή και η ενσωματώσιμη διαμόρφωση. Προκειμένου να καλυφθεί η ανάγκη των σύγχρονων επικοινωνιών, αυτήν τη στιγμή υπάρχει προτίμηση για κεραίες που έχουν την ικανότητα/δυνατότητα εκτέλεσης χειρισμού πολλαπλών λειτουργιών. Ένας τρόπος ώστε να υλοποιηθεί αυτή η δυνατότητα είναι η ενσωμάτωση της δυνατότητας αναδιαμόρφωσης στις κεραίες, γεγονός που συντελεί στη χρήση μίας μόνο κεραίας για περισσότερες από μία εφαρμογές. Μια κεραία μπορεί να έχει δυνατότητα αναδιαμόρφωσης της συχνότητας, του διαγράμματος ακτινοβολίας ή/και δυνατότητα αναδιαμόρφωσης της πόλωσης, και κατά συνέπεια μπορεί να αλλάζει αντίστοιχα με δυναμικό τρόπο τη συχνότητα, το διάγραμμα ή/και την πόλωση. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η δυνατότητα αναδιαμόρφωσης σε μεταλλικές επίπεδες κεραίες χρησιμοποιούνται διαφορετικά μέσα όπως ηλεκτρικά, θερμικά, μηχανικά και οπτικά μέσα. Μία από τις πιο γενικές προσεγγίσεις στην υλοποίηση των κεραιών με δυνατότητα αναδιαμόρφωσης είναι η χρήση διακοπών. Ωστόσο, υφίσταται μεγαλύτερη πολυπλοκότητα όταν η δομή της κεραίας ενσωματώνεται με τους διακόπτες. Η έννοια της δυνατότητας αναδιαμόρφωσης σε κεραίες χαμηλής συχνότητας έχει επεκταθεί επίσης σε κεραίες που λειτουργούν σε συχνότητες terahertz (THz). Για την πιθανή χρήση αυτών των κεραιών σε εφαρμογές απεικόνισης υψηλής αντίθεσης και τηλεπισκόπησης του διαστήματος, απαιτείται η ενσωμάτωση της δυνατότητας αναδιαμόρφωσης προκειμένου να ενισχυθεί η ικανότητα των κεραιών THz. Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται μια καινούρια τεχνική για την επίτευξη της δυνατότητας αναδιαμόρφωσης και για την ενίσχυση των επιδόσεων σε μεταλλικές επίπεδες κεραίες μικροταινίας τόσο σε συχνότητα μικροκυμάτων (MW) όσο και σε συχνότητα THz και οι οποίες υλοποιούνται με χρήση ενός παρασιτικού στρώματος γραφενίου, το οποίο τοποθετείται μεταξύ του μεταλλικού ακτινοβολητή και του διηλεκτρικού στρώματος.

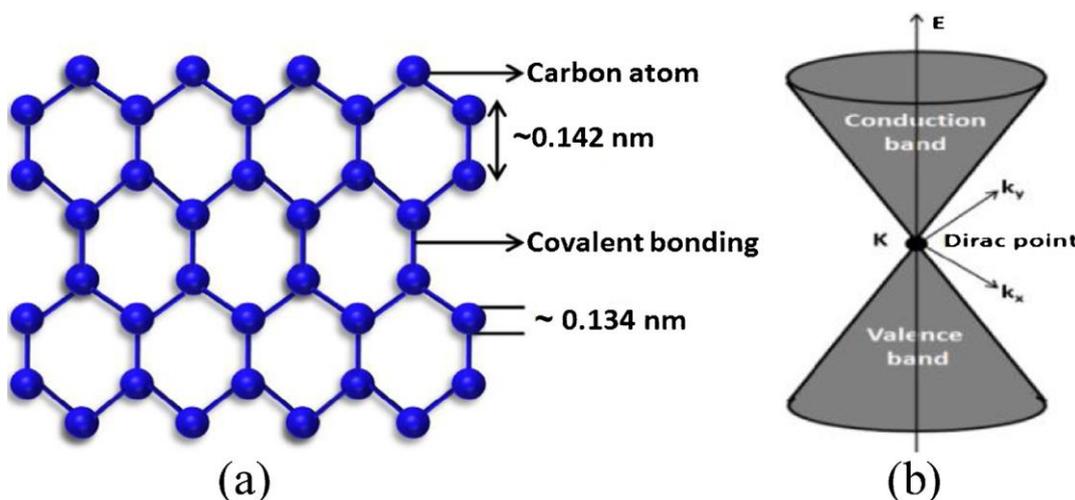
Συχνά το γραφένιο θεωρείται ως υλικό εξαιρετικά κατάλληλο για σχεδιασμό κεραιών THz, σε σύγκριση με τις ισοδύναμες ενώσεις με αυτό, όπως ο χαλκός και οι νανοσωλήνες άνθρακα, λόγω των εξαιρετικών του ιδιοτήτων σε αυτό το εύρος συχνοτήτων. Στη βιβλιογραφία διατίθενται πολλές εργασίες σχετικά με τη χρήση γραφενίου για εφαρμογές σε κεραία THz. Επίσης, έχουν γίνει ορισμένες προσπάθειες για χρήση αυτού του υλικού στον σχεδιασμό κεραιών στο εύρος συχνοτήτων των μικροκυμάτων. Μια σύντομη ματιά στη σχετική βιβλιογραφία αποκαλύπτει ότι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, το στρώμα γραφενίου έχει χρησιμοποιηθεί ως πρωτογενής ακτινοβολητής για την

επίπεδη κεραία ενώ η δυνατότητα μεταβολής της επιφανειακής αγωγιμότητας που εμφανίζει, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή μιας εξωτερικής τάσης DC, έχει χρησιμοποιηθεί ώστε η επίπεδη κεραία να αποκτήσει δυνατότητας αναδιαμόρφωσης. Η παρούσα εργασία ασχολείται με τη χρήση του γραφενίου ως παρασιτικού στρώματος σε μια επίπεδη μεταλλική κεραία μικροταινίας με ακτινοβολούν ορθογώνιο κάλυμμα (patch) από χαλκό και εξετάζεται ο ρόλος του σε συχνότητες MW και THz. Παρατηρείται ότι το παρασιτικό στρώμα γραφενίου συμβάλλει στη βελτίωση της αποδοτικότητας της κεραίας σε MW, ενώ σε THz, παίζει σημαντικό ρόλο ώστε η κεραία να έχει την δυνατότητα αναδιαμόρφωσης της συχνότητας.

Η επιστημονική εργασία έχει της εξής δομή: Η Παράγραφος 1.2 αποτελεί σύντομη επισκόπηση των υλικών ιδιοτήτων του γραφενίου, οι οποίες είναι σημαντικές ως προς την άποψη του αυτοδύναμου σχεδιασμού μιας κεραίας. Στην Παράγραφο 1.3 γίνεται λόγος για τη συμπεριφορά της αγωγιμότητας του γραφενίου σε συχνότητα MW και THz, η οποία ευθύνεται για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και για την επίτευξη της δυνατότητας αναδιαμόρφωσης. Στην Παράγραφο 1.4 πραγματοποιείται ανάλυση σχετικά με τις βελτιωμένες επιδόσεις της επίπεδης μεταλλικής κεραίας από γραφένιο για χαρακτηριστικές διαμορφώσεις με το παρασιτικό στρώμα γραφενίου. Τέλος, η Παράγραφος 5 παρουσιάζει τα συμπεράσματα.

## 1.2 Ιδιότητες γραφενίου

Το γραφένιο είναι ένα μονό στρώμα γραφίτη και ατόμων άνθρακα με εξαγωνική δομή με διάσταση 0,142 nm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1(a). Η ανάπτυξη του μονοστρωματικού γραφενίου από τον πολυστρωματικό γραφίτη εκτελέστηκε για πρώτη φορά με χρήση τεχνικής μηχανικής αποφλοιώσης. Με την πάροδο των χρόνων, για τη σύνθεση του γραφενίου έχουν αναφερθεί πολλές ακόμα τεχνικές, όπως η χημική αποφλοιώση, η χημική απόθεση ατμών, ο διαχωρισμός άνθρακα, η σύνθεση σε SiC, κλπ. Αυτό το υλικό έχει υψηλή κινητικότητα, υψηλή διαφάνεια, υψηλή ελαστικότητα, υψηλή μηχανική αντοχή και υψηλή σταθερότητα στο περιβάλλον.



Σχήμα 1: Γραφένιο (a) Εξαγωνική δομή, και (b) Δομή ζώνης.

Όλες αυτές οι ιδιότητες είναι κατάλληλες για τη χρήση αυτού του υλικού σε εφαρμογές κεραιών. Οι ιδιότητες του (υλικού) γραφενίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Οι ιδιότητες του γραφενίου

Properties	Value
Electronic mobility	$\sim 2 \times 10^5 \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ [23]
Current density	$\sim 10^9 \text{ A/cm}$ [24]
Fermi velocity	$\sim 10^6 \text{ m/s}$ [25]
Thermal conductivity	$\sim 5000 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [26]
Tensile strength	$\sim 1 \text{ Tpa}$ [27]
Breaking strength	42 N/m [27]
Transparency	$\sim 97.7\%$ [28]
Elastic limit	$\sim 20\%$ [29]
Band gap	0 [30]
Surface area	2360 m <sup>2</sup> /gm [31]
Thickness	0.4–1.8 nm [32]

Η δομή της ζώνης του γραφενίου (μονό στρώμα γραφίτη) παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1947 από τον P. R. Wallace. Το γραφένιο επιδεικνύει μερικές μοναδικές ιδιότητες λόγω της δομής της ζώνης των ηλεκτρονίων. Η ζώνη αγωγής και η ζώνη σθένους έχουν κωνικό σχήμα και συμπίπτουν στο σημείο Dirac, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1(b). Η πυκνότητα των καταστάσεων αυξάνεται γραμμικά καθώς απομακρυνόμαστε από το σημείο Dirac. Η συμπεριφορά του ηλεκτρονίου στο γραφένιο είναι τελείως διαφορετική από εκείνη στο μέταλλο. Η μάζα και η ταχύτητα του ηλεκτρονίου στο γραφένιο είναι αντιστοίχως μηδέν και  $10^6 \text{ m/s}$  ή  $c/300$ , όπου  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός. Συνεπώς, κατά τη διάδοσή τους τα ηλεκτρόνια συμπεριφέρονται ως ένα φερμιόνιο Dirac χωρίς μάζα. Από την ειδική θεωρία της σχετικότητας γνωρίζουμε ότι, αν  $m = 0$ , τότε η σχέση διασποράς γίνεται  $E = cp$ . Στην περίπτωση του γραφενίου, η γραμμική σχέση διασποράς δίνεται από την εξίσωση  $E = v\hbar k$ , όπου το  $p = \hbar k$  είναι η ορμή και το  $v$  είναι η ταχύτητα Fermi  $\approx 10^6 \text{ m/s}$ . Η ταχύτητα του ηλεκτρονίου στο γραφένιο είναι προσεγγιστικά 300 φορές μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός.

### 1.3 Συμπεριφορά αγωγιμότητας του γραφενίου σε συχνότητες MW και THz

Η αγωγιμότητα του γραφενίου σε ένα ανισότροπο μη-τοπικό μοντέλο μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\sigma(\omega, E_f(E_0), \Gamma, T, B_0) = \sigma_{xx} \hat{x}\hat{x} + \sigma_{xy} \hat{x}\hat{y} + \sigma_{yx} \hat{y}\hat{x} + \sigma_{yy} \hat{y}\hat{y} \quad (1)$$

όπου  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{yx}$  και  $\sigma_{yy}$  είναι οι συνιστώσες του τανυστή της αγωγιμότητας του γραφενίου.  $\hat{x}$  και  $\hat{y}$  είναι τα μοναδιαία διανύσματα. Η αγωγιμότητα του γραφενίου εκφράζεται ως συνάρτηση της γωνιακής συχνότητας  $\omega$ , της ενέργειας Fermi  $E_f$ , του πεδίου ηλεκτροστατικής πόλωσης  $E_0$ , του ρυθμού σκέδασης  $\Gamma$ , της θερμοκρασίας  $T$  και του πεδίου μαγνητοστατικής πόλωσης  $B_0$ . Η

αγωγιμότητα του γραφενίου σε περίπτωση χωρικής διασποράς και μη-χωρικής διασποράς περιγράφεται με τον ακόλουθο τρόπο:

α. Η αγωγιμότητα του γραφενίου στην περίπτωση χωρικής διασποράς ( $E_0 = B_0 = 0$ ), μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \sigma_0 + \alpha D_x^2 + \beta D_y^2 \\ \sigma_{yy} &= \sigma_0 + \beta D_x^2 + \alpha D_y^2 \\ \sigma_{xy} &= \sigma_{yx} = 2\beta D_x D_y\end{aligned}\quad (2)$$

όπου:

$$\sigma_0 = -j \frac{2 \ln(2) e^2 \kappa B T}{\pi h^2 (\omega - j\tau^{-1})}, \alpha = \frac{3}{4} \frac{v_f^2 \sigma_0}{(\omega - j\tau^{-1})^2}, \beta = \frac{1}{3} \alpha, D_x^2 = \frac{d^2}{d_x^2}, D_y^2 = \frac{d^2}{d_y^2},$$

$$D_x D_y = \frac{d^2}{d_x d_y}$$

β. Όταν  $E_0 \neq 0$  ή  $B_0 \neq 0$  ή όταν ισχύει ταυτόχρονα  $B_0 \neq 0$  και  $E_0 \neq 0$ , τότε υφίσταται μη-χωρική διασπορά.

γ. Στην περίπτωση της ηλεκτροστατικής πόλωσης, όταν  $E_0 \neq 0$  και  $B_0 = 0$ , τότε η αγωγιμότητα του γραφενίου μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \sigma_{yy} = \sigma_s(E_f(E_0)) \\ \sigma_{xy} &= \sigma_{yx} = 0\end{aligned}\quad (3)$$

(i) Στην περίπτωση της ηλεκτρομαγνητικής πόλωσης, όταν  $E_0 \neq 0$ ,  $B_0 \neq 0$  τότε η αγωγιμότητα του γραφενίου μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \sigma_{yy} = \sigma_s(E_f(E_0), B_0) \\ \sigma_{xy} &= -\sigma_{yx} = \sigma_0(E_f(E_0), B_0)\end{aligned}\quad (4)$$

Σύμφωνα με τη θεωρία του Kubo, η αγωγιμότητα του γραφενίου είναι το άθροισμα τόσο της αγωγιμότητας εντός των ζωνών όσο και της αγωγιμότητας μεταξύ των ζωνών, και μπορεί να περιγραφεί ως:

$$\sigma_s(E_f(E_0)) = \frac{je^2(\omega - j\tau^{-1})}{\pi h^2} x \left[ \begin{array}{l} \frac{1}{(\omega - j\tau^{-1})^2} \\ \int_0^\infty \varepsilon \left( \frac{\partial f_d(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} - \frac{\partial f_d(-\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \right) d\varepsilon - \\ \int_0^\infty \frac{f_d(-\varepsilon) - f_d(\varepsilon)}{(\omega - j\tau^{-1})^2 - 4(\varepsilon/h)^2} d\varepsilon \end{array} \right] \quad (5)$$

όπου  $e$  είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου,  $\hbar$  είναι η ανηγμένη σταθερά του Planck,  $\tau$  είναι ο χρόνος ηρεμίας,  $f_d(\varepsilon) = [e^{(\varepsilon - E_f)/k_B T} + 1]^{-1}$  είναι η κατανομή Fermi-Dirac.

Στην ανωτέρω εξίσωση, ο 1ος όρος αντιστοιχεί στην αγωγιμότητα του γραφενίου εντός των ζωνών και ο 2ος όρος αντιστοιχεί στην αγωγιμότητα μεταξύ των ζωνών. Στη ζώνη MW και THz επικρατεί η αγωγιμότητα εντός των ζωνών, ενώ στο εγγύς υπέρυθρο και στο ορατό φάσμα επικρατεί η αγωγιμότητα μεταξύ των ζωνών. Οι αγωγιμότητες του γραφενίου εντός των ζωνών και μεταξύ των ζωνών μπορούν να εκφραστούν ως,

$$\sigma_{Intra}(E_f(E_0)) = -j \frac{e^2 \kappa_B T}{\pi h^2 (\omega - j\tau^{-1})} \left[ \frac{E_f}{\kappa_B T} + 2 \ln(e^{-E_f/\kappa_B T} + 1) \right]$$

$$\sigma_{Inter}(E_f(E_0)) = \frac{je^2}{4\pi h} \ln \left[ \frac{2|E_f| - h(\omega - j\tau^{-1})}{2|E_f| + h(\omega - j\tau^{-1})} \right] \quad (6)$$

Η αγωγιμότητα Hall του γραφενίου μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\sigma_s(E_f(E_0), B_0) = \frac{e^2 v_f^2 e B_0}{\pi h^2} x \left[ \begin{array}{l} \frac{1}{(\omega - j\tau^{-1})^2} \\ \int_0^\infty \varepsilon \left( \frac{\partial f_d(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} - \frac{\partial f_d(-\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \right) d\varepsilon - \\ \int_0^\infty \frac{1}{(\omega - j\tau^{-1})^2 - 4(\varepsilon/h)^2} d\varepsilon \end{array} \right] \quad (7)$$

Στο εύρος MW και THz, η επιφανειακή αγωγιμότητα του γραφενίου  $\sigma_s$  εξαρτάται από τη γωνιακή συχνότητα, την ενέργεια Fermi, τον χρόνο ηρεμίας και τη θερμοκρασία. Αυτή διέπεται από τη συμβολή εντός των ζωνών η οποία μπορεί να υπολογιστεί κατά προσέγγιση ως:

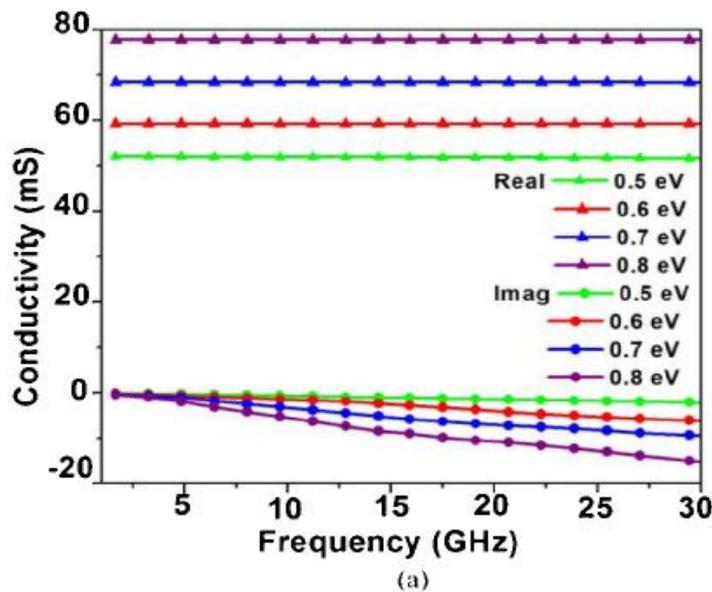
$$\sigma_s(\omega, E_f, \tau, T) = -j \frac{e^2 \kappa_B T}{\pi h^2 (\omega - j\tau^{-1})} \left[ \frac{E_f}{\kappa_B T} + 2 \ln(e^{-E_f/\kappa_B T} + 1) \right] \quad (8)$$

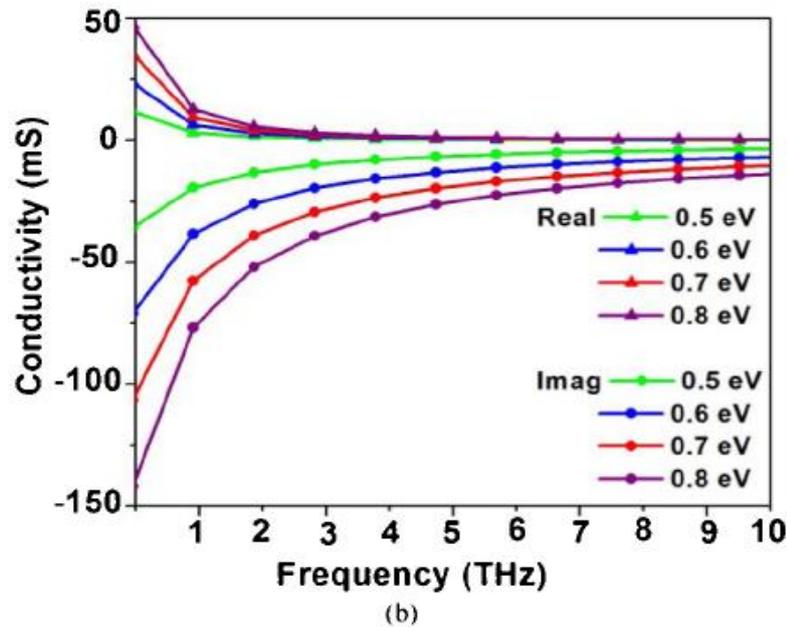


Το γεγονός ότι η αγωγιμότητα εξαρτάται από την ενέργεια Fermi  $E_f$  υποδεικνύει ότι η αγωγιμότητα του γραφενίου μπορεί να συντονιστεί ελέγχοντας το επίπεδο της ενέργειας Fermi. Η ενέργεια Fermi μπορεί να ρυθμιστεί δυναμικά με χρήση της επίδρασης του ηλεκτρικού πεδίου μέσω χημικής εμφύτευσης ή μέσω τάσης πόλωσης DC, και κατ' αυτόν τον τρόπο να συντονιστεί η αγωγιμότητα του γραφενίου. Στο σημείο Dirac, η πυκνότητα των καταστάσεων στο γραφένιο είναι μηδέν, γεγονός που οδηγεί σε χαμηλή αγωγιμότητα. Ένα εφαρμοσμένο πεδίο ηλεκτρικής πόλωσης εγγείι περισσότερους φορείς ηλεκτρονίων ή οπών, γεγονός που επιτρέπει τον δυναμικό έλεγχο της πολύπλοκης αγωγιμότητας. Το εφαρμοσμένο ηλεκτρικό πεδίο  $E_0$  μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά ως:

$$E_0 = \frac{q_e}{\pi \epsilon_0 h^2 v_f^2} \int_0^{\infty} \epsilon [f_d(\epsilon) - f_d(\epsilon + 2\mu_c)] d\epsilon \quad (9)$$

Μολονότι η επιφανειακή αγωγιμότητα του γραφενίου τόσο για συχνότητες MW όσο και για συχνότητες THz οφείλεται σε μετάπτωση εντός των ζωνών, η συμπεριφορά της αγωγιμότητας είναι διαφορετική σε αυτά τα εύρη συχνοτήτων. Το σχήμα 2 εμφανίζει το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της επιφανειακής αγωγιμότητας του γραφενίου τόσο στη ζώνη MW όσο και στη ζώνη THz σε θερμοκρασία δωματίου. Επομένως, καθώς δεν είναι εφικτό να σχεδιαστεί η συμπεριφορά της αγωγιμότητας σε ολόκληρο το εύρος της συχνότητας, δηλαδή από τα MW έως τα THz, στο σχήμα 2 φαίνονται μόνο τα χαρακτηριστικά εύρη συχνοτήτων τόσο στα MW όσο και στα THz.





Σχήμα 2: Το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της αγωγιμότητας του γραφενίου σε (a) ζώνη MW και (b) ζώνη THz.

Ακόμα κι αν είναι δυνατή η επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου εξίσου στις συχνότητες MW και THz, ωστόσο η συμπεριφορά της πολύπλοκης αγωγιμότητας του γραφενίου είναι διαφορετική στις συχνότητες MW και THz. Στο εύρος MW, το πραγματικό μέρος της επιφανειακής αγωγιμότητας του γραφενίου είναι σημαντικό και εμφανίζει τις σημαντικές αλλαγές από την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου. Αυτό οδηγεί σε ασθενή επαγωγική αντίσταση και αντίσταση ανεξάρτητη από τη συχνότητα. Επομένως, κατά κύριο λόγο, το γραφένιο είναι μέτριος αγωγός στη ζώνη των MW. Το σχήμα 2(a) εμφανίζει τη συμπεριφορά της πολύπλοκης αγωγιμότητας του γραφενίου στη ζώνη των MW. Επομένως, η ικανότητα συντονισμού για την αγωγιμότητα του γραφενίου είναι ανεπαρκής στη ζώνη MW, αν και είναι δυνατό να προκύψει πόλωση ηλεκτρικού πεδίου ή/και χημική εμφύτευση. Όταν προσεγγίσαμε προς τη ζώνη των THz, η πολύπλοκη αγωγιμότητα του γραφενίου συμπεριφέρεται με διαφορετικό τρόπο επειδή υποστηρίζει τα surface plasmon polariton (SPP) σε αυτό το εύρος συχνότητας. Σε αυτήν την περίπτωση, το φανταστικό μέρος της αγωγιμότητας του γραφενίου γίνεται σημαντικό και εμφανίζει τις αξιοσημείωτες αλλαγές από την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου. Η συμπεριφορά της πολύπλοκης αγωγιμότητας του γραφενίου στη ζώνη των THz φαίνεται στο σχήμα 2(b). Αυτή η συμπεριφορά της πολύπλοκης αγωγιμότητας του γραφενίου οδηγεί σε δυνατότητα αναδιαμόρφωσης της συχνότητας στην επίπεδη μεταλλική κεραία μικροταινίας στη ζώνη των THz.

## **2 Κεραία υψηλών επιδόσεων από γραφένιο στα 2,4 GHz με δυνατότητα εκτύπωσης με τη χρήση τεχνολογίας water-transferring**

### **2.1 Εισαγωγή**

Τα φύλλα γραφενίου που αποφλοιώνονται σε υγρή φάση είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για την εκτύπωση ηλεκτρονικών στοιχείων. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε μια τυπωμένη κεραία υψηλών επιδόσεων από γραφένιο στα 2,4 GHz. Το αγωγίμο μελάνι γραφενίου, το οποίο παρασκευάζεται με χρήση διαδικασίας αποφλοίωσης σε υγρή φάση, τυπώνεται επί ενός χαρτιού με ικανότητα water-transferable με χρήση τεχνικής εκτύπωσης blade printing, ενώ στη συνέχεια από εκείνο σχεδιάζεται μια διπολική κεραία και μεταφέρεται επί ενός υποστρώματος-στόχου. Η διπολική κεραία (43 × 3 mm) που κατασκευάστηκε, και η οποία επιδεικνύει τα τυπικά διαγράμματα ακτινοβολίας ιδανικής διπολικής κεραίας, επιτυγχάνει -10 dB εύρος ζώνης κατά 8,9% και μέγιστη απολαβή 0,7 dBi. Οι τυπωμένες κεραίες γραφενίου ικανοποιούν τις απαιτήσεις των εφαρμογών για το διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) και δυνητικά θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τις συμβατικές μεταλλικές κεραίες σε αυτές τις εφαρμογές.

Ειδικότερα τα τελευταία χρόνια έχει προκύψει ένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα τυπωμένα ηλεκτρονικά στοιχεία, τα οποία εμφανίζουν ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών, όπως κεραίες, (transparent) ηλεκτρόδια, φωτοβολταϊκά στοιχεία, τρανζίστορ λεπτού υμενίου και διατάξεις εκπομπής φωτός. Τα αγωγίμα μελάνια που χρησιμοποιούνται συχνότερα για τα τυπωμένα ηλεκτρονικά στοιχεία είναι τα μελάνια από μέταλλα λόγω της υψηλής ηλεκτρικής τους αγωγιμότητας και των εξαιρετικών μηχανικών τους ιδιοτήτων. Ωστόσο, υπάρχουν πολλά μειονεκτήματα που σχετίζονται με τη χρήση μελανιών από μέταλλα. Για παράδειγμα, μολονότι ο άργυρος έχει υψηλή αγωγιμότητα και το οξειδίό του είναι εξίσου αγωγίμο, η τιμή του αργύρου είναι τόσο υψηλή που τον καθιστά ακατάλληλη επιλογή για τη μαζική παραγωγή. Το αλουμίνιο και ο χαλκός είναι πιο φθηνά από τον άργυρο, αλλά οξειδώνονται εύκολα σε συνθήκες περιβάλλοντος και σχηματίζουν μη αγωγίμα οξειδία. Ένα είδος εναλλακτικών επιλογών αντί των μελανιών από μέταλλα είναι τα υλικά από άνθρακα, εκ των οποίων το γραφένιο εμφανίζεται ως η πιο ελκυστική επιλογή και με τις καλύτερες προοπτικές.

Το γραφένιο είναι ένα είδος δισδιάστατων (2D) υλικών, όπου τα άτομα άνθρακα διατάσσονται με κυψελοειδή τρόπο ώστε να σχηματιστεί ένα μονό στρώμα άνθρακα. Η υψηλή αγωγιμότητα αποδίδεται στην υψηλή κινητικότητα του φορτίου του γραφενίου. Επιπλέον, η αγωγιμότητά του είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα μέχρι την περιοχή των μικροκυμάτων, κάτι που αποτελεί πλεονέκτημα για τις εφαρμογές ραδιοσυχνοτήτων (RF). Συν τοις άλλοις, το «τέλειο» γραφένιο είναι τόσο πυκνό με αποτέλεσμα να μην μπορούν να το διαπεράσουν ακόμα και τα πιο μικρά άτομα, όπως το ήλιο, ενώ εμφανίζει χημική σταθερότητα με υψηλή μηχανική αντοχή και ελαστικότητα. Από την άλλη πλευρά,

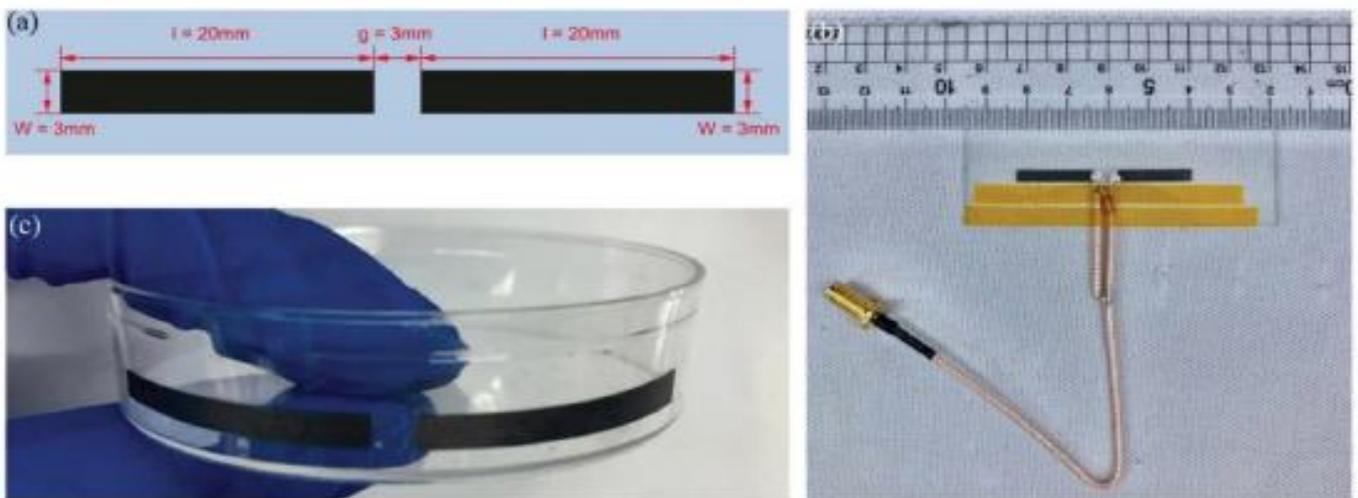
τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη των τεχνικών αποφλοιώσης γραφενίου από τον γραφίτη καθιστά δυνατή την παραγωγή μελανιών από γραφένιο σε μεγαλύτερη κλίμακα και με χαμηλό κόστος, κάτι που είναι απαραίτητο για τη μαζική παραγωγή τυπωμένων ηλεκτρονικών στοιχείων.

Υπάρχουν αρκετές πρόσφατες αναφορές για τυπωμένες κεραίες από γραφένιο, οι οποίες εμφανίζουν καλές προοπτικές για πρακτικές εφαρμογές. Ωστόσο, οι κεραίες από γραφένιο που αναφέρονται δούλεψαν κατά κύριο λόγο σε συχνότητες megahertz (MHz), κάτι που υποδεικνύει ότι είχαν μέγεθος κλίμακας των δεκατόμετρων (decimeter). Αυτό όμως είναι υπερβολικά μεγάλο μέγεθος για φορητές συσκευές. Επιπροσθέτως, το μεγαλύτερο μέρος των κεραιών από γραφένιο που έχουν αναφερθεί προηγουμένως είχαν σχετικά χαμηλή απολαβή, ενώ όλες οι κεραίες από γραφένιο που έχουν αναφερθεί είχαν τυπωθεί απευθείας επί των υποστρωμάτων. Άρα, σε μια τέτοια διαδικασία απαιτείται ένα επίπεδο υπόστρωμα, ενώ η άμεση εκτύπωση περιορίζει τις εφαρμογές της στο πεδίο του διαδικτύου των πραγμάτων (IoT) για το οποίο υπάρχει μεγαλύτερη προτίμηση για τις σύμμορφες κεραίες σε σχέση με τα άνισα και τρισδιάστατα (3D) αντικείμενα.

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά σε μια καινούρια διαδικασία κατασκευής τυπωμένων κεραιών από γραφένιο με υψηλή απολαβή και μικρές διαστάσεις. Η κεραία από γραφένιο τυπώνεται επί ενός χαρτιού με ικανότητα water-transferring με εκτύπωση με blade και στη συνέχεια μεταφέρεται επί της επιφάνειας του υποστρώματος-στόχου. Η διπολική κεραία μικρών διαστάσεων που κατασκευάστηκε, επιτυγχάνει  $-10$  dB εύρος ζώνης στα 2,297–2,510 GHz (8,9%) με μέγιστη απολαβή 0,7 dBi. Αυτές οι επιδόσεις της κεραίας που κατασκευάσαμε, ικανοποιούν τις δυνητικές εφαρμογές της στο πεδίο του IoT.

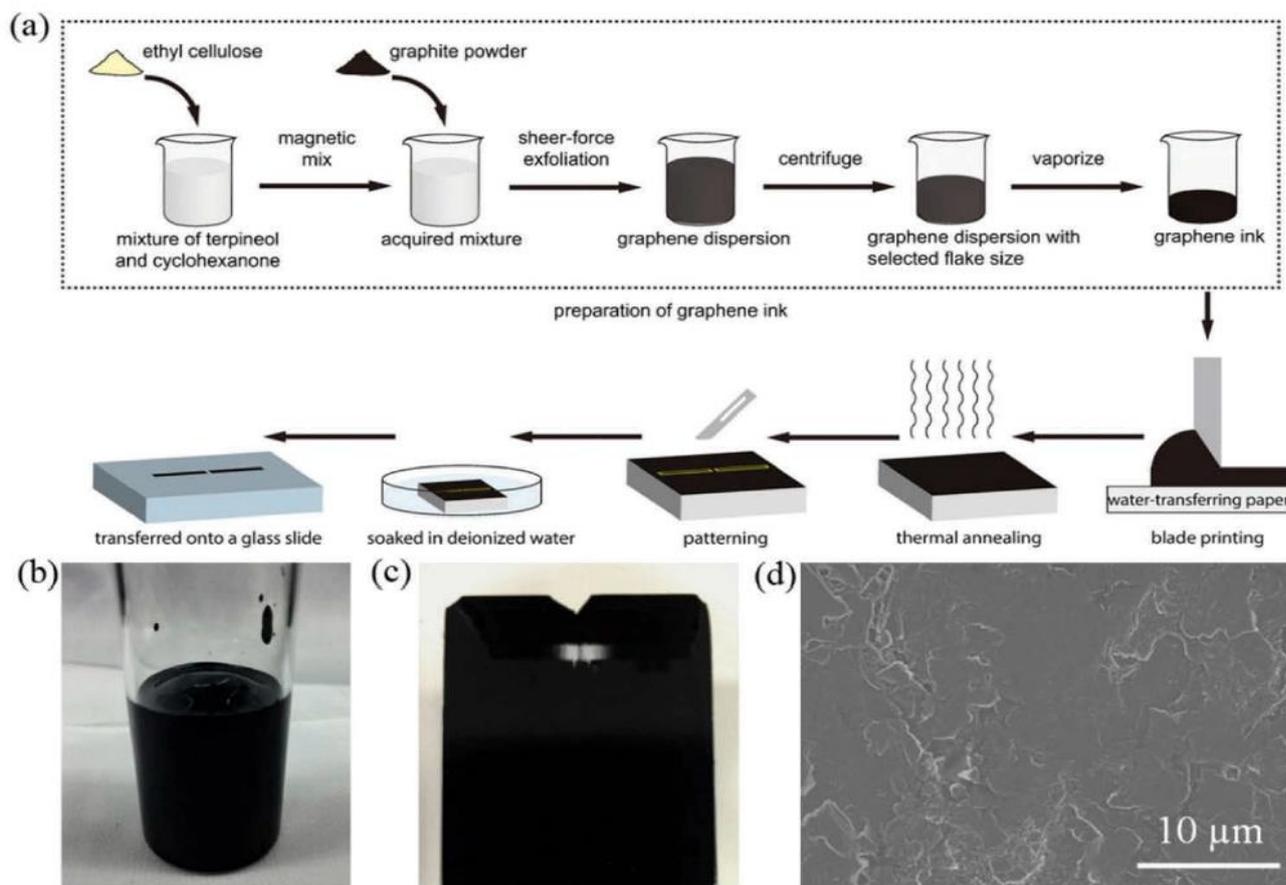
## 2.2 Πειραματικά στοιχεία

Η διπολική κεραία από γραφένιο σχεδιάστηκε και προσομοιώθηκε με χρήση HFSS (Προσομοιωτή δομών υψηλών συχνοτήτων). Κάθε πόλος της κεραίας έχει μήκος 20 mm και πλάτος 3 mm. Το κενό ανάμεσα στους δύο πόλους είναι 3 mm (Σχήμα 3).



Σχήμα 3: (a) Γεωμετρία σχεδιαζόμενης διπολικής κεραίας γραφενίου. Φωτογραφίες της (b) τυπωμένης διπολικής κεραίας με βάση το γραφένιο στην επιφάνεια μιας γυάλινης διαφάνειας, όπου χρησιμοποιήθηκε

αγώγιμη πάστα για την τροφοδοσία ισχύος στην κεραία με βάση το γραφένιο και (c) διπολική κεραία με βάση το γραφένιο τυπωμένη σε κυρτή επιφάνεια πλαστικού Petri dish χρησιμοποιώντας την τεχνική water-transferring.



Σχήμα 4: (a) Σχηματική προετοιμασία graphene-based ink, blade printing και μεταφορά κεραίας γραφενίου. (b) Φωτογραφία παρασκευασμένης μελάνης γραφενίου. (c) Φωτογραφία τυπωμένου στρώματος γραφενίου σε χαρτί με τεχνική water-transferring. (d) Ηλεκτρονική σάρωση μικροσκοπίας τυπωμένου στρώματος γραφενίου.

Προκειμένου να παρασκευαστεί το μελάνι γραφενίου για εκτύπωση με τεχνική blade (Σχήμα 4), στο μείγμα κυκλοεξανόνης και τερπινεόλης προστέθηκε αιθυλική κυτταρίνη, ενώ πραγματοποιήθηκε διασπορά με χρήση μαγνητικού αναμικτήρα. Έπειτα, στο μείγμα προστέθηκε κονίαμα γραφίτη το οποίο υποβλήθηκε σε περιστροφή ώστε να αποφλοιωθεί σε φύλλα γραφενίου με διαφορετικό αριθμό στρωμάτων γραφενίου με χρήση ενός αναμικτήρα υψηλής διάμεσης Silverson L5M (Silverson, UK). Έπειτα, ο γραφίτης αποφλοιώθηκε πρώτα στις 8000 rpm για 8 h, ενώ η διασπορά που προκύπτει στη συνέχεια φυγοκεντρήθηκε στις 5000 rpm για 30 min. Μετά από τη φυγοκέντρηση, το μεγαλύτερο τμήμα του πάνω μέρους διασποράς απομακρύνθηκε με πιπέτα. Η διασπορά γραφενίου που παραλήφθηκε θερμάνθηκε περαιτέρω σε θερμοκρασία 80°C ώστε να εξατμιστεί ο διαλύτης και να παραχθεί το κολλώδες μελάνι γραφενίου το οποίο είναι κατάλληλο για εκτύπωση με τεχνική blade. Εφεξής, αυτά τα φύλλα αποκαλούνται ως γραφένιο. Πραγματοποιήσαμε εκτύπωση με τεχνική blade με χρήση μηχανής επίστρωσης ταινίας χύτευσης εξοπλισμένης με

ξηραντήριο υπέρυθρων ακτίνων. Το μελάνι γραφενίου επιστρώθηκε επί ενός χαρτιού με ικανότητα water-transferring (Ruixin, China) με (blade printing) και αυτή η διαδικασία είχε ως αποτέλεσμα να προκύψει ένα παχύ και ομοιόμορφο στρώμα γραφενίου. Το πάχος του τυπωμένου στρώματος γραφενίου μπορεί να προσαρμοστεί με τον διαχωρισμό μεταξύ blade και του χαρτιού με δυνατότητα μεταφοράς. Μετά από τη χρήση blading, εκτελέστηκε απευθείας *in situ* θερμή ανόπτηση με το ξηραντήριο υπέρυθρων ακτίνων ώστε να εξαερωθεί ο διαλύτης. Η θερμοκρασία και ο χρόνος θέρμανσης ορίστηκαν στους 100°C και στα 30 min. Το χαρτί με ικανότητα water-transferring με τυπωμένο στρώμα γραφενίου σμιλεύθηκε σύμφωνα με το σχεδιασμένο μοτίβο της κεραίας. Έπειτα, διαβρέχθηκε σε απιονισμένο νερό για 5 min ώστε να δοθεί η δυνατότητα στο τυπωμένο στρώμα γραφενίου να διαχωριστεί από το χάρτινο υπόστρωμα και να μεταφερθεί στην επιφάνεια του υποστρώματος-στόχου. Το πάχος του τυπωμένου στρώματος γραφενίου υπολογίστηκε με χρήση προφίλοσκοπίου Bruker DektakXT (Bruker, USA) και η αντίσταση φύλλου υπολογίστηκε με χρήση ενός συστήματος φαινομένου Hall (Lakeshore 7604, USA).

Προκειμένου να εκτελεστούν οι μετρήσεις επιδόσεων της κεραίας, προσαρτήθηκε στους πόλους ένα ομοαξονικό σύρμα με συνδέτη Subminiature Version A με χρήση ευθερμαγωγού αλοιφής αργύρου ώστε η κεραία από γραφένιο να τροφοδοτηθεί με ισχύ. Στο ομοαξονικό σύρμα ενσωματώθηκε ένας αναδιπλούμενος ζεύκτης ζυγοστάθμισης ώστε να αντισταθμιστεί το ρεύμα που προκύπτει από τον εξωτερικό αγωγό του ομοαξονικού σύρματος. Αξιοποιήθηκε ένας αναλυτής δικτύου διανύσματος Rohde & Schwarz ZNB20 (Rohde & Schwarz, Germany) ώστε να μετρηθεί ο συντελεστής ανάκλασης (S11) της κεραίας από γραφένιο. Τα διαγράμματα ακτινοβολίας της κεραίας υπολογίστηκαν σε ανηχοϊκό θάλαμο. Η κεραία γραφενίου στην αντικειμενοφόρο πλάκα στερεώθηκε σε περιστρεφόμενη επιφάνεια, με μια κεραία-κέρας HD-26SGAH15N (Hengda, China) σε άλλο περιστρεφόμενη επιφάνεια ως κεραία-δέκτης. Οι μετρήσεις εκτελέστηκαν μία φορά ανά βαθμό περιστροφής.

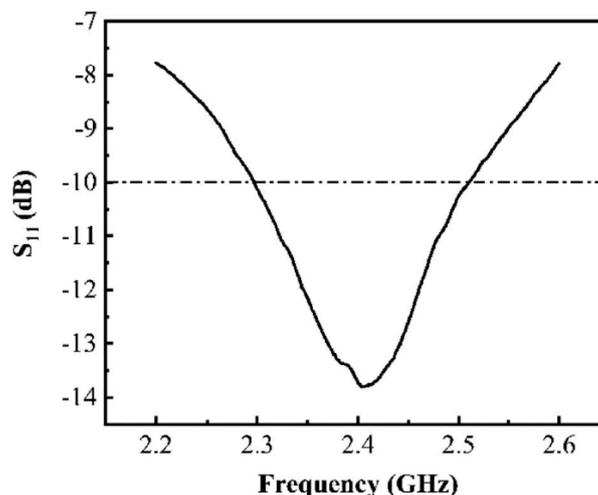
## 2.3 Αποτελέσματα

Υπάρχουν πολλά βασικά σχέδια κεραίας, όμως το πιο κλασικό και ευρέως χρησιμοποιημένο είναι το σχέδιο της διπολικής κεραίας, η οποία έχει καλή δομή και εμφανίζει καλές επιδόσεις. Καθώς πολλά πρωτόκολλα IoT όπως το 802.15.4 (Zigbee, Thread), το Bluetooth και το ANT λειτουργούν σε συχνότητα 2,4 GHz, η διπολική κεραία που κατασκευάστηκε είναι σχεδιασμένη ώστε να λειτουργεί σε αυτήν τη συχνότητα. Συνεπώς, κάθε πόλος της κεραίας έχει μήκος 20 mm και πλάτος 3 mm, ενώ το κενό ανάμεσα στους δύο πόλους είναι 3 mm (Σχήμα 8(a)). Η εμπέδηση εισόδου και η αποδοτικότητα ακτινοβολίας της προσομοίωσης για την κεραία είναι αντιστοίχως 55 – j2,3 Ω και 95.5%.

Εκμεταλλεούμενοι την εκτύπωση τεχνικής blade, μπορούμε να παρασκευάσουμε με ευκολία αρκετά μεγάλου πάχους και σχετικά ομοιόμορφα υμένια, τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 9(c,d). Η θερμοκρασία της θερμικής ανόπτησης του τυπωμένου υμενίου γραφενίου στην παρούσα μελέτη ήταν 100°C, η οποία είναι εντελώς διαφορετική από τη θερμοκρασία που είχε αναφερθεί

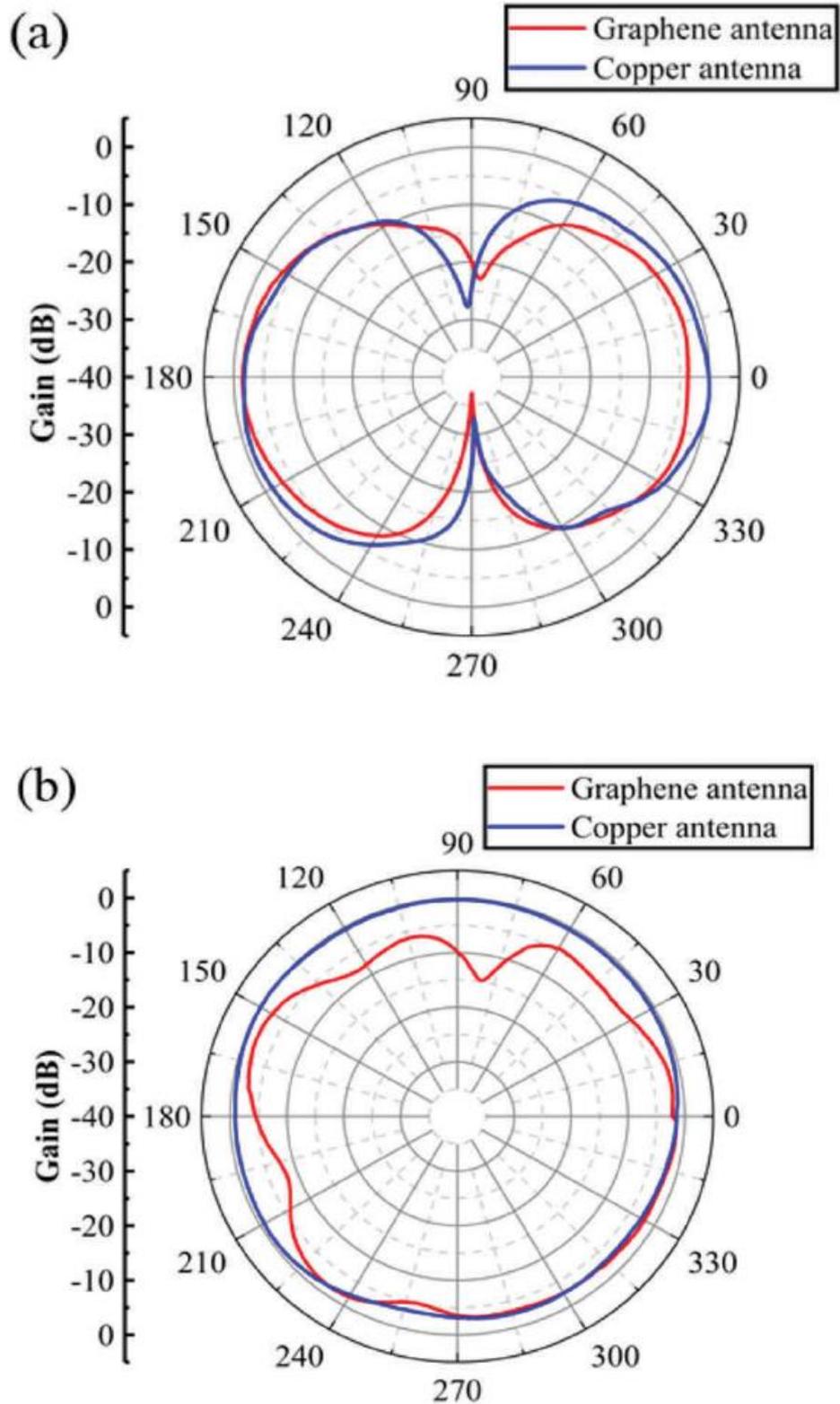
προηγουμένως, τους 350°C. Η ανόπτηση χαμηλής θερμοκρασίας που πραγματοποιήσαμε είναι συμβατή με τα θερμοευαίσθητα υποστρώματα όπως εύκαμπτο χαρτί και τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες αναφορές σχετικά με την απευθείας εκτύπωση μελανιού γραφενίου σε επίπεδο υπόστρωμα, η διαδικασία μας περιλάμβανε την εκτύπωση μελανιού γραφενίου επί ενός χαρτιού με ικανότητα water-transferring και η μεταφορά του τυπωμένου στρώματος γραφενίου είναι κατάλληλη για την κατασκευή μιας κεραίας γραφενίου επί ενός ακαθόριστου υποστρώματος, όχι μόνο σε επίπεδα υποστρώματα, αλλά και σε 3D και σε ανομοιόμορφα αντικείμενα (Σχήμα 8(c)). Αυτό διευρύνει σε σημαντικό βαθμό τις εφαρμογές της τυπωμένης κεραίας γραφενίου. Στην παρούσα μελέτη, προσαρμόσαμε την αντίσταση του φύλλου στο τυπωμένο στρώμα γραφενίου που κατασκευάσαμε ώστε να είναι περίπου  $2,6 \Omega/\square$  για το στρώμα γραφενίου με πάχος 35  $\mu\text{m}$  για τη διπολική κεραία. Σημειωτέον, η αντίσταση φύλλου του στρώματος γραφενίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την παρασκευή του μελανιού γραφενίου, από τον σχηματισμό του στρώματος γραφενίου και του πάχους των σχηματισμένων στρωμάτων γραφενίου. Εάν συντονιστούν οι ανωτέρω παράγοντες, τότε η αντίσταση φύλλου του σχεδιασμένου στρώματος γραφενίου βρίσκεται εντός του εύρους 0,8–400  $\Omega/\text{m}$ .

Υπολογίζουμε τον συντελεστή ανάκλασης ( $S_{11}$ ) της κεραίας από γραφένιο που κατασκευάσαμε και βρέθηκε ότι ο υπολογισμένος  $S_{11}$  έχει ελάχιστη τιμή  $-13,79 \text{ dB}$  στα 2,407 GHz (Σχήμα 5), το οποίο συνιστά ότι η κεραία από γραφένιο που κατασκευάσαμε λειτουργεί στην επιθυμητή συχνότητα και προσαρμόζεται επαρκώς με τον αναδιπλούμενο ζεύκτη ζυγοστάθμισης. Επιπροσθέτως, το  $-10 \text{ dB}$  εύρος ζώνης της κεραίας κυμαίνεται από (8.9%). Το αποτέλεσμα συνιστά ότι η κεραία από γραφένιο που κατασκευάσαμε έχει αρκετά μεγάλο εύρος ζώνης.



Σχήμα 5: Μέτρηση συντελεστή ανάκλασης ( $S_{11}$  τυπωμένης διπολικής κεραίας με βάση το γραφένιο σε γυάλινη διαφάνεια.

Υπολογίζουμε τα διαγράμματα ακτινοβολίας της κεραίας από γραφένιο και τα συγκρίνουμε με μια κεραία από χαλκό που έχει ίδιο σχέδιο όπως η κεραία από γραφένιο. Το σχήμα 6(a,b) εμφανίζει τα κανονικοποιημένα διαγράμματα ακτινοβολίας επιπέδου E και επιπέδου H τόσο για την τυπωμένη κεραία γραφενίου όσο και για την κεραία χαλκού στα 2,4 GHz.



Σχήμα 6: (a) Κανονικοποιημένα μοτίβα ακτινοβολίας επιπέδου E της τυπωμένης διπολικής κεραίας με βάση το γραφένιο και της χάλκινης κεραίας του ίδιου σχεδίου σε γυάλινη διαφάνεια. (b) Κανονικοποιημένα σχέδια ακτινοβολίας επιπέδου H της τυπωμένης διπολικής κεραίας με βάση το γραφένιο και της χάλκινης κεραίας του ίδιου σχεδίου σε γυάλινη διαφάνεια.



Τα διαγράμματα ακτινοβολίας της κεραίας από γραφένιο που κατασκευάσαμε συμφωνούν με εκείνα της κεραίας χαλκού τόσο στο επίπεδο E όσο και στο επίπεδο H, επιδεικνύοντας τα χαρακτηριστικά διαγράμματα ακτινοβολίας για διπολικές κεραίες. Η μέγιστη απολαβή της κεραίας από γραφένιο στα 2,4 GHz υπολογίζεται ότι είναι 0,7 dBi, άρα καλύτερη από τις περισσότερες προηγούμενες τυπωμένες κεραίες γραφενίου με διπολικές δομές (Πίνακας 2). Η υψηλή απολαβή μιας κεραίας δίνει τη δυνατότητα για μεγαλύτερο εύρος ανάγνωσης όπως γίνεται λόγος παρακάτω.

Πίνακας 2: Σύγκριση απόδοσης τυπικών τυπωμένων κεραιών γραφενίου με διπολικές δομές

Ref.	Operating frequency	Antenna dimensions	Gain
[7]	870 MHz	92 × 25 mm	-4 dBi
[30]	960 MHz	141 × 3.5 mm	-0.6 dBi
[31]	889 MHz	143 × 3 mm	-2.18 dBi
This work	2.4 GHz	43 × 3 mm	0.7 dBi

Βάσει των παραμέτρων της κεραίας, μπορούμε να υπολογίσουμε το θεωρητικό μέγιστο εύρος ανάγνωσης των κεραιών όταν προσαρτώνται σε single-chip πομπодέκτες σύμφωνα με την τροποποιημένη εξίσωση μετάδοσης του Friis.

$$P_r = P_t \cdot \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} \cdot (1 - |\Gamma_t|^2) \cdot (1 - |\Gamma_r|^2)$$

όπου το  $P_r$  είναι η λαμβανόμενη ισχύς, το  $P_t$  είναι η εκπεμπόμενη ισχύς, το  $G_t$  είναι η απολαβή της κεραίας-πομπού, το  $G_r$  είναι η απολαβή της κεραίας-δέκτη, το  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος, το  $R$  είναι η απόσταση μεταξύ της κεραίας-πομπού και της κεραίας-δέκτη, το  $\Gamma_t$  είναι ο συντελεστής ανάκλασης της κεραίας-πομπού και το  $\Gamma_r$  είναι ο συντελεστής ανάκλασης της κεραίας-δέκτη. Πραγματοποιούμε την υπόθεση σχετικά με μια κατάσταση όπου οι δύο κόμβοι επικοινωνούν ο ένας με τον άλλον. Οι κόμβοι είναι ξεχωριστά εξοπλισμένοι με κεραία από γραφένιο που κατασκευάσαμε και με έναν (single-chip) πομπό υψηλής ευαισθησίας στα 2,4 GHz όπως ο nRF52840 (Nordic, Norway) που έχει υποστήριξη πρωτοκόλλου για Bluetooth 5, Bluetooth mesh, Thread, Zigbee, 802.15.4, ANT, και 2,4 GHz αποκλειστικές στοίβες. Η μέγιστη ισχύς εξόδου και η ελάχιστη ευαισθησία του nRF52840 είναι αντιστοίχως 8 και -103 dBm. Κατά συνέπεια, το θεωρητικό μέγιστο εύρος ανάγνωσης μπορεί να φτάσει μέχρι και 3973 m το οποίο προσαρμόζεται επαρκώς με το μεγάλο εύρος ανάγνωσης που επιδεικνύει το chip nRF52840. Σημειωτέον, το εύρος ανάγνωσης μιας κεραίας εξαρτάται επίσης από την ισχύ μετάδοσης και την ευαισθησία των μεμονωμένων chips. Τόσο μεγάλο εύρος ανάγνωσης επαρκεί για το μεγάλο φάσμα των εφαρμογών IoT, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρικών στοιχείων προσαρτημένων σε είδη ένδυσης, του έξυπνου σπιτιού, του απομακρυσμένου ελέγχου, της ανίχνευσης περιουσιακών στοιχείων, της ανίχνευσης συσκευασιών και των βιομηχανικών δικτύων. Το χαμηλό κόστος κατασκευής, η υψηλή απολαβή, οι μικρές διαστάσεις που προκύπτουν από τη συχνότητα λειτουργίας σε GHz, καθώς και η ικανότητα συμμόρφωσης με ακαθόριστα

υποστρώματα τα οποία προέρχονται από την τεχνολογία water-transferring, είναι τέσσερα προτιμώμενα πλεονεκτήματα της κεραίας από γραφένιο για εφαρμογές IoT και άλλες συναφείς εφαρμογές.

Από την ανάλυση των παραπάνω αποτελεσμάτων καταδείξαμε την κατασκευή κεραίας υψηλών επιδόσεων από γραφένιο στα 2,4 GHz μέσω εκτύπωσης και με χρήση χαρτιού (water-transferrable paper). Αυτή η φιλική προς το περιβάλλον διαδικασία χαμηλής θερμοκρασίας είναι κατάλληλη για παραγωγή κεραίων από γραφένιο με δυνατότητα αυξημένης παραγωγής. Η διπολική κεραία γραφενίου μικρού μεγέθους που κατασκευάστηκε  $-10$  dB εύρος ζώνης στα 2,297–2,510 GHz (8,9%) με μέγιστη απολαβή 0,7 dBi. Οι επιδόσεις της κεραίας γραφενίου που κατασκευάστηκε ικανοποιεί τις απαιτήσεις εφαρμογής για ανίχνευση IoT και συνιστά την εφαρμοσιμότητα της αντικατάστασης των συμβατικών μεταλλικών κεραίων σε εκείνες τις εφαρμογές.

### 3 Βελτιωμένο εύρος ζώνης για κεραίες μικροταινίας με χρήση παρασιτικών στοιχείων

#### 3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα περιγράψουμε μια μέθοδο διπλασιασμού του εύρους ζώνης για κεραίες με ορθογώνιο κάλυμμα μικροταινίας (microstrip patch) μέσω της τοποθέτησης χωρητικά διεγερμένων  $\lambda_m/4$  παρασιτικών στοιχείων βραχυκυκλώματος στα ακτινοβολούντα άκρα των κεραιών. Τα χαρακτηριστικά της κεραίας **επεξηγούνται** ως προς ένα μοντέλο αντίθεσης φάσης ενός ζεύγους συζευγμένων συντονιστών και φαίνεται ότι η βελτίωση του εύρους ζώνης είναι ανεξάρτητη από τη χωρητικότητα σύζευξης. Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται για τις κεραίες γραμμικής όσο και κυκλικής πόλωσης και επαληθεύουν τις θεωρητικές προβλέψεις. [1980, C. Wood]

Μέχρι σήμερα, έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις κεραίες μικροταινίας λόγω των πλεονεκτημάτων που εμφανίζουν, όπως είναι το χαμηλό προφίλ, το μικρό βάρος και το χαμηλό κόστος κατασκευής του τυπωμένου κυκλώματος. Έχουν αναπτυχθεί πολλές μορφές αυτών των κεραιών ενώ μία από τις πιο γνωστές μορφές είναι η κεραία με patch ανοικτού κυκλώματος. Το σχήμα 7a εμφανίζει την κοινή ορθογώνια μορφή  $\sim \lambda_m/2$ . Αυτή η κεραία μπορεί να θεωρηθεί ως μια κοιλότητα με «μαγνητικά» τοιχώματα αγωγού μεταξύ του μοτίβου ακτινοβολητή αγωγού και του επιπέδου γείωσης, όπου η ακτινοβολία προκύπτει από την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τα όρια του patch και διέπεται από το πεδίο που προκαλείται στα άκρα του patch. Η ενέργεια που ακτινοβολείται κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου ραδιοσυχνότητας είναι μικρή σε σύγκριση με εκείνη που αποθηκεύεται στην κοιλότητα, ενώ για τις κεραίες με τυπικά υποστρώματα πλακετών τυπωμένου κυκλώματος λαμβάνονται εύρη ζώνης περίπου 1% για συχνότητες 1-2 GHz. Η αύξηση του εύρους ζώνης για μια κεραία αυτού του είδους απαιτεί κατά κανόνα την ελάττωση της επιτρεπτότητας του υποστρώματος ή την αύξηση του πάχους του, καθώς το ακριβές σχήμα του patch δεν έχει κάποια επικρατούσα επίδραση στο εύρος ζώνης εάν οι συνολικές διαστάσεις είναι παρόμοιες.

Χρησιμοποιήθηκε ένα ορθογώνιο patch  $\lambda_m/4$  με βραχυκύκλωμα κατά μήκος της μίας άκρης (σχήμα 7b) προκειμένου να δώσει ένα ευρύτερο εύρος δέσμης σε σχέση με το patch ανοικτού κυκλώματος  $\lambda_m/2$ , μέσω της αποφυγής της δράσης συμβολόμετρου των δύο άκρων-πηγών. Ωστόσο, αυτό εξαλείφει επίσης την αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των δύο πηγών κατά τρόπον ώστε το εύρος ζώνης να ελαττώνεται κατά περίπου ένα πέμπτο. Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να δείξει ότι η παρασιτική διέγερση τέτοιων patch βραχυκυκλώματος μέσω της χωρητικής σύζευξης με το ακτινοβολούν άκρο ενός οδηγούμενου patch αυξάνει σε σημαντικό βαθμό το διαθέσιμο εύρος ζώνης, ενώ δύο πιθανές διατάξεις παρουσιάζονται στο σχήμα 8. Αυτές οι κεραίες συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο, και συνεπώς αρκεί να ληφθεί υπόψη μόνο η απλούστερη μορφή των δύο patch

βραχυκυκλώματος  $\lambda m/4$ , σχήμα 8b, προκειμένου να εξηγηθεί η λειτουργία τους όπως συμβαίνει με την ακόλουθη ανάλυση ισοδύναμου κυκλώματος.

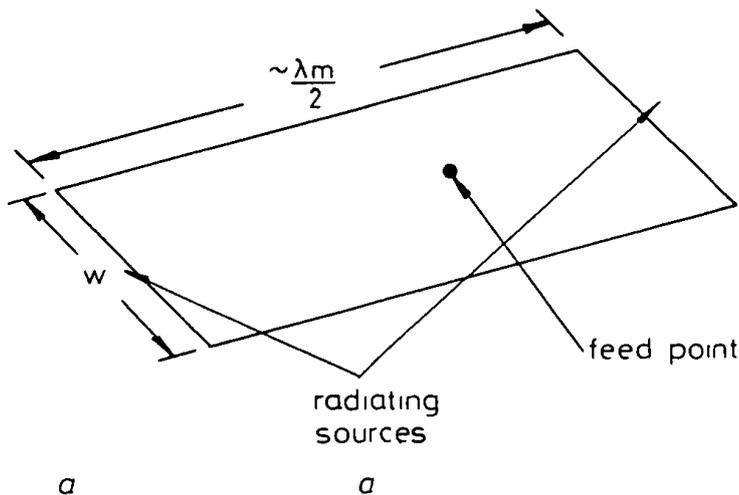
### 3.2 Θεωρία

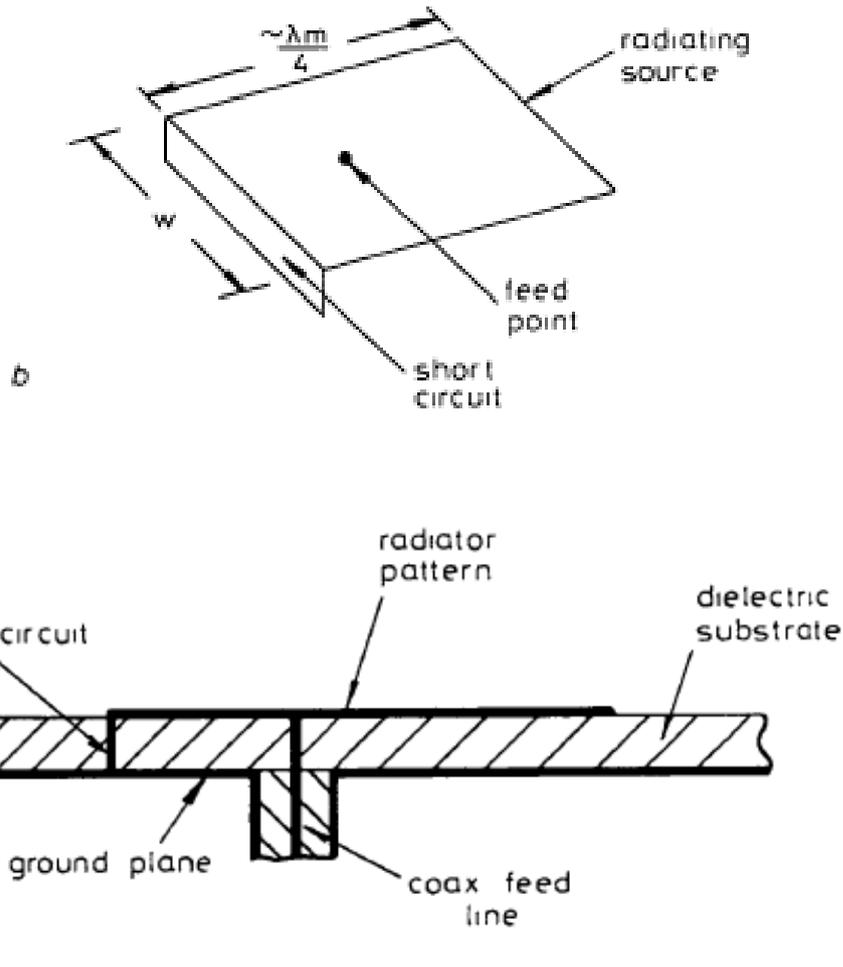
Η σύνθετη αγωγιμότητα εισόδου, κοντά στη συχνότητα συντονισμού μιας κεραίας με patch, μπορεί να αναπαρασταθεί προσεγγιστικά από ένα συντονισμένο παράλληλο κύκλωμα *GLC*.

Στο σχήμα 7a παρατηρούμε τη διάταξη σε διαστάσεις  $\lambda m/2$  με ανοικτό κύκλωμα, στο σχήμα 7b με βραχυκύκλωμα  $\lambda m/4$  και στο σχήμα 7c τη διατομή της διάταξης. Στη συνέχεια στο σχήμα 8a απεικονίζεται το ανοικτό κύκλωμα της παρασιτικής κεραίας μικροταινίας ενώ στο σχήμα 8b βλέπουμε αντίστοιχα το βραχυκυκλωμένο patch.

Για τον χαρακτηρισμό της κεραίας του σχήμα 8b, αρκεί μια παρόμοια αναπαράσταση όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα 9a. Ειδικότερα στο σχήμα 9a εμφανίζεται το ισοδύναμο κύκλωμα βραχυκυκλωμένων κεραιών με παρασιτικό στοιχείο ενώ στο σχήμα 9b παρατηρούμε τους παραμέτρους συντονισμού  $B_n$ , με μια τροποποίηση σύμφωνα με την οποία η ακτινοβολία της οπής μεταξύ των δύο patch αναπαρίσταται από μια μονή αγωγιμότητα ακτινοβολίας  $G$  η οποία είναι παράλληλη με τη χωρητικότητα σύζευξης της οπής  $C_c$ . Αυτές οι αναπαραστάσεις αντιστοιχούν στην άκρη του οδηγούμενου patch το οποίο, κατά την πρακτική εφαρμογή, οδηγεί σε υψηλή εμπέδηση εισόδου. Προκειμένου να προκύψει μια προσαρμογή των  $50\Omega$  στον συντονισμό η τροφοδοσία θα πρέπει να κινηθεί προς ένα σημείο χαμηλής τάσης της κατανομής του ημιτονοειδούς πεδίου του patch. Στη συνέχεια, η εμπέδηση δίνεται με επαρκή ακρίβεια από την προσεγγιστική σχέση:

$$Z_{in} = V_f^2 / (V_e^2 Y_e) \quad (10)$$





Σχήμα 7: Ορθογώνιες κεραίες μικροταινίας (patch)

a:  $\lambda_{m/2}$  ανοιχτό κύκλωμα.

b:  $\lambda_{m/4}$  βραχυκύκλωμα.

c: Διατομή μέσω κεραίας βραχυκυκλώματος  $\lambda_{m/4}$ .

όπου το  $V_f$  είναι η τάση του σημείου τροφοδοσίας, το  $V_e$  είναι η τάση της άκρης και το  $Y_e$  είναι η σύνθετη αγωγιμότητα η οποία αναφέρεται στην άκρη του patch. Για το κύκλωμα του σχήμα 9a το  $Y_e$  δίνεται από τη σχέση [1980, C. Wood]:

$$Y_e = \frac{GB^2 + i\{B^3 + 3B_c B^2 + 2(G^2 + B_c^2)B\}}{G^2 + (B + B_c)^2} \quad (11)$$

όπου

$$jB = j\omega C + \frac{1}{j\omega L} = -jY_0 \cot\left(\frac{2\pi\sqrt{\epsilon_{eff}}l}{\lambda}\right)$$

και

$$jB_c = j\omega C_c$$

το  $Y_0$  και το  $e_{eff}$  είναι αντίστοιχα η σύνθετη αγωγιμότητα και η ενεργός διηλεκτρική σταθερά, μιας γραμμής μετάδοσης εύρους  $W$  στο ίδιο υπόστρωμα. Το  $G$  είναι η αγωγιμότητα ακτινοβολίας της σπής και δίνεται από τη σχέση [1980, C. Wood]:

$$G = \frac{1}{120\pi^2} (xSi(x) - 2\sin^2(x/2) - 1 + \sin(x)/x) \quad (12)$$

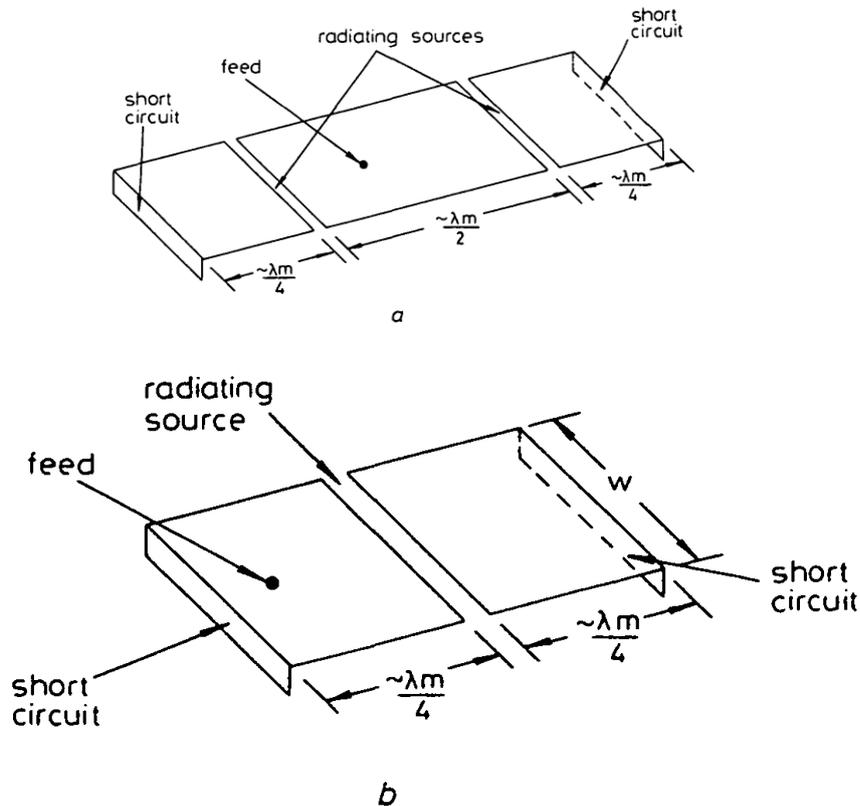
όπου  $x = 240\pi^2 h Y_0 / \lambda \sqrt{\epsilon_{eff}}$  και το  $h$  είναι το πάχος του υποστρώματος.

Ο λόγος των τάσεων των δύο κυκλωμάτων συντονισμού δίνεται από τη σχέση [1980, C. Wood]:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{G + jB_c}{G + j(B + B_c)} \quad (13)$$

Το κύκλωμα βρίσκεται σε συντονισμό όταν  $\text{Im}(Y_e) = 0$ , και οι τιμές του  $B$  για αυτήν τη συνθήκη είναι [1980, C. Wood]:

$$B_{r1}; B_{r2}; B_{r3} = 0; \frac{-3B_c + \sqrt{B_c^2 - 8G^2}}{2}; \frac{-3B_c - \sqrt{B_c^2 - 8G^2}}{2} \quad (14)$$



Σχήμα 8: Παρασιτική κεραία μικροταινίας (patch) [1980, C. Wood]

a: ανοιχτό κύκλωμα patch (ενεργό στοιχείο)

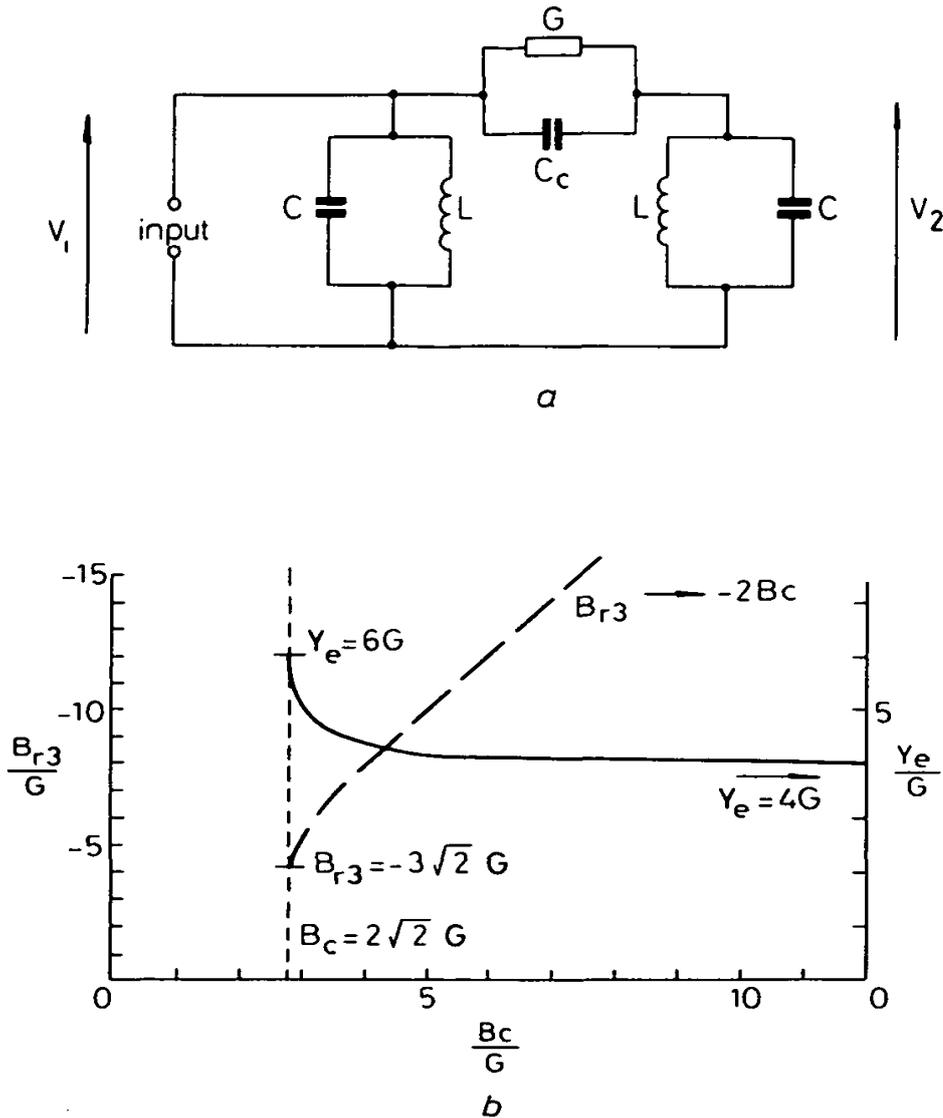
b: βραχυκυκλωμένο patch (ενεργό στοιχείο)

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά κεραίας διπλού βραχυκυκλώματος στο όριο  $B_c^2 > 8G^2$

Resonance $n$	$B_{rn}$	$Y_e$	$V_2/V_1$
1	0	0	1
2	$-B_c$	$B_c^2/G$	$jB_c/G$
3	$-2B_c$	$4G$	$-1$

και τα χαρακτηριστικά της κεραίας σε αυτές τις τρεις συνθήκες συντονισμού ενδέχεται να αναγνωριστούν εάν λάβουμε υπόψη τη συμπεριφορά των λόγων των σύνθετων αγωγιμοτήτων και των τάσεων στο όριο  $B_c^2 \gg 8G^2$  (Πίνακας 3). Ο πρώτος συντονισμός προκύπτει στη συχνότητα συντονισμού των μεμονωμένων στοιχείων, και επειδή ο λόγος των τάσεων είναι ίσος με τη μονάδα τότε δεν υφίσταται ακτινοβολία και η αγωγιμότητα συντονισμού είναι ίση με μηδέν. Βεβαίως, στην πραγματικότητα θα υπάρχουν απώλειες αγωγής στα patch και από άλλα μέρη των ορίων του patch θα προκύψει (κάποια) ορισμένη υπολειμματική ακτινοβολία. Ωστόσο, θα είναι σχετικά μικρή και θα έχει ως αποτέλεσμα να προκύψει ένα πολύ στενό εύρος συντονισμού. Στον δεύτερο συντονισμό, το παρασιτικό στοιχείο θα έχει πολύ μεγαλύτερη τάση διέγερσης σε σύγκριση με το οδηγούμενο στοιχείο, με αποτέλεσμα το εύρος ζώνης που προκύπτει να είναι πρακτικά ίδιο με εκείνο ενός μεμονωμένου στοιχείου και να μην προκύπτει κάποια βελτίωση. Ο τρίτος συντονισμός έχει μια τάση διέγερσης σε αντίθεση φάσης, προκειμένου η ακτινοβολούμενη ισχύς να είναι τετραπλάσια από εκείνη του απομονωμένου στοιχείου με ίση τάση εισόδου. Ωστόσο, μονάχα η αποθηκευμένη ενέργεια θα διπλασιαστεί, και καθώς το εύρος ζώνης ενός κυκλώματος συντονισμού είναι ανάλογο του λόγου της ακτινοβολούμενης ισχύος και της αποθηκευμένης ενέργειας, το εύρος ζώνης αυτού του συντονισμού θα είναι διπλάσιο από εκείνο του μεμονωμένου στοιχείου. Καθώς το  $B_{r3}$  είναι επαγωγικό, αυτός ο συντονισμός θα προκύψει σε χαμηλότερη συχνότητα σε σύγκριση με τον συντονισμό του απομονωμένου patch.

Εάν χρησιμοποιηθεί η εξίσωση 11 για τη σύνθετη αγωγιμότητα εισόδου της κεραίας τότε η αγωγιμότητα συντονισμού, η ενδοτικότητα του συντονισμένου κυκλώματος και το εύρος ζώνης 2:1 v.s.w.r. με μια προσαρμοσμένη γραμμή τροφοδοσίας του συντονισμού  $B_{r3}$  υπολογίζονται για εύρος ενδοτικότητας σύζευξης  $B_c$ . Τα αποτελέσματα για τη σύνθετη αγωγιμότητα και την ενδοτικότητα παρουσιάζονται στο σχήμα 9b, και μπορεί να φανεί ότι προσεγγίζουν ταχέως τις περιοριστικές τιμές καθώς αυξάνεται το  $B_c$ . Βρέθηκε ότι ο λόγος των ευρών ζώνης 2:1 v.s.w.r. της συζευγμένης κεραίας και του απομονωμένου patch διέφεραν πάρα πολύ λίγο κατά  $B_c$ . Προέκυψε ένας μέγιστος λόγος 2·19, όπου για μεγάλες τιμές του  $B_c$  ο λόγος προσέγγιζε το 2·0 όπως είχε προβλεφθεί ανωτέρω. Συνεπώς, επιβεβαιώθηκε ότι το θεωρητικό εύρος ζώνης της συζευγμένης κεραίας είναι προσεγγιστικά διπλάσιο από εκείνο της κεραίας με απομονωμένο patch ανεξάρτητα από την τιμή της χωρητικότητας σύζευξης.



Σχήμα 9: Ανάλυση βραχυκυκλωμένων κεραιών με παρασιτικό στοιχείο.

*a: Ισοδύναμο κύκλωμα*

*b: Παράμετροι συντονισμού  $B_n$  αγωγιμότητα patch ευαισθησία patch*

Αποδείχθηκε λοιπόν ότι όταν τοποθετούνται παρασιτικά στοιχεία patch μικροταινίας με βραχυκύκλωμα  $\lambda_m/4$  πλησίον μιας κεραιάς με οδηγούμενο patch, τότε το εύρος ζώνης της κεραιάς ενδέχεται προσεγγιστικά να διπλασιαστεί. Μια θεωρητική εξήγηση της απλούστερης μορφής της κεραιάς δείχνει ότι η συμπεριφορά ενδέχεται να εξηγηθεί ως προς μια συνθήκη συντονισμού αντίθεσης φάσης μεταξύ του οδηγούμενου και του παρασιτικού στοιχείου η οποία οδηγεί σε αυξανόμενη ακτινοβολία για μια δοσμένη ποσότητα ενέργειας που είναι αποθηκευμένη εντός του συστήματος. Η τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί σε πιο πολύπλοκες γεωμετρίες όπως σε στοιχεία κυκλικής πόλωσης αλλά και στις βασικές κεραιές γραμμικής πόλωσης.

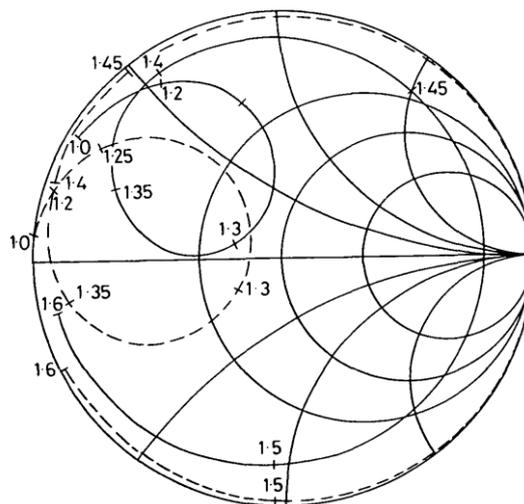
Το συνολικό μέγεθος της κεραιάς αυξάνεται μέσω της προσθήκης παρασιτικών στοιχείων σε ένα οδηγούμενο patch. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στις εφαρμογές κεραιών γραμμικής



πόλωσης η διπλάσια συσκευή βραχυκυκλώματος προσφέρει θεωρητικά 65% μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε σύγκριση με τη συμβατική κεραία με patch ανοικτού κυκλώματος  $\lambda_m/2$  με ελαφρώς ελαττωμένο συνολικό μέγεθος.

### 3.3 Πειραματικά αποτελέσματα

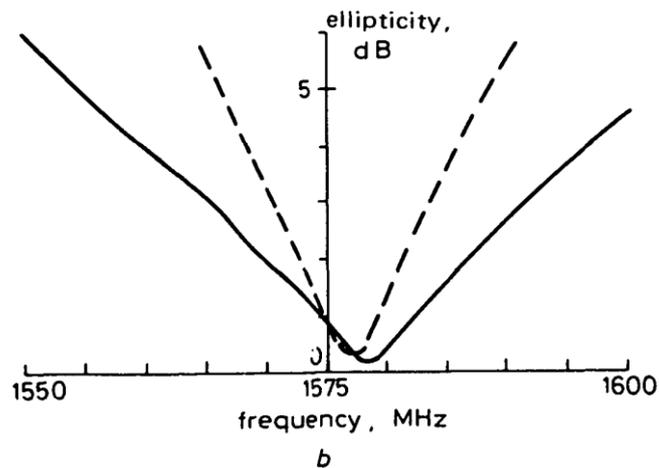
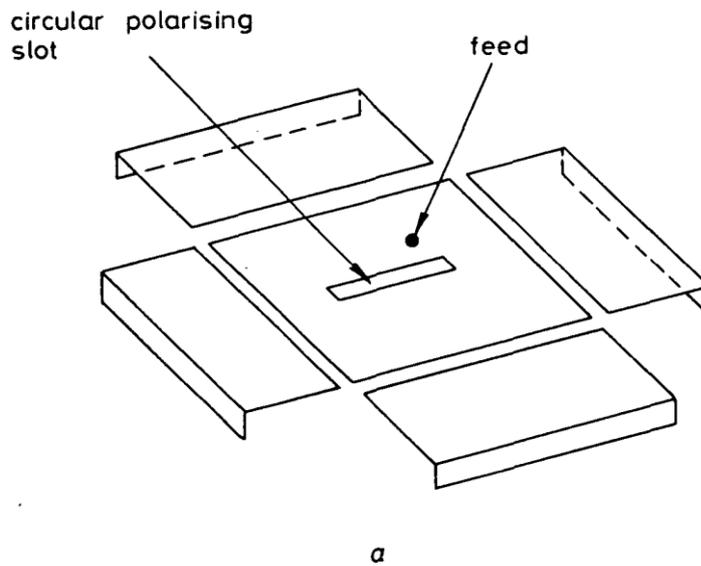
Κατασκευάστηκαν και εξετάστηκαν τα παραδείγματα των ρυθμίσεων κεραίας με παρασιτικό patch των σχημάτων 8a και 8b και τα τυπικά εύρη ζώνης που μετρήθηκαν απαριθμούνται στον Πίνακα 4 μαζί με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από απομονωμένα στοιχεία του ίδιου εύρους τα οποία είναι συντονισμένα στην ίδια συχνότητα. Φαίνεται λοιπόν ότι η αύξηση του εύρους ζώνης που προέκυψε και στις δύο περιπτώσεις συμφωνεί ικανοποιητικά με τον θεωρητικό λόγο 2:1. Στο σχήμα 10 παρουσιάζεται το γράφημα της εμπέδησης για την κεραία με το patch διπλού βραχυκυκλώματος (με διακεκομμένη γραμμή τη μετρούμενη και θεωρητική αντίσταση αντίστοιχα), του σχήματος 8b, σε σύγκριση με το θεωρητικό γράφημα που υπολογίστηκε από τη θεωρία της Παραγράφου 2 λαμβάνοντας υπόψη τον εξαρτημένο χαρακτήρα της συχνότητας των  $B_c$  και  $G$ . Πρέπει να σημειωθεί ότι προς το παρόν δεν υπάρχει κάποια διαθέσιμη μέθοδος για τον υπολογισμό της τιμής της χωρητικότητας σύζευξης μεταξύ των άκρων του patch, και έγινε δεκτή μια υποθετική τιμή βάσει εκείνης που απαιτείται για να προκύψει η υπολογισμένη διαφορά συχνότητας μεταξύ των συντονισμών  $B_{r1}$  και  $B_{r3}$ . Υπάρχει συμφωνία ως προς το γενικό σχήμα των καμπύλων εμπέδησης, ωστόσο για την υπολογισμένη εμπέδηση της κεραίας υφίσταται μια μετατόπιση προς την επαγωγική πλευρά του διαγράμματος Smith. Αυτή η επίδραση προκύπτει για όλες τις κεραίες με patch μικροταινίας και έχει συσχετιστεί με τη διέγερση των τρόπων λειτουργίας υψηλής τάξης οι οποίοι παρέχουν στην υπολογισμένη εμπέδηση εισόδου μια επαγωγική αντίσταση σε σειρά.



Σχήμα 10: Διάγραμμα σύνθετης αντίστασης κεραίας διπλού βραχυκυκλώματος

Πίνακας 4:  $Q_0$  - Εύρος ζώνης κεραιών microstrip με και χωρίς παρασιτικά στοιχεία

Antenna	Driven patch Dimensions,	$Q_0$ - Bandwidth	Bandwidth Ratio
Isolated short circuit	64 X 35	22.5	)
Short circuit with parasitic	64 X 32	54	) 2-40:1
Isolated open circuit	64 X 72	26	)
Open circuit with two parasitics	64 X 64	55	) 2-12:1



Σχήμα 11: Απόδοση πολωμένης παρασιτικής κεραίας

Στο σχήμα 11 απεικονίζεται η απόδοση πολωμένης παρασιτικής κεραίας. Ειδικότερα σε πολλές εφαρμογές απαιτείται η χρήση μιας κεραίας κυκλικής πόλωσης και με την κεραία που

παρουσιάζεται στο σχήμα 11(a) εξετάζεται η πιθανότητα να εφαρμοστεί αυτή η τεχνική βελτίωσης του εύρους ζώνης σε τέτοιες κεραίες. Αυτή η κεραία έχει συμμετρικό περίγραμμα και επομένως μπορεί να κατασκευαστεί ώστε να υποστηρίζει δύο τρόπους λειτουργίας όπως εκείνους του patch ανοικτού κυκλώματος  $\lambda_m/2$  με δύο παρασιτικά στοιχεία, όπου το καθένα εξ αυτών είναι προσανατολισμένο κατά μήκος κάθε άξονα. Η κυκλική πόλωση δημιουργείται μέσω της εξίσου διέγερσης των δύο τρόπων λειτουργίας, τοποθετώντας μια τροφοδοσία διαγώνια στο κεντρικό patch και αποσυντονίζοντας ελαφρώς έναν από τους τρόπους λειτουργίας με τη χρήση της κεντρικής οπής η οποία δρα ως επαγωγική φόρτιση μόνο σε έναν τρόπο λειτουργίας. Η παράμετρος του στοιχείου αυτού του είδους που είναι ευαίσθητη στη συχνότητα είναι η αξονική ελλειπτικότητα, και το αποτέλεσμα που προκύπτει από αυτήν την κεραία συγκρίνεται στο σχήμα 11(b) με το αποτέλεσμα ενός απομονωμένου patch στο ίδιο υπόστρωμα ενώ η κυκλική πόλωση προκύπτει κατά τον ίδιο τρόπο. Όπως συμβαίνει με το εύρος ζώνης v.s.w.r. των κεραίων γραμμικής πόλωσης, έτσι διπλασιάζεται κατά προσέγγιση και το εύρος ζώνης της ελλειπτικότητας 3 dB. Σε αυτή την περίπτωση βρέθηκε ότι τα πολικά διαγράμματα της παρασιτικής κεραίας ήταν ελαφρώς διαφορετικά λόγω των μικρότερων διαστάσεων του κεντρικού patch σε σύγκριση με εκείνες του απομονωμένου στοιχείου, ενώ το εύρος δέσμης αυξάνεται από 73° σε 84°. Προέκυψε επίσης απώλεια απολαβής ~ 0.5 dB λόγω της ελάττωσης της κατευθυντικότητας η οποία συσχετίζεται με αυτήν την αλλαγή μοτίβου.

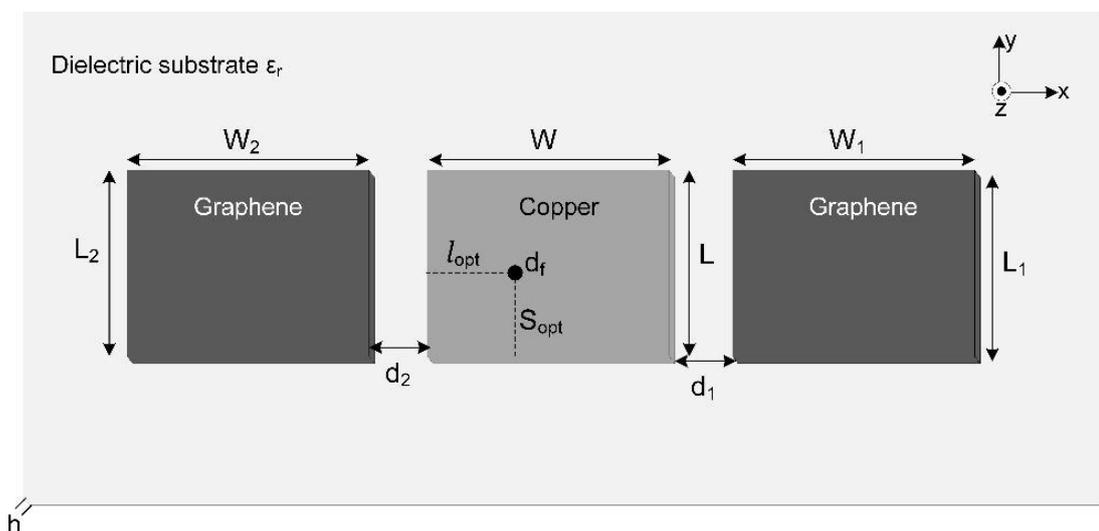
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4 Σχεδίαση patch κεραίας με παρασιτικά στοιχεία γραφενίου και αποτελέσματα προσομοίωσης.

#### 4.1 Εισαγωγή

Η χρήση του γραφενίου έχει πάρα πολλά πλεονεκτήματα και για αυτό το χρησιμοποιούμε. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναλύουμε την επίδραση των παρασιτικών στοιχείων γραφενίου και εξετάζουμε την επίδρασή τους στη διάταξη. Εμείς σχεδιάσαμε την κεραία μας με διαστάσεις χαλκού και μετά κάναμε optimization / βελτιστοποίηση. Αρχικά σχεδιάσαμε την κεραία σαν να ήταν μια κοινή χάλκινη κεραία, όπου τόσο τα παρασιτικά όσο και το ενεργό στοιχείο ήταν χαλκός και μετά με τη βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων βελτιστοποιήσαμε τις διαστάσεις έτσι ώστε να μπορέσουμε να ικανοποιήσουμε κάποια standards όπως είναι η συχνότητα συντονισμού και η σύνθετη αντίσταση. Στο σχήμα 12 παρατηρούμε τη διάταξη της κεραίας γραφενίου, όπου τα φανταστικά στοιχεία βρίσκονται αριστερά και δεξιά του ενεργού στοιχείου με διαστάσεις  $W_1-L_1$ ,  $W_2-L_2$  και  $W-L$  αντίστοιχα. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ως εξής: παρασιτικό υλικό γραφενίου 1, παρασιτικό υλικό γραφενίου 2 και χαλκός. Το ενεργό στοιχείο, δηλαδή το μεσαίο patch –είναι από χαλκό , ενώ η τροφοδοσία του είναι τύπου ακίδας.

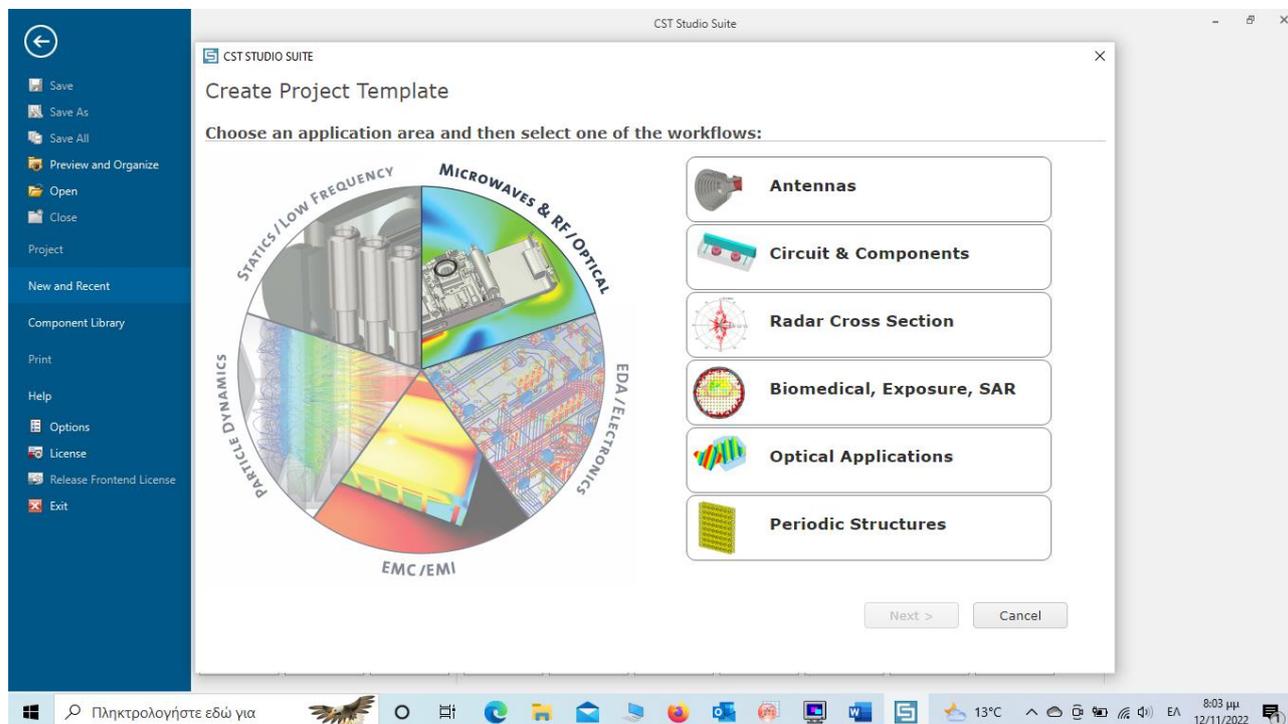
Η γεωμετρία της κεραίας που μελετήσαμε απεικονίζεται στο σχήμα 12 και η δομή αποτελείται από ένα ενεργό στοιχείο και δύο παρασιτικά.



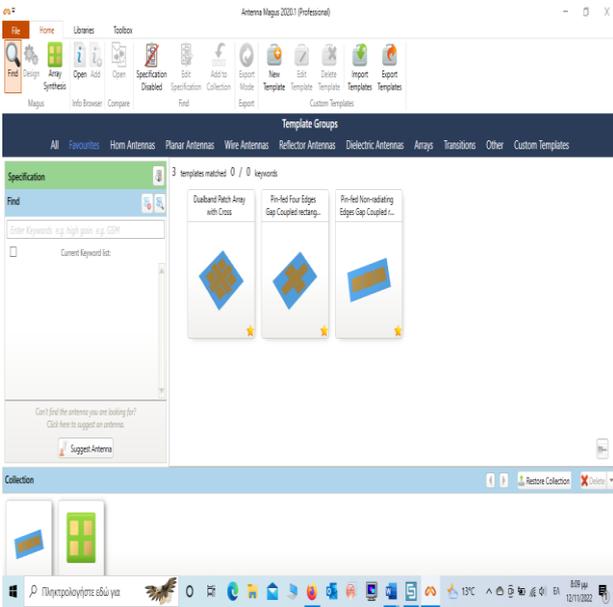
Σχήμα 12: Διάταξη κεραίας γραφενίου

## 4.2 Πρόγραμμα σχεδίασης/προσομοίωσης CST Studio Suite 2000 & Antenna Magus

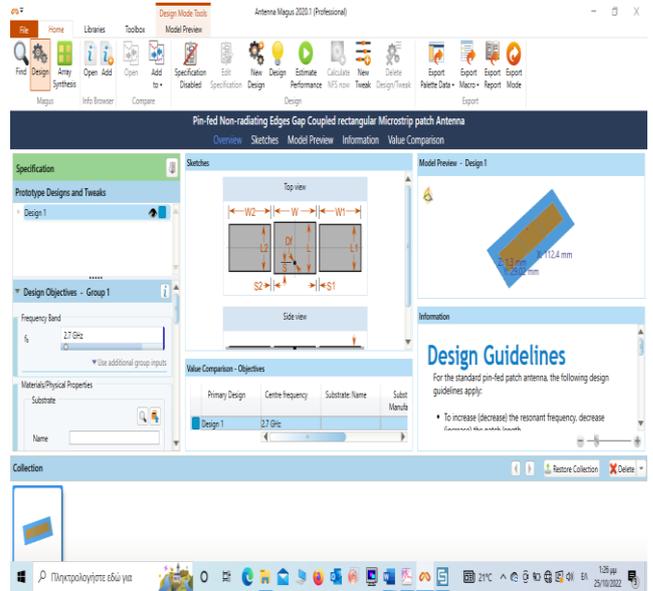
Τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για τη σχεδίαση και προσομοίωση των 43 πρωτοτύπων patch κεραίας με παρασιτικά στοιχεία γραφενίου είναι τα **CST Studio Suite 2000 & Antenna Magus**, ενώ η επεξεργασία των δεδομένων που προέκυψαν έγινε με τη χρήση του **Origin 2021**.



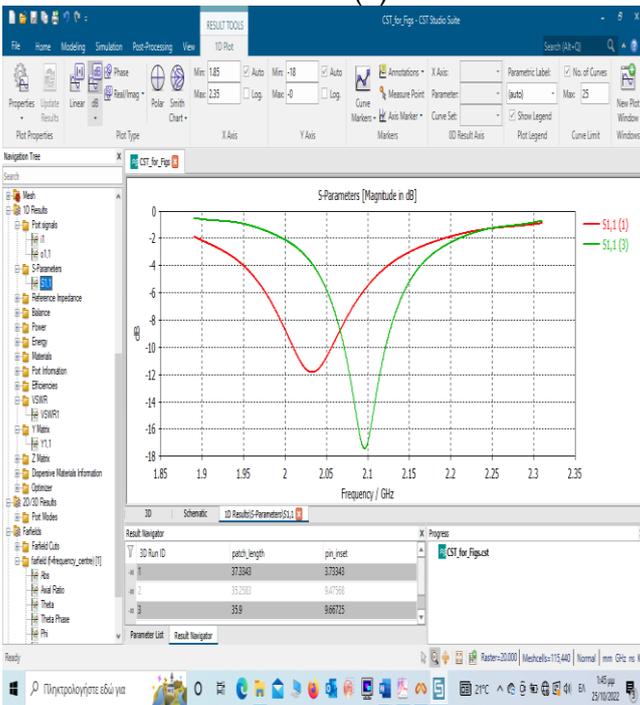
Το πρόγραμμα CST είναι ένα πρόγραμμα σχεδίασης/προσομοίωσης ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών και περιλαμβάνει ένα πλούσιο πακέτο εργαλείων σχεδίασης και βελτιστοποίησης κεραιών (και όχι μόνο) που λειτουργούν σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Με τη χρήση του CST και του Antenna Magus αφού ορίσουμε μια σειρά από χαρακτηριστικά θα μπορέσουμε να προσομοιώσουμε και να εξάγουμε συμπεράσματα για τη λειτουργία της patch κεραίας με παρασιτικά στοιχεία γραφενίου.



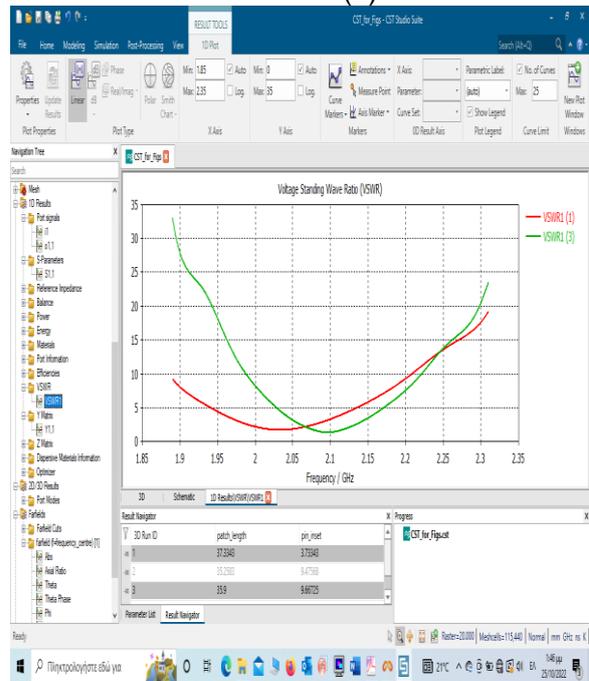
(1)



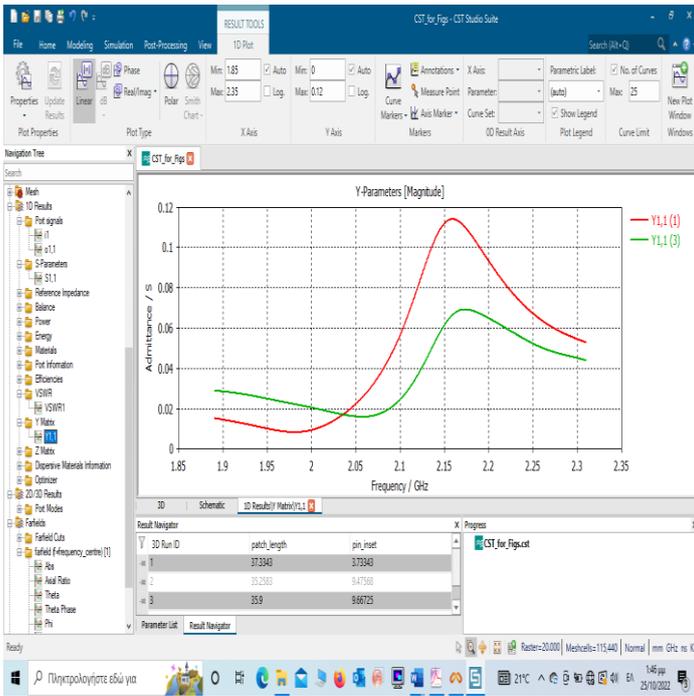
(2)



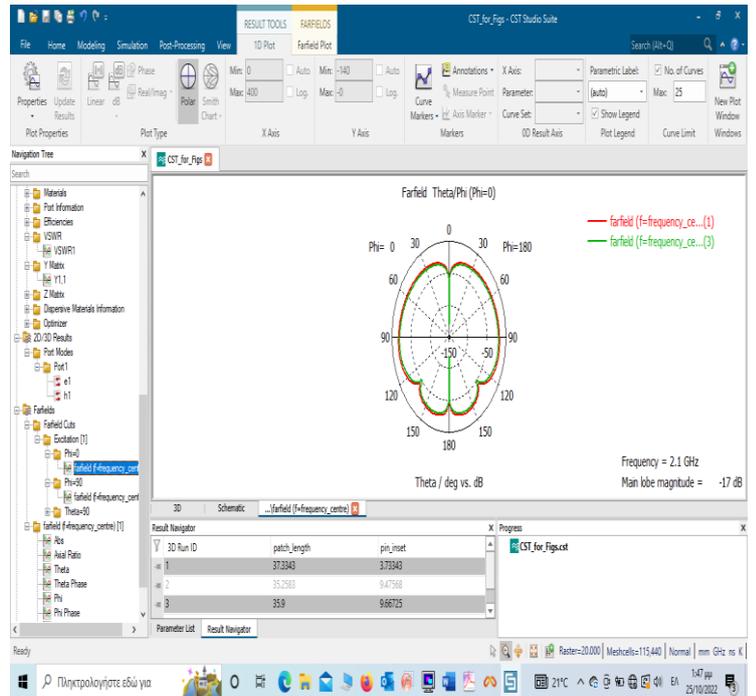
(3)



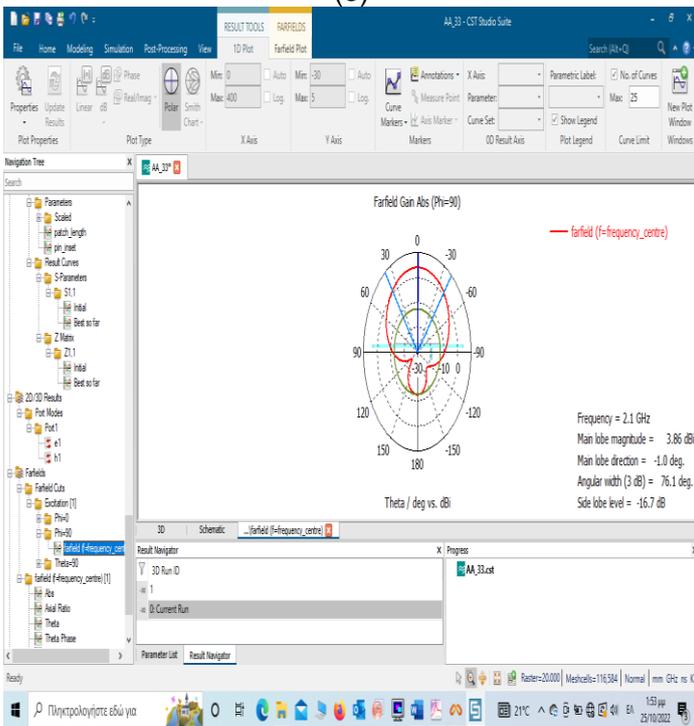
(4)



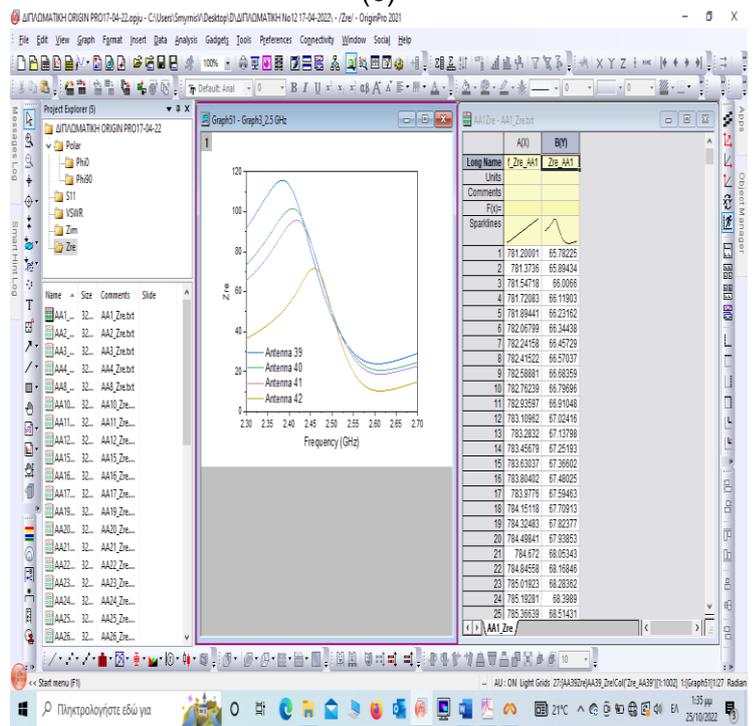
(5)



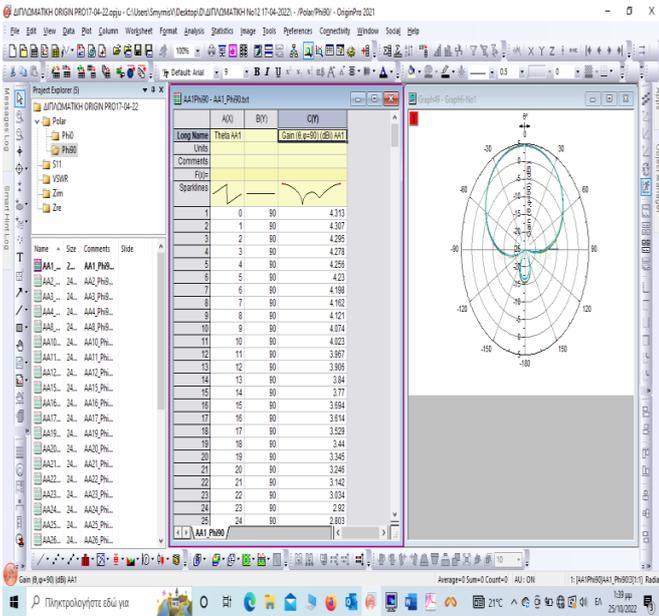
(6)



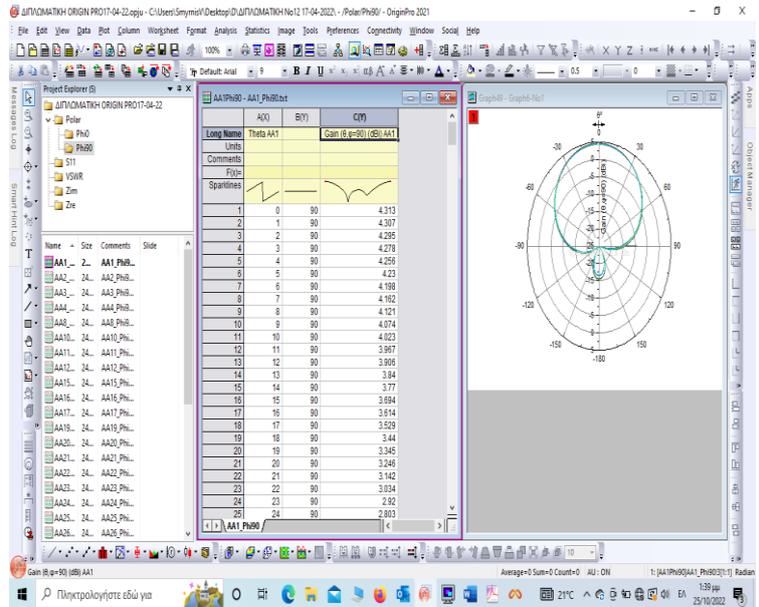
(7)



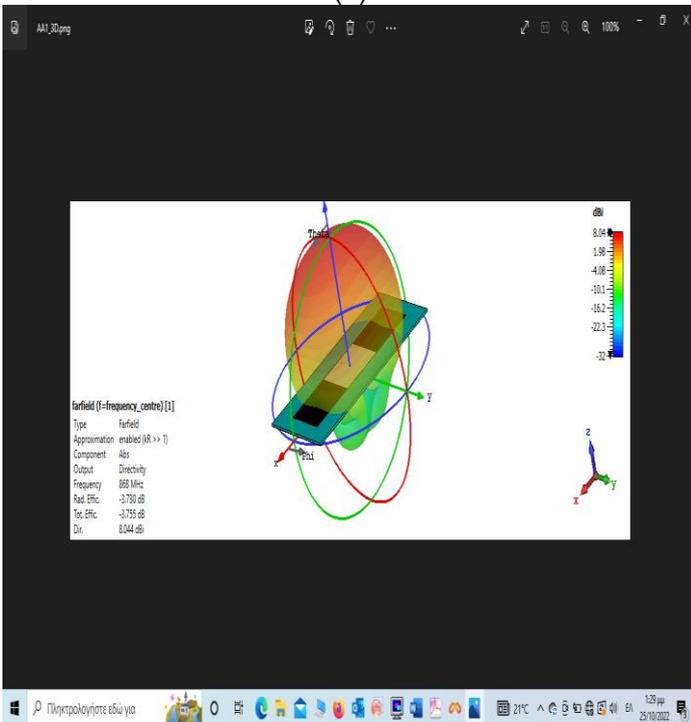
(8)



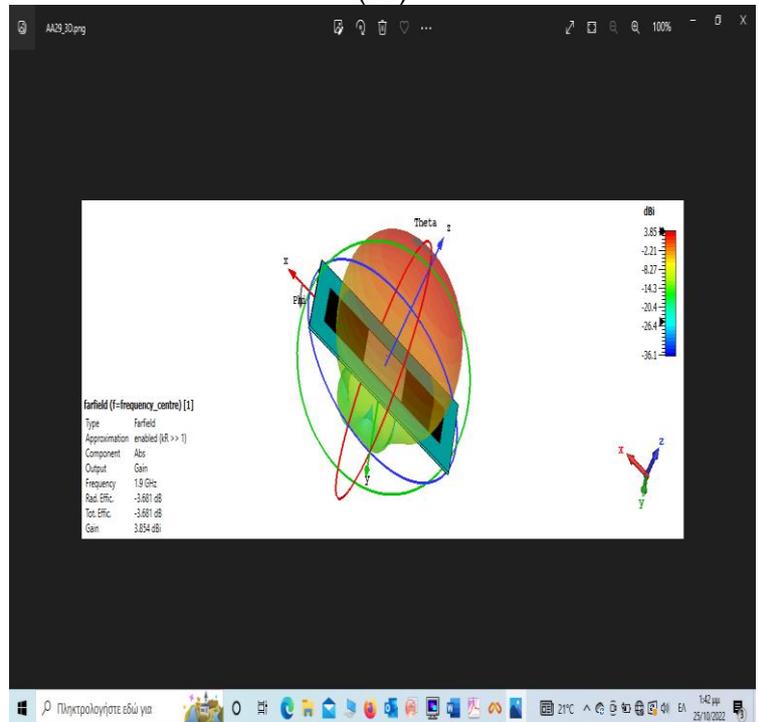
(9)



(10)



(11)



(12)

### 4.3 Πίνακας γεωμετρικών χαρακτηριστικών προσομοίωσης patch

Όπως μπορούμε να δούμε παρακάτω, σχεδιάστηκαν - προσομοιώθηκαν και βελτιστοποιήθηκαν 30 μοντέλα κεραιάς με χαρακτηριστικά και διαστάσεις σύμφωνα με τα ηλεκτρικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πίνακα 5.

Για παράδειγμα αναλύοντας το πρωτότυπο A/A\_1 και σύμφωνα με τη γεωμετρική δομή του σχήματος 12, η σχεδίαση της ορθογώνιας κεραιάς μας έχει τα παρακάτω γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Από τις βασικές παραμέτρους για την ορθή σχεδίαση της κεραιάς είναι οι μεταβλητές  $L_{opt}$  (ρην τροφοδοσίας / απόσταση από το κάτω μέρος, βλέπε σχήμα 12) και  $S_{opt}$



(απόσταση δεξιά-αριστερά, βλέπε σχήμα 12). Ουσιαστικά υποδεικνύουν τις συντεταγμένες  $x$  &  $y$  του  $pin$  τροφοδοσίας.

Γεωμετρικά & ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πρωτοτύπου A/A\_1:

Πάχος  $h=5$  mm, πλάτος  $W_1=151.460$  mm, μήκος  $L_1=124.764$  mm, πλάτος  $W_2=151.460$  mm, μήκος  $L_2=124.764$  mm, πλάτος  $W=151.460$  mm, διηλεκτρική σταθερά υποστρώματος  $\epsilon_r=1.6$ .

Πίνακας 5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσομοίωσης patch

A/A	f (MHz)	$\epsilon_r$	h (mm)	$L_{opt}(mm)$	W(mm)	$S_{opt}(mm)$	D <sub>1</sub> (mm)	$L_1(mm)$	W <sub>1</sub> (mm)	d <sub>1</sub> (S1)(mm)	$L_2(mm)$	W <sub>2</sub> (mm)	d <sub>2</sub> (S2)(mm)
1	868	1.6	5.000	12.573	151.460	2.101	1.727	124.764	151.460	1.164	124.764	151.460	1.164
2	868	2	5.000	11.313	141.002	1.888	1.727	112.100	141.002	1.293	112.100	141.002	1.293
3	868	3.5	4.000	8.676	115.128	2.195	1.727	85.760	115.128	2.145	77.184	115.128	2.145
4	900	1.6	5.000	12.094	146.075	2.375	1.666	120.186	146.075	1.163	120.186	146.075	1.163
8	1000	1.6	5.000	108.254	131.468	20.972	1.499	107.766	131.468	1.162	107.766	131.468	1.162
10	1000	3.5	3.000	75.600	99.931	16.982	1.499	74.613	99.931	1.614	74.613	99.931	1.614
11	1200	1.5	4.000	93.043	111.726	18.303	1.249	92.736	111.726	0.902	92.736	111.726	0.902
12	1200	1.6	3.500	90.711	109.556	18.520	1.249	90.338	109.556	0.815	90.338	109.556	0.815
15	1400	1.5	3.500	79.946	95.765	15.322	1.071	79.426	95.765	0.789	79.426	95.765	0.789
16	1400	1.6	2.900	77.894	93.905	15.812	1.071	77.512	93.905	0.675	77.512	93.905	0.675
17	1400	2	3.000	69.981	87.421	14.385	1.071	69.566	87.421	0.776	69.566	87.421	0.776
19	1500	1.5	3.400	74.323	89.381	14.213	0.999	74.016	89.381	0.766	74.016	89.381	0.766
20	1500	1.6	3.200	72.422	87.645	14.112	0.999	71.952	87.645	0.744	71.952	87.645	0.744
21	1500	2	2.800	65.364	81.593	13.350	0.999	64.928	81.593	0.725	64.928	81.593	0.725
22	1500	3.5	2.200	50.247	66.621	11.294	0.999	49.670	66.621	1.181	49.670	66.621	1.181
23	1700	1.5	3.200	65.364	78.865	12.233	0.882	65.136	78.865	0.721	65.136	78.865	0.721
24	1700	1.6	3.000	63.664	77.334	12.268	0.882	63.344	77.334	0.697	63.344	77.334	0.697
25	1700	2	2.600	57.541	71.994	11.667	0.882	57.207	71.994	0.672	57.207	71.994	0.672
26	1700	3.5	2.000	44.280	58.783	10.008	0.882	43.804	58.783	1.073	43.804	58.783	1.073
27	1900	1.5	3.000	58.642	70.564	11.094	0.789	58.160	70.564	0.675	58.160	70.564	0.675
28	1900	1.6	2.800	56.867	69.194	10.794	0.789	56.583	69.194	0.650	56.583	69.194	0.650
29	1900	2	2.400	51.431	64.416	10.358	0.789	51.138	64.416	0.620	51.138	64.416	0.620
30	1900	3.5	1.800	40.113	52.595	8.696	0.789	39.189	52.595	0.966	39.189	52.595	0.966
33	2100	2	2.200	46.511	58.281	9.34026	0.714	46.249	58.281	0.568	46.249	58.281	0.568
36	2300	1.6	2.100	47.358	57.160	5.4322	0.652	46.915	57.160	0.488	46.915	57.160	0.488
37	2300	2	2.000	42.470	53.213	8.49826	0.652	42.233	53.213	0.517	42.233	53.213	0.517
39	2500	1.5	2.000	44.723	53.629	8.524	0.600	44.444	53.629	0.451	44.444	53.629	0.451
40	2500	1.6	1.800	43.447	52.587	8.6726	0.600	43.267	52.587	0.419	43.267	52.587	0.419
41	2500	2	1.700	39.184	48.956	7.983	0.600	38.944	48.956	0.440	38.944	48.956	0.440
42	2500	3.5	1.200	30.232	39.972	6.90228	0.600	29.845	39.972	0.646	29.845	39.972	0.646

#### 4.4 Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοίωσης & χαρακτηριστικών των patch

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αναλυτικά τα δεδομένα που προέκυψαν από την προσομοίωση των πρωτοτύπων με τη χρήση των προγραμμάτων προσομοίωσης CST & Antenna Magus, όπως το εύρος, το πραγματικό & το φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης και το κέρδος των κεραιών ενώ στις επόμενες παραγράφους με τη χρήση του προγράμματος ανάλυσης

και απεικόνισης Origin Pro δίνεται η γραφική ταυτότητα των εν λόγω δεδομένων από τις οποίες προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα, τα οποία και θα σχολιάσουμε παρακάτω.

Πίνακας 6: Αποτελέσματα προσομοίωσης & χαρακτηριστικών των patch

A/A	$f_c$ (MHz)	$f_{c1}$ (MHz)	$f_{c2}$ (MHz)	S11 (dB)	BW (MHz)	VSWR @ $f_c$	Re(Z) ( $\Omega$ ) @ $f_c$	Im(Z) $\Omega$ @ $f_c$	Realized Gain (dBi) @ $f_c$	Directivity (dBi) @ $f_c$
1	867.830	848.350	888.090	-22.469	39.740	1.163	50.818	-7.549	4.290	8.040
2	867.830	849.180	887.350	-21.861	38.170	1.175	50.429	-8.105	3.810	7.560
3	869.220	857.450	881.200	-26.365	23.750	1.101	47.439	3.982	2.500	6.490
4	898.740	879.110	919.240	-40.136	40.130	1.019	49.136	-0.980	4.330	8.030
8	1000.200	976.170	1025.200	-57.189	49.030	1.002	49.754	-0.050	4.370	8.020
10	1000.000	986.520	1013.800	-40.754	27.280	1.018	50.215	-0.863	2.310	6.550
11	1200.500	1173.000	1229.500	-47.819	56.500	1.008	49.792	0.397	4.470	8.160
12	1200.200	1175.700	1225.900	-49.653	50.200	1.006	49.876	0.328	4.300	8.030
15	1397.200	1364.200	1431.800	-42.911	67.600	1.014	49.779	-0.705	4.480	8.170
16	1399.700	1371.800	1428.800	-50.254	57.000	1.006	49.959	-0.293	4.280	8.030
17	1400.300	1372.100	1429.500	-55.701	57.400	1.003	49.772	0.131	3.830	7.540
19	1500.000	1463.600	1538.700	-57.639	75.100	1.002	50.005	0.001	4.500	8.160
20	1497.300	1463.400	1533.900	-44.815	70.500	1.011	50.011	-0.555	4.350	8.030
21	1499.400	1469.500	1530.600	-54.654	61.100	1.003	49.887	0.184	3.820	7.550
22	1499.700	1478.200	1522.400	-44.004	44.200	1.012	50.336	-0.435	4.380	6.520
23	1703.700	1660.300	1750.900	-46.233	90.600	1.009	50.023	0.464	4.530	8.150
24	1699.700	1659.100	1743.100	-62.443	84.000	1.001	49.779	0.013	4.380	8.020
25	1700.000	1664.500	1737.300	-58.755	72.800	1.002	49.981	-0.027	3.850	7.540
26	1700.000	1675.000	1726.200	-53.221	51.200	1.004	50.112	-0.061	2.330	6.500
27	1900.400	1850.800	1952.700	-58.702	101.900	1.002	49.759	0.067	4.670	8.170
28	1900.400	1852.300	1951.000	-57.803	98.700	1.002	49.745	0.035	4.400	8.020
29	1900.000	1858.000	1945.300	-57.526	87.300	1.002	50.001	-0.003	3.850	7.540
30	1895.800	1868.500	1924.800	-33.152	56.300	1.044	48.977	1.979	2.310	6.500
33	2100.400	2054.600	2148.000	-56.987	93.400	1.002	49.758	-0.045	3.860	7.530
36	2305.500	2249.700	2363.800	-16.979	114.100	1.329	46.940	-13.525	4.260	8.050
37	2300.500	2250.700	2352.900	-51.990	102.200	1.005	49.959	-0.241	3.860	7.530
39	2495.500	2435.700	2558.800	-44.668	123.100	1.011	49.923	-0.578	4.490	8.170
40	2500.500	2446.500	2556.800	-62.199	110.300	1.001	49.843	-0.073	4.330	8.030
41	2500.000	2449.500	2552.500	-55.776	103.000	1.003	49.890	-0.160	3.830	7.550
42	2500.000	2476.100	2534.400	-52.920	58.300	1.004	50.003	0.190	2.320	6.550

#### 4.5 Διαγράμματα $Z_{re}$ συναρτήσει της συχνότητας – Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στα διαγράμματα  $Z_{re}$  το ενδιαφέρον μας εστιάζεται στην πραγματική τιμή της σύνθετης αντίστασης  $Re(Z)$  και στην τιμή της συχνότητας  $f_c$  όπου εμφανίζεται κάθε φορά η μετρούμενη τιμή της σύνθετης αντίστασης.

Ειδικότερα το πραγματικό μέρος θα πρέπει να έχει ιδανικά μια τιμή στα  $50\Omega \pm 1\Omega$ . Η εν λόγω παράμετρος έχει να κάνει με το pin τροφοδοσίας της κεραίας μας.

Στο γράφημα του σχήματος 13(α) , στον  $y$  άξονα απεικονίζεται το πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης των κεραιών No1 έως No4 ενώ στον άξονα  $x$  έχουμε τη συχνότητα  $f_c$ . Αναλυτικότερα για τις κεραιές No1, No2, No3 & No4 η διαδικασία της προσομοίωσης μας έδωσε τα παρακάτω δεδομένα:

Κεραία No1: Πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Re(z)= 50,818 \Omega$  ( $f_c= 867,830$  MHz)

Κεραία No2: Πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Re(z)= 50,429 \Omega$  ( $f_c= 867,830$  MHz)

Κεραία No3: Πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Re(z)= 47,439 \Omega$  ( $f_c= 869,220$  MHz)

Κεραία No4: Πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Re(z)= 49,136 \Omega$  ( $f_c= 898,740$  MHz)

Στην κεραία No3 παρατηρούμε μία απόκλιση του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης, τιμή η οποία σαφώς αποκλίνει από την επιθυμητή τιμή των 50Ω.

Με βάση λοιπόν τα γραφήματα του σχήματος 13(α) παρατηρούμε ότι οι κεραιές No1, No2 & No4 εμφανίζουν την καλύτερη συμπεριφορά ως προς το πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης, ενώ η μικροαπόκλιση που παρατηρούμε μεταξύ τους, είναι εξαιτίας του αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

Ακολουθώντας το σκεπτικό αυτό και για τις περιπτώσεις των γραφημάτων των σχημάτων 13(β), 13(γ), 13(δ) και 13(ε) παρατηρούμε ότι:

Για το γράφημα του σχήματος 13(β) όλες οι κεραιές (No15, No16 & No17) εμφανίζουν καλή συμπεριφορά ως προς το πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης αφού η διαδικασία της προσομοίωσης μας έδωσε τα παρακάτω δεδομένα:

Κεραία No15: Πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Re(z)= 49,779 \Omega$  ( $f_c= 1397,200$  MHz)

Κεραία No16: Πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Re(z)= 49,959 \Omega$  ( $f_c= 1399,700$  MHz)

Κεραία No17: Πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Re(z)= 49,772 \Omega$  ( $f_c= 1400,300$  MHz)

Για το γράφημα του σχήματος 13(γ) όλες οι κεραιές (No19, No20, No21 & No22) εμφανίζουν καλή συμπεριφορά ως προς το πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης αφού η διαδικασία της προσομοίωσης μας έδωσε τα παρακάτω δεδομένα:

Κεραία No19: Πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Re(z)= 50,005 \Omega$  ( $f_c= 1500,000$  MHz)

Κεραία No20: Πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Re(z)= 50,011 \Omega$  ( $f_c= 1497,300$  MHz)

Κεραία No21: Πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Re(z)= 49,887 \Omega$  ( $f_c= 1499,400$  MHz)

Κεραία No22: Πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Re(z)= 50,336 \Omega$  ( $f_c= 1499,700$  MHz)

Στο γράφημα του σχήματος 13(δ) , οι κεραιές (No27, No28 & No29) εμφανίζουν καλή συμπεριφορά ως προς το πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης ενώ στην κεραία No30 παρατηρούμε μία απόκλιση του πραγματικού μέρους της σύνθετης αντίστασης, τιμή η οποία αποκλίνει από την επιθυμητή τιμή των 50Ω. Η διαδικασία της προσομοίωσης μας έδωσε τα παρακάτω δεδομένα:

Κεραία No27: Πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Re(z)= 49,759 \Omega$  ( $f_c= 1900,400$  MHz)

Κεραία No28: Πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Re(z)= 49,745 \Omega$  ( $f_c= 1900,400$  MHz)

Κεραία No29: Πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Re(z)= 50,001 \Omega$  ( $f_c= 1900,000$  MHz)

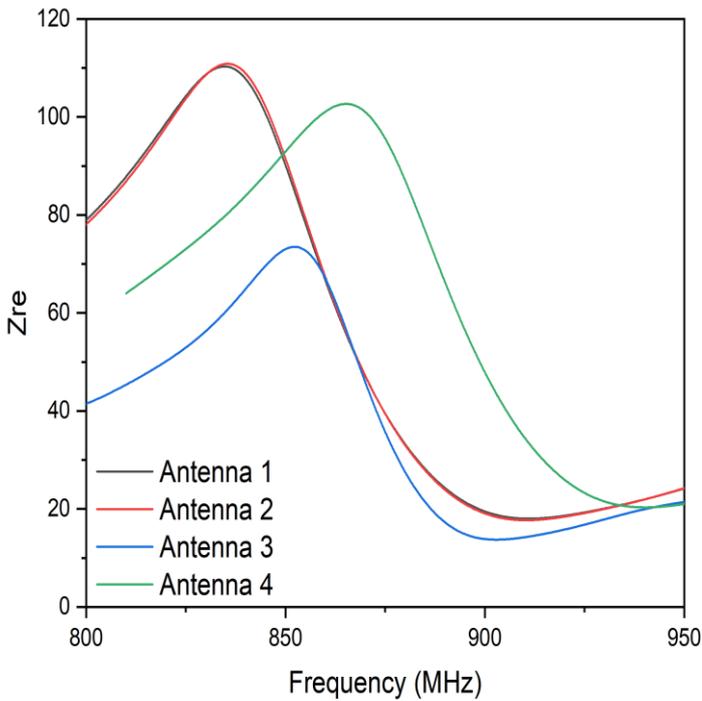
Κεραία No30: Πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $\text{Re}(z) = 48,977 \Omega$  ( $f_c = 1895,800 \text{ MHz}$ )  
 Τέλος για το γράφημα του σχήματος 13(ε) όλες οι κεραίες (No39, No40, No41 & No42) εμφανίζουν καλή συμπεριφορά ως προς το πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης αφού η διαδικασία της προσομοίωσης μας έδωσε τα παρακάτω δεδομένα:

Κεραία No39: Πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $\text{Re}(z) = 49,923 \Omega$  ( $f_c = 2495,500 \text{ MHz}$ )

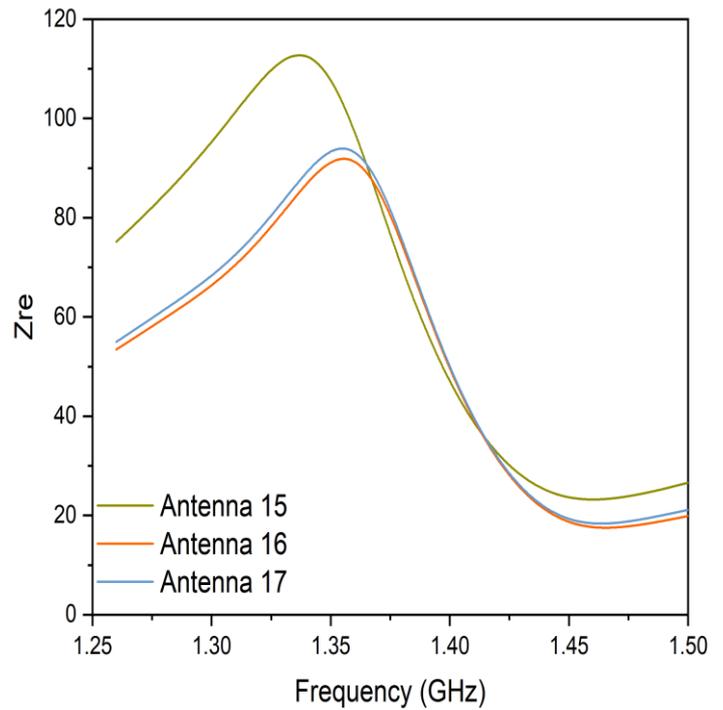
Κεραία No40: Πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $\text{Re}(z) = 49,843 \Omega$  ( $f_c = 2500,500 \text{ MHz}$ )

Κεραία No41: Πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $\text{Re}(z) = 49,890 \Omega$  ( $f_c = 2500,000 \text{ MHz}$ )

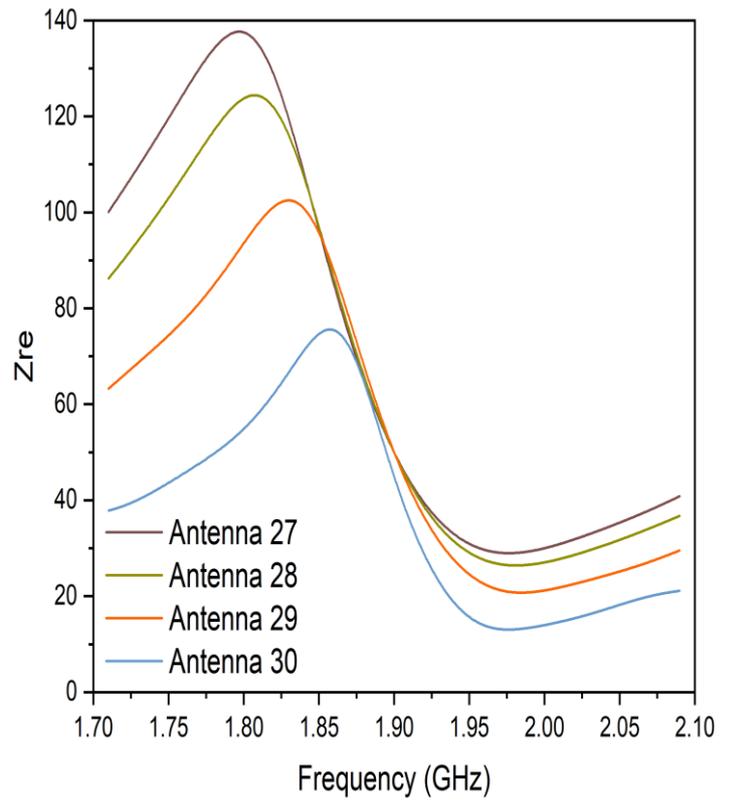
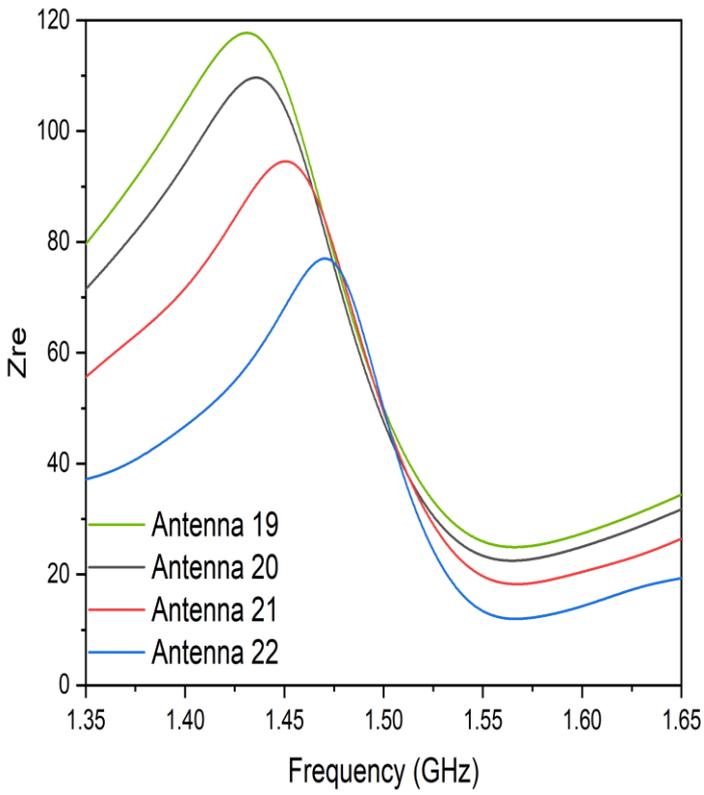
Κεραία No42: Πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $\text{Re}(z) = 50,003 \Omega$  ( $f_c = 2500,000 \text{ MHz}$ )



(α)



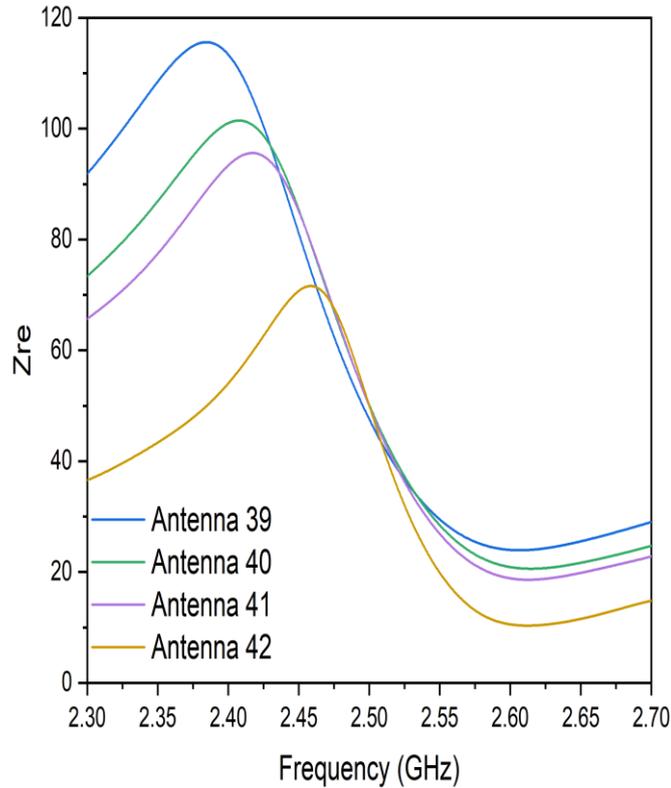
(β)



(γ)

(δ)

Σχήμα 13 (α,β,γ,δ): Z<sub>re</sub> συναρτήσει της συχνότητας για Antenna: (α) 1, 2,... (β) 15, 16,... (γ) 19, 20,... (δ) 27, 28,...



(ε)

Σχήμα 14 (ε): Z<sub>re</sub> συναρτήσει της συχνότητας για Antenna: (ε) 39, 40,...

#### 4.6 Διαγράμματα $Z_{im}$ συναρτήσει της συχνότητας – Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στα διαγράμματα  $Z_{im}$  το ενδιαφέρον μας εστιάζεται στο φανταστικό μέρος της τιμής της σύνθετης αντίστασης  $Im(Z)$  και στην τιμή της συχνότητας  $f_c$  όπου εμφανίζεται κάθε φορά η μετρούμενη τιμή της σύνθετης αντίστασης.

Ειδικότερα το φανταστικό μέρος θα πρέπει να έχει ιδανικά μια τιμή στα  $0\Omega \pm 0,1\Omega$ .

Στο γράφημα του σχήματος 14(α) , στον  $y$  άξονα απεικονίζεται το φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης των κεραιών No1 έως No4 ενώ στον άξονα  $x$  έχουμε τη συχνότητα  $f_c$ . Αναλυτικότερα για τις κεραιές No1, No2, No3 & No4 η διαδικασία της προσομοίωσης μας έδωσε τα παρακάτω δεδομένα:

Κεραία No1: Φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Im(z) = -7,549 \Omega$  ( $f_c = 867,830$  MHz)

Κεραία No2: Φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Im(z) = -8,105 \Omega$  ( $f_c = 867,830$  MHz)

Κεραία No3: Φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Im(z) = 3,982 \Omega$  ( $f_c = 869,220$  MHz)

Κεραία No4: Φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Im(z) = -0,980 \Omega$  ( $f_c = 898,740$  MHz)

Παρατηρούμε ότι το σύνολο των κεραιών No1 έως No4 εμφανίζουν μεγάλη απόκλιση ως προς το φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης σε σχέση με την ιδανική τιμή (στόχο) των  $0 \Omega$ .

Ακολουθώντας το σκεπτικό αυτό και για τις περιπτώσεις των γραφημάτων των σχημάτων 14(β), 14(γ), 14(δ) και 14(ε) παρατηρούμε ότι:

Για το γράφημα του σχήματος 14(β) όλες οι κεραιές (No15, No16 & No17) εμφανίζουν κακή συμπεριφορά ως προς το φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης αφού η διαδικασία της προσομοίωσης μας έδωσε τα παρακάτω δεδομένα:

Κεραία No15: Φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Im(z) = -0,705 \Omega$  ( $f_c = 1397,200$  MHz)

Κεραία No16: Φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Im(z) = -0,293 \Omega$  ( $f_c = 1399,700$  MHz)

Κεραία No17: Φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Im(z) = 0,131 \Omega$  ( $f_c = 1400,300$  MHz)

Για το γράφημα του σχήματος 14(γ) η κεραία No19 εμφανίζει καλή συμπεριφορά ως προς το φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης ενώ οι κεραιές No20, No21 & No22 εμφανίζουν κακή συμπεριφορά αφού η διαδικασία της προσομοίωσης μας έδωσε τα παρακάτω δεδομένα:

Κεραία No19: Φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Im(z) = 0,001 \Omega$  ( $f_c = 1500,000$  MHz)

Κεραία No20: Φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Im(z) = -0,555 \Omega$  ( $f_c = 1497,300$  MHz)

Κεραία No21: Φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Im(z) = 0,184 \Omega$  ( $f_c = 1499,400$  MHz)

Κεραία No22: Φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $Im(z) = -0,435 \Omega$  ( $f_c = 1499,700$  MHz)

Στο γράφημα του σχήματος 14(δ) , οι κεραιές (No27, No28 & No29) εμφανίζουν καλή συμπεριφορά ως προς το φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης, ενώ στην κεραία No30

παρατηρούμε μία απόκλιση του φανταστικού μέρους της σύνθετης αντίστασης (από την τιμή στόχο των  $0 \Omega$ ), αφού διαδικασία της προσομοίωσης μας έδωσε τα παρακάτω δεδομένα:

Κεραία No27: Φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $\text{Im}(z) = 0,067 \Omega$  ( $f_c = 1900,400 \text{ MHz}$ )

Κεραία No28: Φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $\text{Im}(z) = 0,035 \Omega$  ( $f_c = 1900,400 \text{ MHz}$ )

Κεραία No29: Φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $\text{Im}(z) = -0,003 \Omega$  ( $f_c = 1900,000 \text{ MHz}$ )

Κεραία No30: Φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $\text{Im}(z) = 1,979 \Omega$  ( $f_c = 1895,800 \text{ MHz}$ )

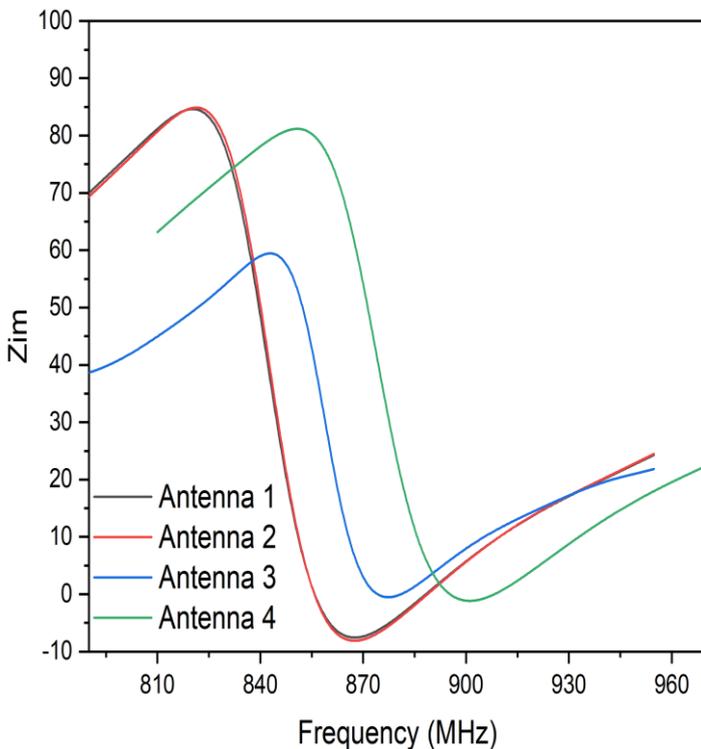
Τέλος για το γράφημα του σχήματος 14(ε) η κεραία No40 εμφανίζει καλή συμπεριφορά ως προς το φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης, ενώ οι κεραίες No39, No41 & No42 παρουσιάζουν απόκλιση από την τιμή στόχο των  $0 \Omega$  αφού η διαδικασία της προσομοίωσης μας έδωσε τα παρακάτω δεδομένα:

Κεραία No39: Φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $\text{Im}(z) = -0,578 \Omega$  ( $f_c = 2495,500 \text{ MHz}$ )

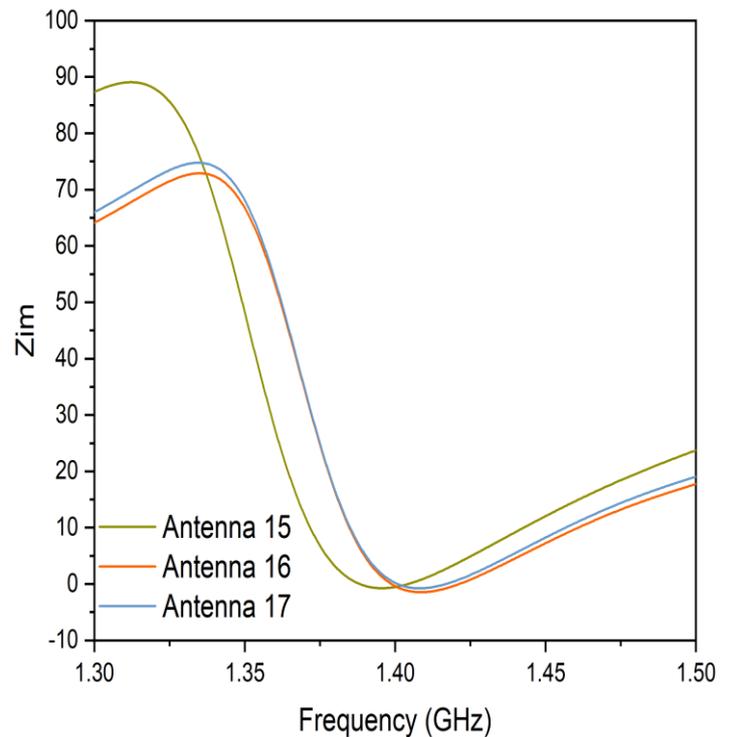
Κεραία No40: Φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $\text{Im}(z) = -0,073 \Omega$  ( $f_c = 2500,500 \text{ MHz}$ )

Κεραία No41: Φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $\text{Im}(z) = -0,160 \Omega$  ( $f_c = 2500,000 \text{ MHz}$ )

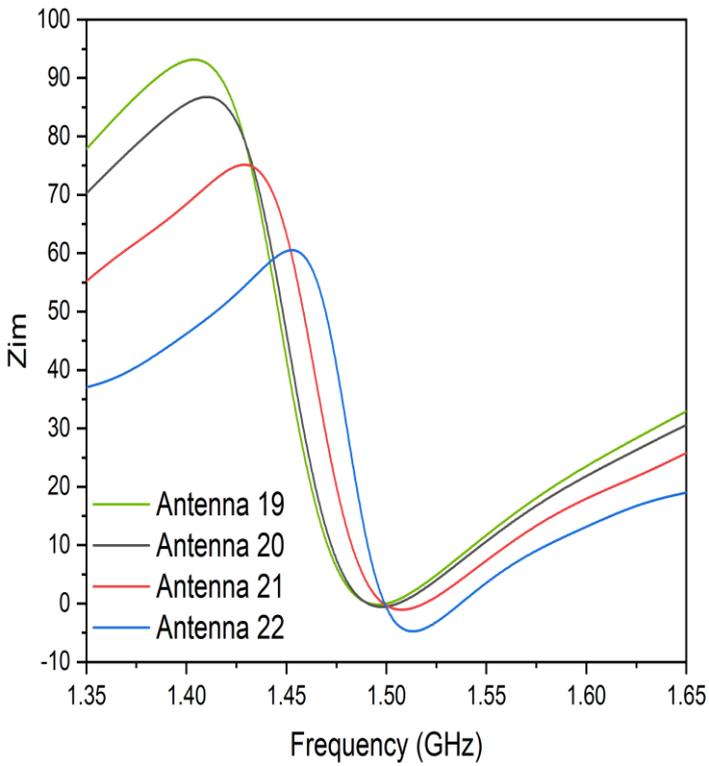
Κεραία No42: Φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης  $\text{Im}(z) = 0,190 \Omega$  ( $f_c = 2500,000 \text{ MHz}$ )



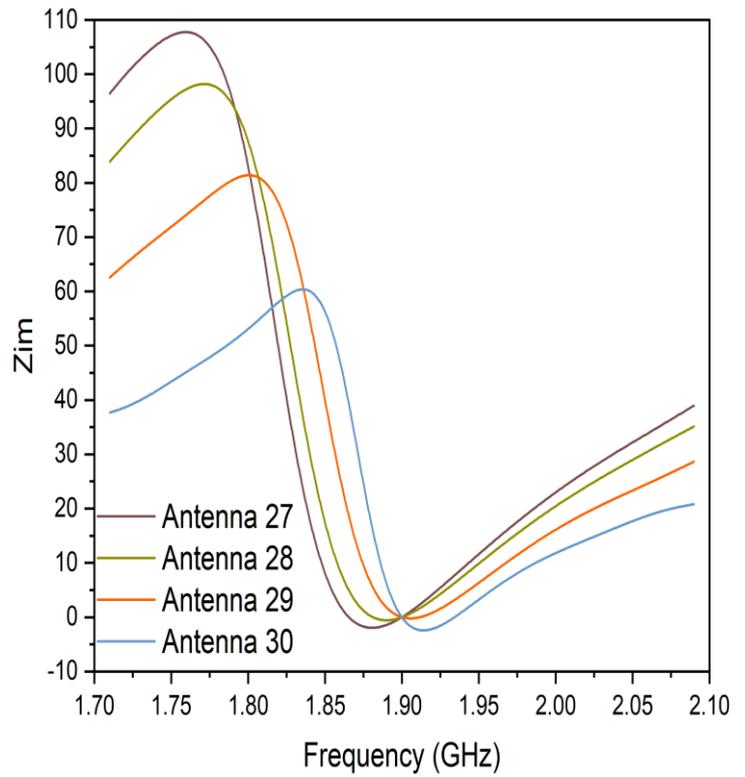
(α)



(β)

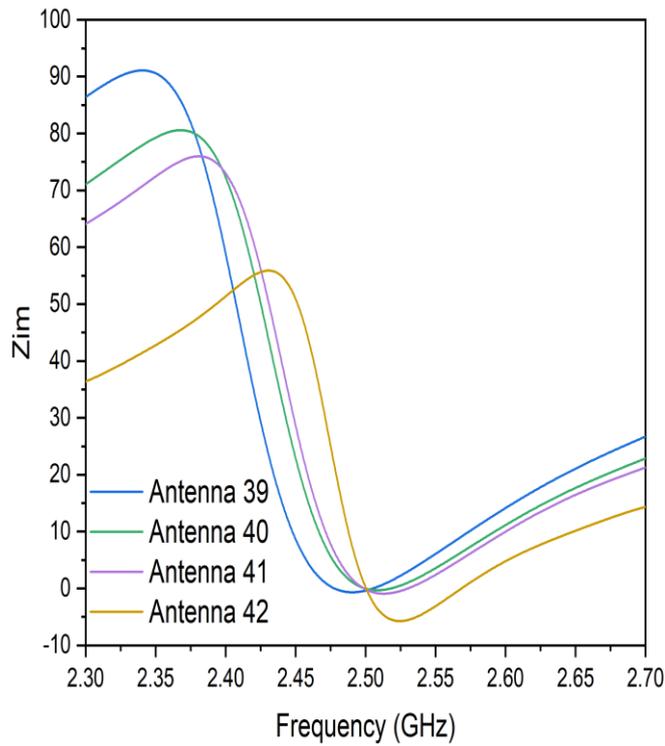


(γ)



(δ)

Σχήμα 15 (α,β,γ,δ): Zim συναρτήσεϊ της συχνότητας για Antenna: (α) 1, 2,... (β) 15, 16,... (γ) 19, 20,... (δ) 27, 28,...



(ε)

Σχήμα 16 (ε): Zim συναρτήσεϊ της συχνότητας για Antenna: (ε) 39, 40,...



## 4.7 Διαγράμματα VSWR συναρτήσει της συχνότητας - Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στα σχήματα 15 και 16 (παράγραφος 4.8) απεικονίζεται ο λόγος VSWR και η παράμετρος σκέδασης  $S_{11}$  των κεραιών αντίστοιχα. Τα διαγράμματα VSWR &  $S_{11}$  θα τα εξετάσουμε / αναλύσουμε σε συνδυασμό μεταξύ τους διότι το ενδιαφέρον μας εστιάζεται στην αλληλεξάρτηση που υπάρχει μεταξύ των δύο μεγεθών .

Ειδικότερα ο λόγος VSWR θα πρέπει να έχει ιδανικά μια τιμή κοντά στη μονάδα ( $1 \pm 0,1$ ), ενώ για την παράμετρο σκέδασης ισχύει ότι όσο μικρότερη (-) είναι τόσο το καλύτερο. Όταν ο λόγος VSWR προσεγγίζει τη μονάδα τότε, ότι τροφοδοσία (watt) και να βάλουμε στην είσοδο της κεραίας, αυτά τα watt θα μετατραπούν σε ακτινοβολία, δηλαδή δε θα μας γυρίσει πίσω στο πομπό ενέργεια, οπότε θα έχουμε και την εμφάνιση στασίμων στη γραμμή μου. Γενικά να μπορέσουμε να πετύχουμε καλύτερες τιμές στασίμων ( $S_{11}$ ) θα πρέπει να προβούμε σε αλλαγές του σχεδιασμού της κεραίας μας, δεδομένου ότι στην περίπτωση μας μιλάμε για διαστάσεις mm.

Μελετώντας τα διαγράμματα VSWR και  $S_{11}$  των σχημάτων 15 & 16 αντίστοιχα, λαμβάνουμε τα παρακάτω δεδομένα:

Για το γράφημα του σχήματος 15(α) & 16(α) έχουμε:

Κεραία No1: Λόγος VSWR = 1,163 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -22,469$  dB ( $f_c = 867,830$  MHz)

Κεραία No2: Λόγος VSWR = 1,175 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -21,861$  dB ( $f_c = 867,830$  MHz)

Κεραία No3: Λόγος VSWR = 1,101 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -26,365$  dB ( $f_c = 869,220$  MHz)

Κεραία No4: Λόγος VSWR = 1,019 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -40,136$  dB ( $f_c = 898,740$  MHz)

Για το γράφημα του σχήματος 15(β) & 16(β) έχουμε:

Κεραία No15: Λόγος VSWR = 1,014 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -42,911$  dB ( $f_c = 1397,200$  MHz)

Κεραία No16: Λόγος VSWR = 1,006 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -50,254$  dB ( $f_c = 1399,700$  MHz)

Κεραία No17: Λόγος VSWR = 1,003 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -55,701$  dB ( $f_c = 1400,300$  MHz)

Για το γράφημα του σχήματος 15(γ) & 16(γ) έχουμε:

Κεραία No19: Λόγος VSWR = 1,002 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -57,639$  dB ( $f_c = 1500,000$  MHz)

Κεραία No20: Λόγος VSWR = 1,011 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -44,815$  dB ( $f_c = 1497,300$  MHz)

Κεραία No21: Λόγος VSWR = 1,003 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -54,654$  dB ( $f_c = 1499,400$  MHz)

Κεραία No22: Λόγος VSWR = 1,012 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -44,004$  dB ( $f_c = 1499,700$  MHz)

Για το γράφημα του σχήματος 15(δ) & 16(δ) έχουμε:

Κεραία No27: Λόγος VSWR = 1,002 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -58,702$  dB ( $f_c = 1900,400$  MHz)

Κεραία No28: Λόγος VSWR = 1,002 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -57,803$  dB (fc =1900,400 MHz)

Κεραία No29: Λόγος VSWR = 1,002 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -57,526$  dB (fc =1900,000 MHz)

Κεραία No30: Λόγος VSWR = 1,044 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -33,152$  dB (fc =1895,800 MHz)

Για το γράφημα του σχήματος 15(ε) & 16(ε) έχουμε:

Κεραία No39: Λόγος VSWR = 1,011 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -44,668$  dB (fc = 2495,500 MHz)

Κεραία No40: Λόγος VSWR = 1,001 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -62,199$  dB (fc =2500,500 MHz)

Κεραία No41: Λόγος VSWR = 1,003 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -55,776$  dB (fc =2500,000 MHz)

Κεραία No42: Λόγος VSWR = 1,004 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -52,920$  dB (fc =2500,000 MHz)

Για το γράφημα του σχήματος 15(στ) & 16(στ) έχουμε:

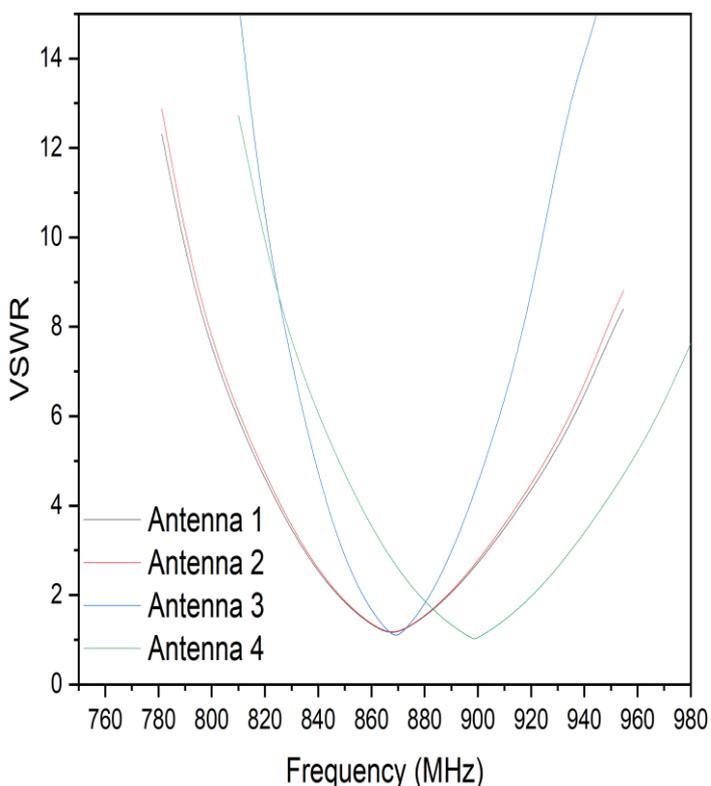
Κεραία No23: Λόγος VSWR = 1,009 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -46,233$  dB (fc = 1703,700 MHz)

Κεραία No24: Λόγος VSWR = 1,001 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -62,443$  dB (fc =1699,700 MHz)

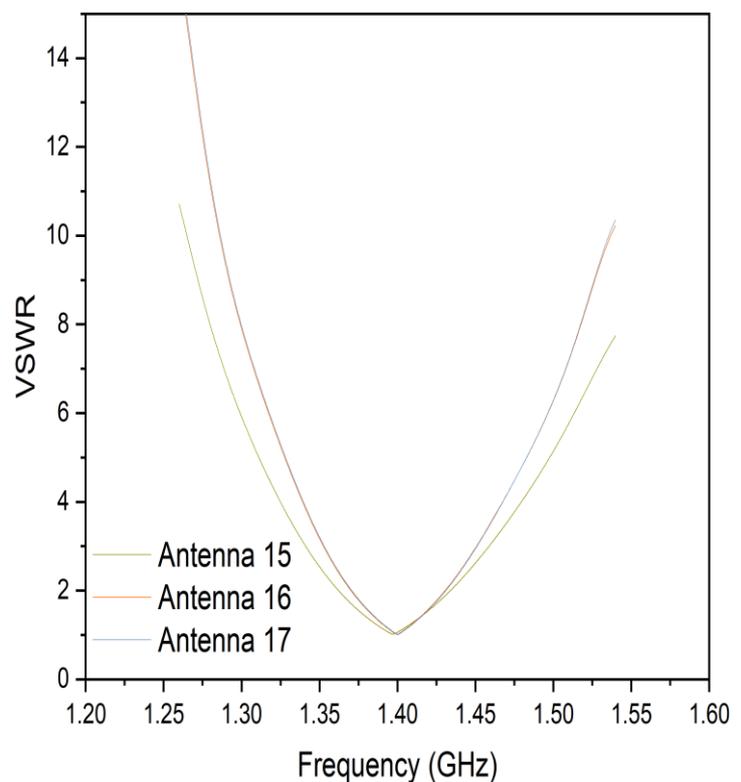
Κεραία No25: Λόγος VSWR = 1,002 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -58,755$  dB (fc =1770,000 MHz)

Κεραία No26: Λόγος VSWR = 1,004 με δείκτη σκέδασης  $S_{11} = -53,221$  dB (fc =1700,000 MHz)

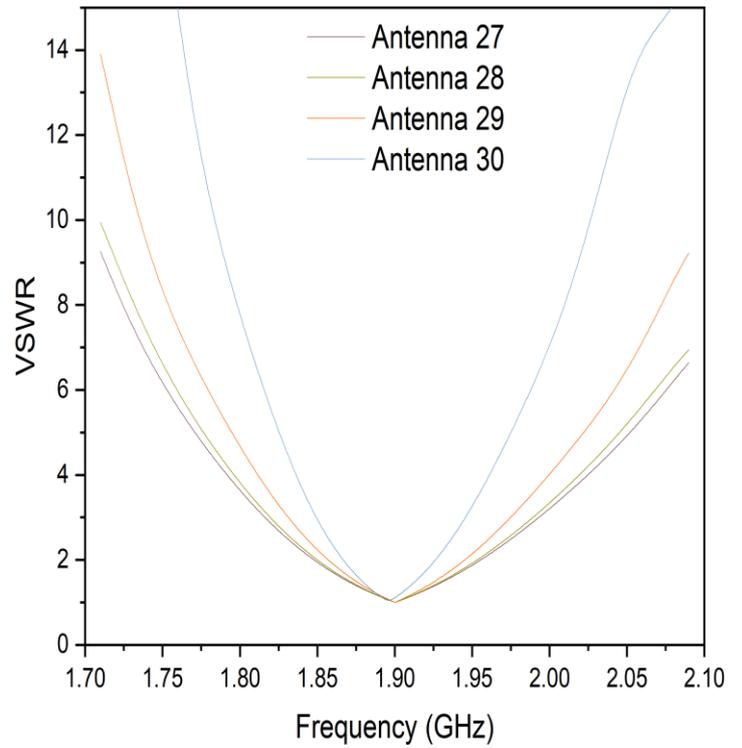
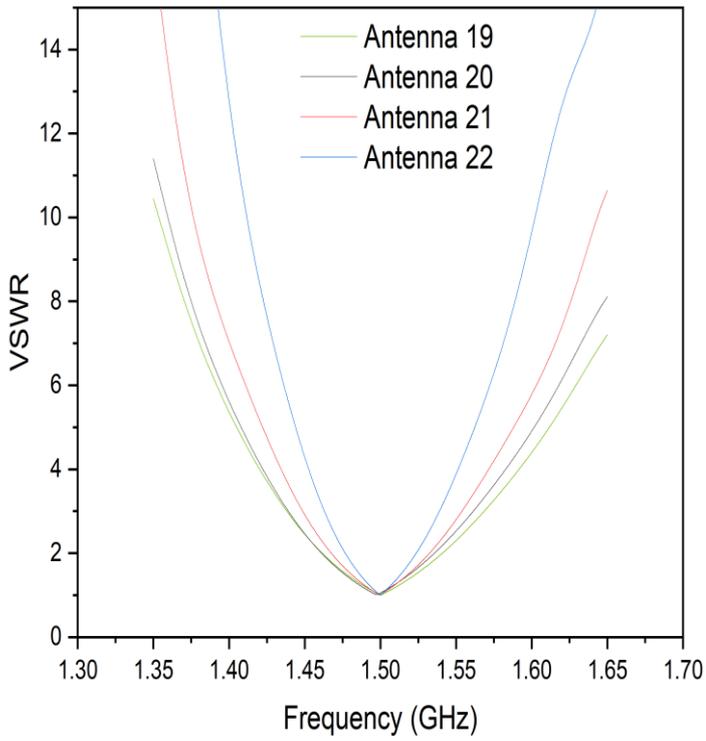
Συγκρίνοντας τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι κεραίες **No17** , **No19**,**No24**, **No27**, **No28**, **No29**, **No40** & **No41** εμφανίζουν την καλύτερη συμπεριφορά ως προς τον λόγο στασίμων και του δείκτη σκέδασης.



(α)



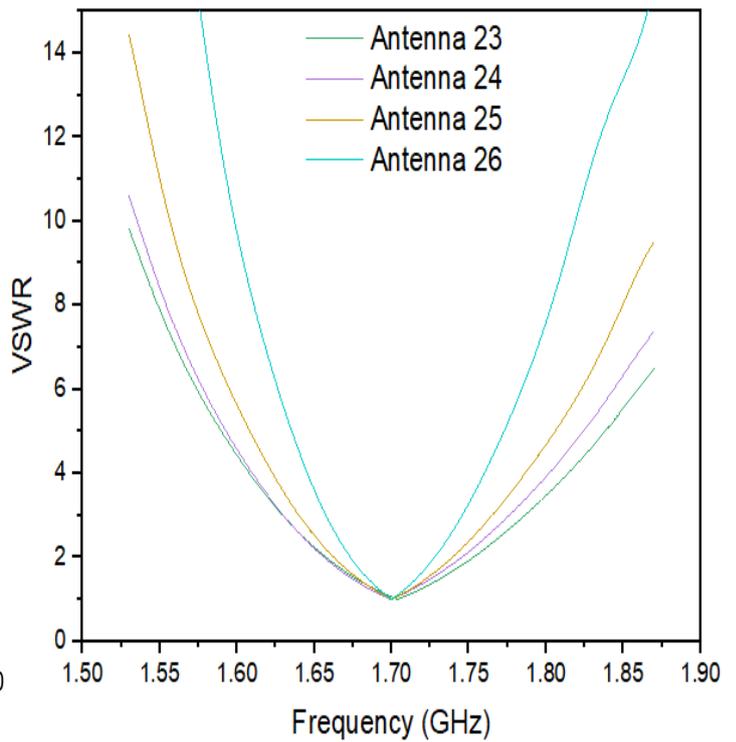
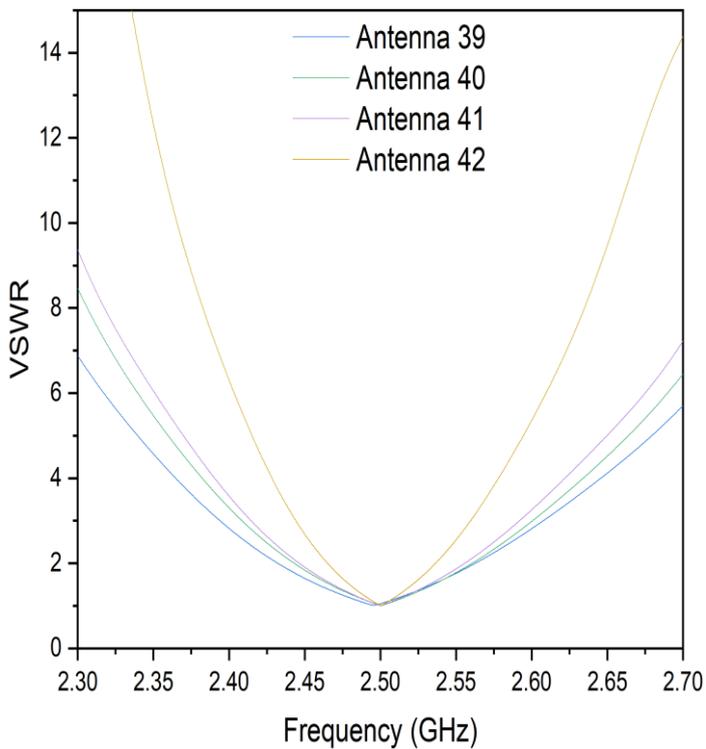
(β)



(γ)

(δ)

Σχήμα 17 (α,β,γ,δ): VSWR συναρτήσεσι της συχνότητας για Antenna: (α) 1, 2,... (β) 15, 16,... (γ) 19, 20,... (δ) 27, 28,...



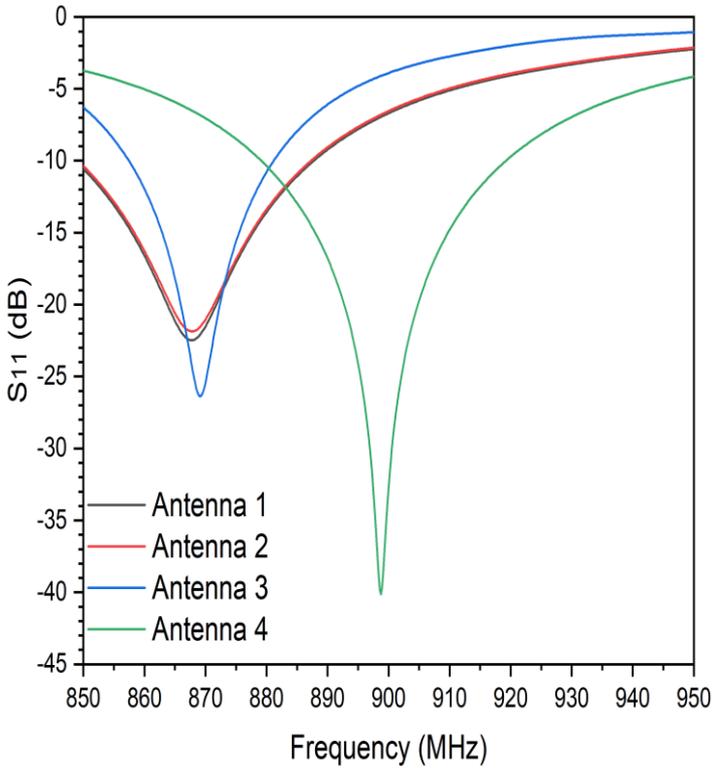
(ε)

Σχήμα 18 (ε,στ): VSWR συναρτήσεσι της συχνότητας για Antenna: (ε) 39, 40,...(στ) 23, 24,...

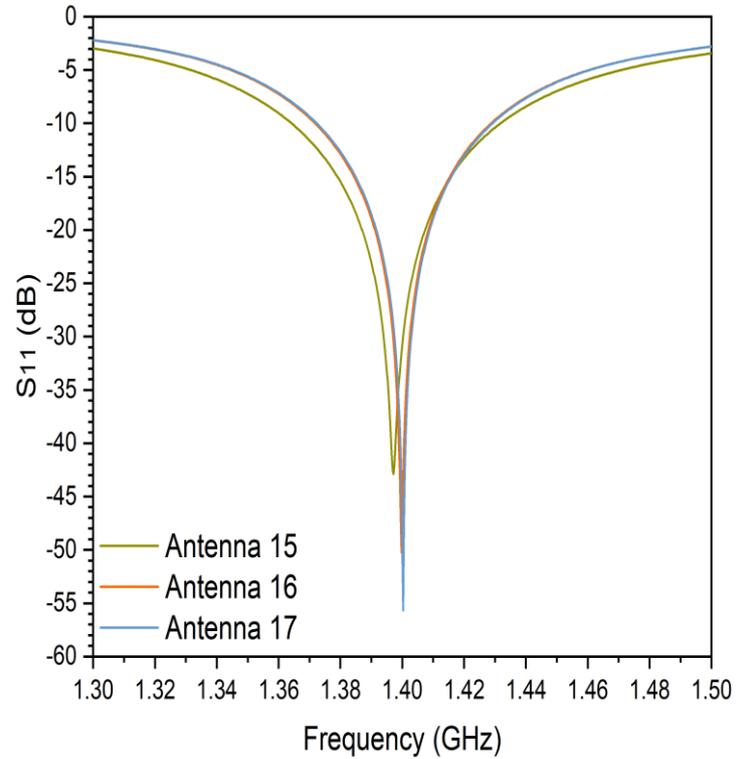
## 4.8 Διαγράμματα $S_{11}$ (dB) συναρτήσει της συχνότητας - Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στα γραφήματα των σχημάτων 16(α,β,γ,δ & ε) απεικονίζονται οι συντελεστές σκέδασης  $S_{11}$ (dB) όλων των κεραιών με τις αντίστοιχες συχνότητες συντονισμού σχήμα 16(α) -22.469, -21.861, -26.365 & -40.136 αντίστοιχα. Όμοια για τις περιπτώσεις 16(β), 16(γ), 16(δ) και 16(ε).

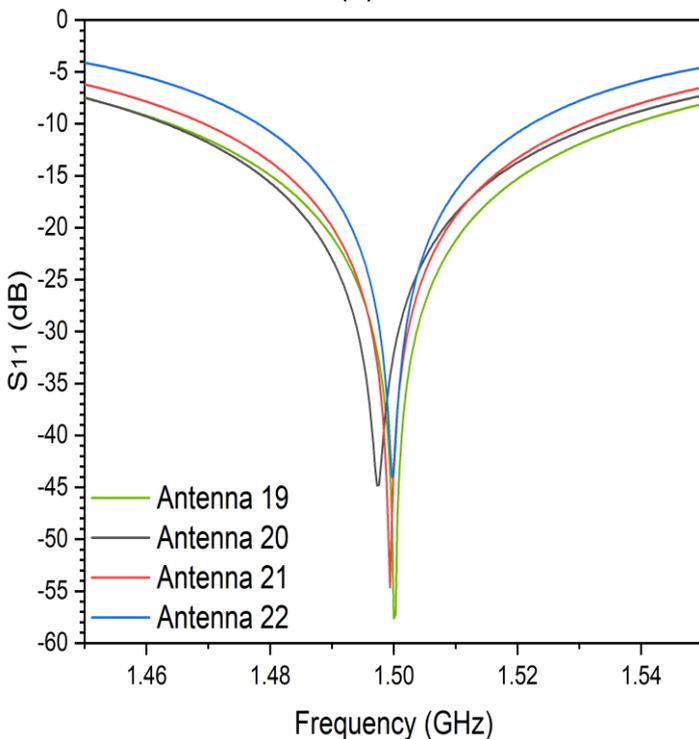
Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης βλέπε στην παράγραφο 4.7.



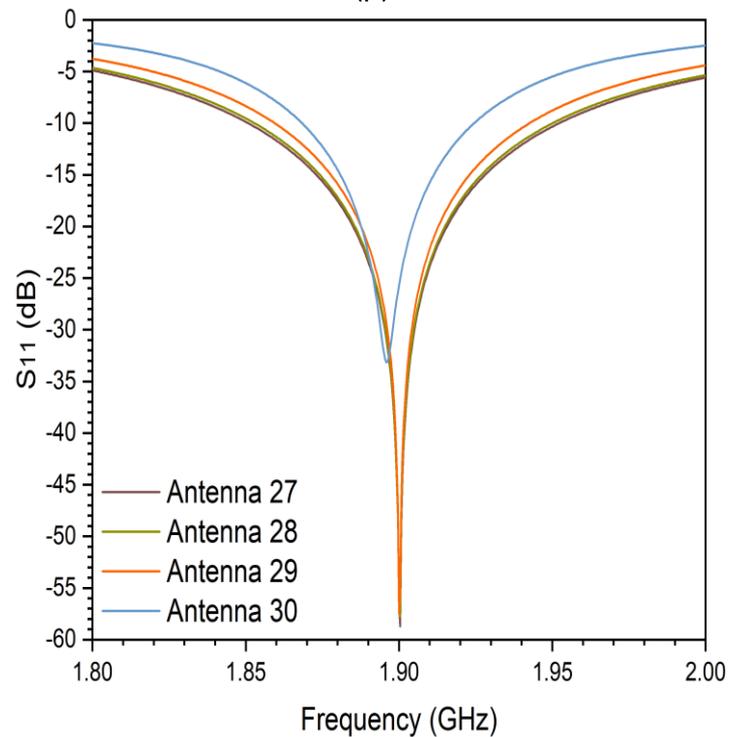
(α)



(β)

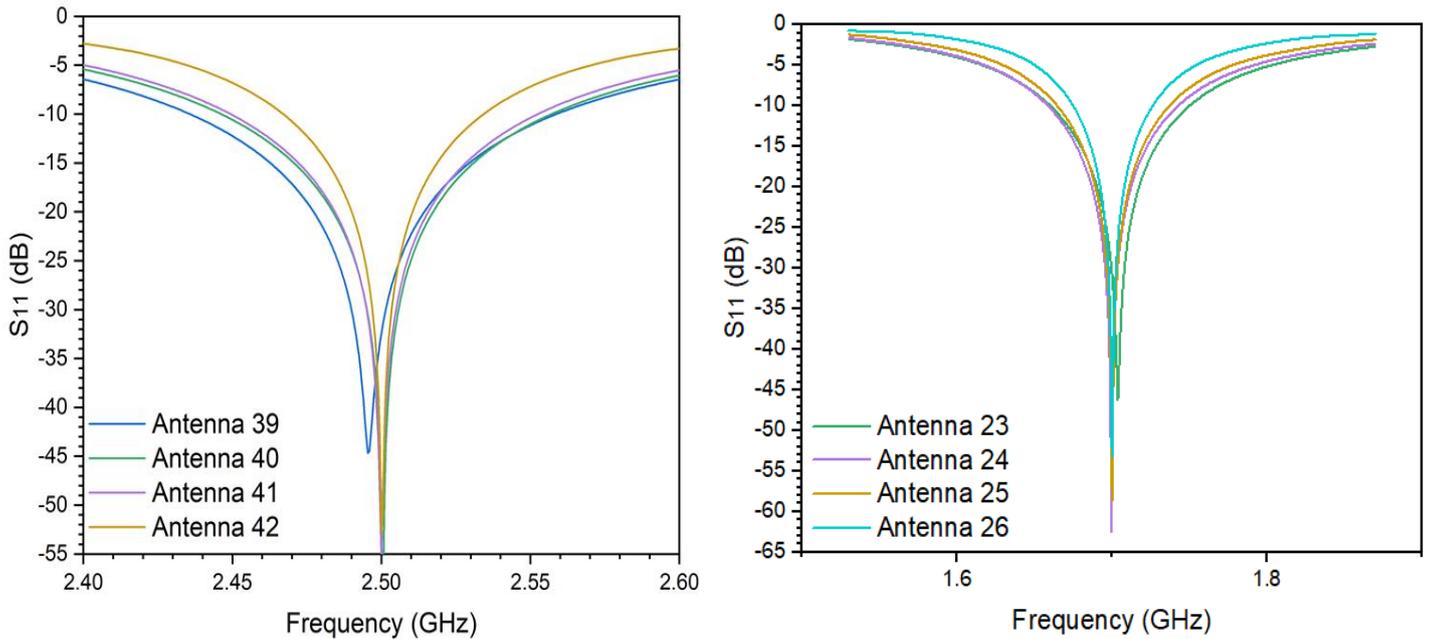


(γ)



(δ)

Σχήμα 19 (α,β,γ,δ):  $S_{11}$  (dB) συναρτήσει της συχνότητας για Antenna: (α) 1, 2,... (β) 15, 16,... (γ) 19, 20,... (δ) 27, 28,...



(ε)

Σχήμα 20 (ε,στ):  $S_{11}$  (dB) συναρτήσει της συχνότητας για Antenna: (ε) 39, 40,...(στ) 23, 24,...

#### 4.9 Διάγραμμα ακτινοβολίας για Antenna $G(\theta, \varphi=0^\circ)$ – Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στα γραφήματα των σχημάτων 17 και 18 (παράγραφος 4.10) απεικονίζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας για  $\varphi=0^\circ$  και  $\varphi=90^\circ$  αντίστοιχα. Τα διαγράμματα ακτινοβολίας θα τα εξετάσουμε από κοινού ώστε να μπορέσουμε να εστιάσουμε στην αλληλεξάρτηση των δύο μεγεθών καλύτερα.

Οι δύο βασικές παράμετροι που μας ενδιαφέρουν στο διάγραμμα ακτινοβολίας είναι το κέρδος (Gain) και κατευθυντικότητα (Directivity). Όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές των δύο παραμέτρων τόσο καλύτερα.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης γενικά είναι δύσκολο να τα πετύχουμε και αυτό έχει να κάνει με τις ιδιότητες του γραφενίου.

Μελετώντας τα διαγράμματα ακτινοβολίας για  $\varphi=0^\circ$  και  $\varphi=90^\circ$ , λαμβάνουμε τα παρακάτω δεδομένα:

Για το γράφημα του σχήματος 17 & 18 έχουμε:

Κεραία No1: Κέρδος (Gain) = 4,290 dBi - κατευθυντικότητα (Directivity) = 8,040 dBi ( $f_c = 867,830$  MHz)

Κεραία No2: Κέρδος (Gain) = 3,810 dBi - κατευθυντικότητα (Directivity) = 7,560 dBi ( $f_c = 867,830$  MHz)

Κεραία No3: Κέρδος (Gain) = 2,500 dBi - κατευθυντικότητα (Directivity) = 6,490 dBi ( $f_c = 869,220$  MHz)

Κεραία No4: Κέρδος (Gain) = 4,330 dBi - κατευθυντικότητα (Directivity) = 8,030 dBi (fc =898,740 MHz)

Κεραία No15: Κέρδος (Gain) = 4,480 dBi - κατευθυντικότητα (Directivity) = 8,170 dBi (fc = 1397,200 MHz)

Κεραία No16: Κέρδος (Gain) = 4,280 dBi - κατευθυντικότητα (Directivity) = 8,030 dBi (fc =1399,700 MHz)

Κεραία No17: Κέρδος (Gain) = 3,830 dBi - κατευθυντικότητα (Directivity) = 7,540 dBi (fc =1400,300 MHz)

Κεραία No19: Κέρδος (Gain) = 4,500 dBi - κατευθυντικότητα (Directivity) = 8,160 dBi (fc = 1500,000 MHz)

Κεραία No20: Κέρδος (Gain) = 4,350 dBi - κατευθυντικότητα (Directivity) = 8,030 dBi (fc =1497,300 MHz)

Κεραία No21: Κέρδος (Gain) = 3,820 dBi - κατευθυντικότητα (Directivity) = 7,550 dBi (fc =1499,400 MHz)

Κεραία No22: Κέρδος (Gain) = 4,380 dBi - κατευθυντικότητα (Directivity) = 6,520 dBi (fc =1499,700 MHz)

Κεραία No27: Κέρδος (Gain) = 4,670 dBi - κατευθυντικότητα (Directivity) = 8,170 dBi (fc = 1900,400 MHz)

Κεραία No28: Κέρδος (Gain) = 4,400 dBi - κατευθυντικότητα (Directivity) = 8,020 dBi (fc =1900,400 MHz)

Κεραία No29: Κέρδος (Gain) = 3,850 dBi - κατευθυντικότητα (Directivity) = 7,540 dBi (fc =1900,000 MHz)

Κεραία No30: Κέρδος (Gain) = 2,310 dBi - κατευθυντικότητα (Directivity) = 6,500 dBi (fc =1895,800 MHz)

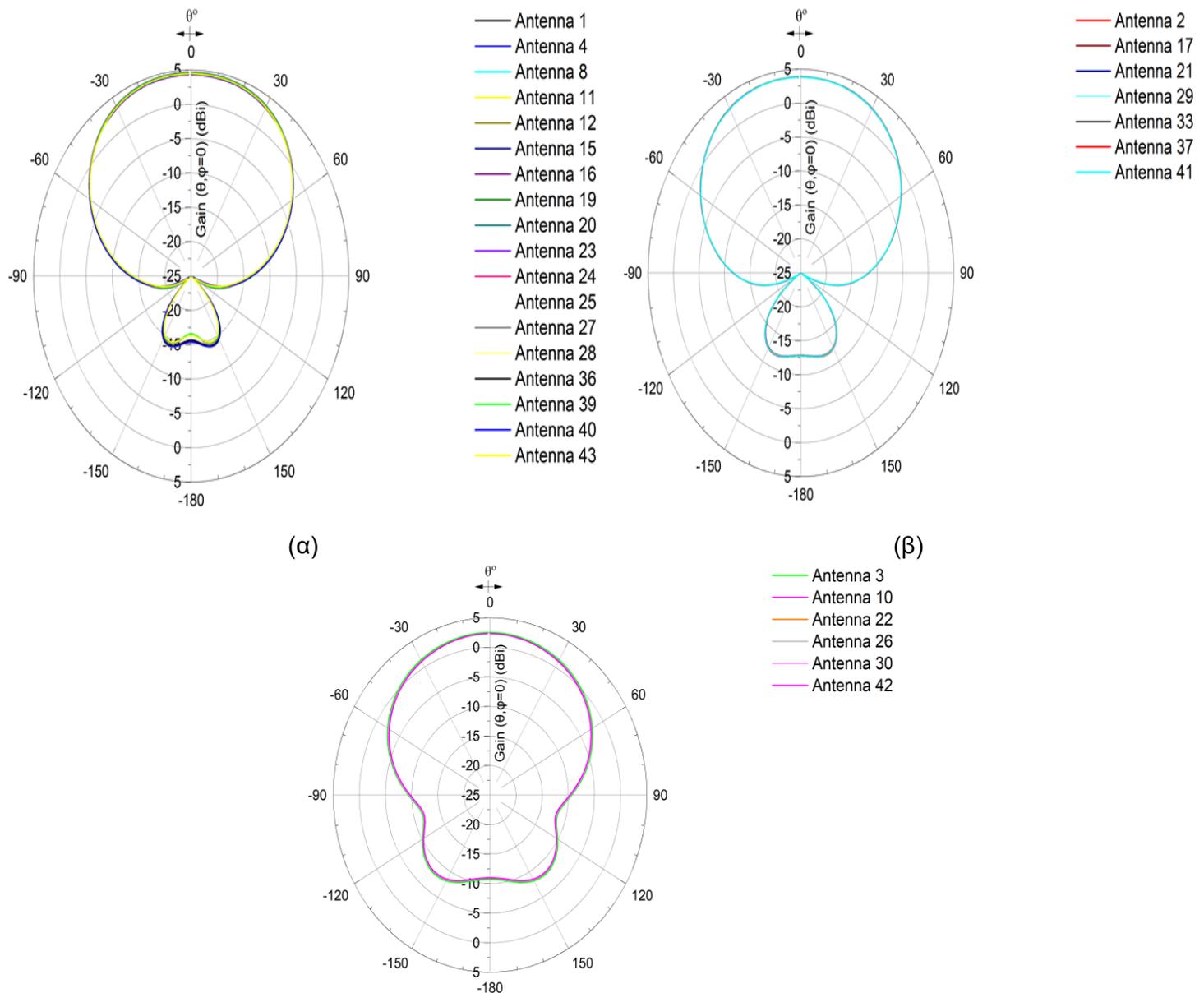
Κεραία No39: Κέρδος (Gain) = 4,490 dBi - κατευθυντικότητα (Directivity) = 8,170 dBi (fc = 2495,500 MHz)

Κεραία No40: Κέρδος (Gain) = 4,330 dBi - κατευθυντικότητα (Directivity) = 8,030 dBi (fc =2500,500 MHz)

Κεραία No41: Κέρδος (Gain) = 3,830 dBi - κατευθυντικότητα (Directivity) = 7,550 dBi (fc =2500,000 MHz)

Κεραία No42: Κέρδος (Gain) = 2,320 dBi - κατευθυντικότητα (Directivity) = 6,550 dBi (fc =2500,000 MHz)

Συγκρίνοντας τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι οι κεραίες **No4 , No15, No19, No20, No27, No28, No39 & No40** έχουν την καλύτερη ακτινοβολία.

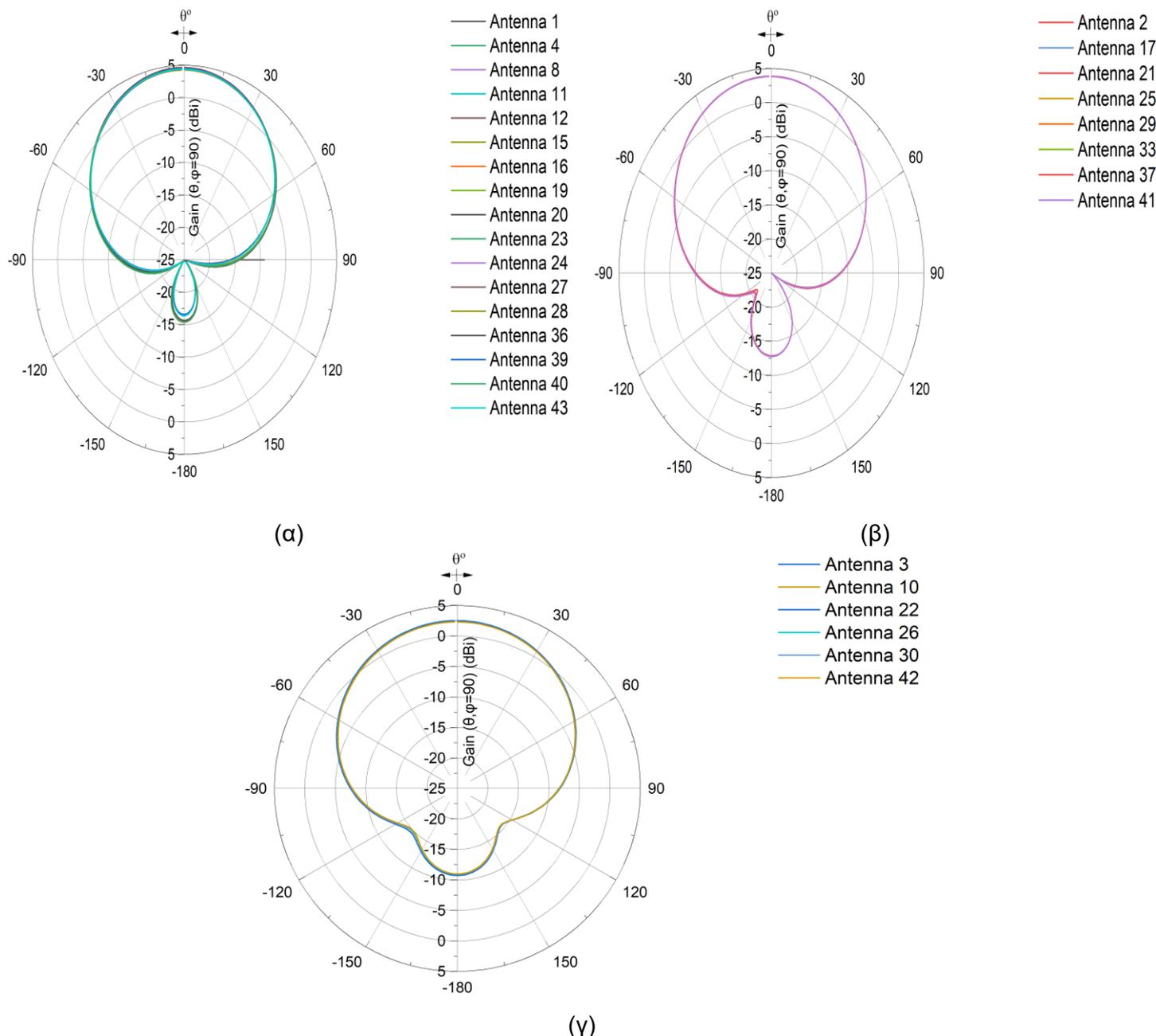


Σχήμα 21 (α,β,γ): Διάγραμμα ακτινοβολίας  $G(\theta, \varphi=0^\circ)$  για Antenna: (α) 1, 4,... (β) 2, 17,... (γ) 3, 10,...

#### 4.10 Διάγραμμα ακτινοβολίας για Antenna $G(\theta, \varphi=90^\circ)$ - Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στο σχήμα 18(α, β & γ) απεικονίζεται το διάγραμμα ακτινοβολίας για  $\Phi=0$  των κεραιών 1,4,8,11,...

Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης βλέπε στην παράγραφο 4.9.



Σχήμα 22 (α,β,γ): Διάγραμμα ακτινοβολίας  $G(\theta, \varphi=90^\circ)$  για Antenna: (α) 1, 4,... (β) 2, 17,... (γ) 3, 10,...

#### 4.11 Συμπεράσματα αποτελεσμάτων προσομοίωσης

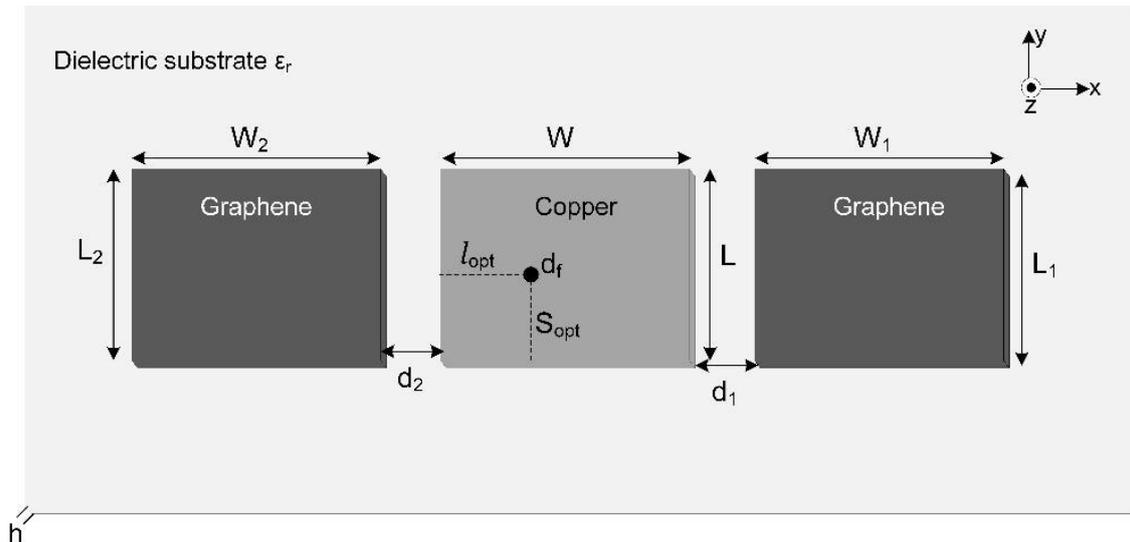
Με βάση τα όσα προέκυψαν από το σύνολο των προσομοιώσεων προκύπτουν τα εξής:

- Η κεραία με το μεγαλύτερο εύρος ζώνης (Bandwidth) είναι η No**39** στα 123,100 MHz.
- Η κεραία με τον καλύτερο δείκτη σκέδασης (S11) είναι η No**24** στα -62,443 dB.
- Η κεραία με τον καλύτερο λόγο στασίμων (VSWR) είναι η No**24** με τιμή 1,001.
- Η κεραία με το καλύτερο πραγματικό μέρος σύνθετης αντίστασης  $Re(z)$  είναι η No**29** με τιμή στα 50,001Ω.
- Οι κεραίες με το καλύτερο φανταστικό μέρος σύνθετης αντίστασης  $Im(z)$  είναι η No**29** με τιμή στα -0,003Ω και η No**19** στα 0,001Ω.



- Οι κεραιές με το καλύτερο Gain είναι η No27 στα 4,670 dBi και η No39 στα 4,490 dBi.
- Η κεραιά με την καλύτερη κατευθυντικότητα (Directivity) είναι η No39 με τιμή στα 8,170 dBi.

Στο σχήμα 19 και στους πίνακες 7 & 8 παρακάτω αποτυπώνονται τα γεωμετρικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των εν λόγω (2 καλύτερων) κεραιών:



Σχήμα 23: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κεραιάς γραφενίου.

Πίνακας 7: Πίνακας διαστάσεων κεραιών No24 & No39

A/A	f (MHz)	$\epsilon_r$	h (mm)	$L_{opt}$ (mm)	W(mm)	$S_{opt}$ (mm)	$D_f$ (mm)	$L_1$ (mm)	$W_1$ (mm)	$d_1(S1)$ (mm)	$L_2$ (mm)	$W_2$ (mm)	$d_2(S2)$ (mm)
24	1700	1.6	3.000	63.664	77.334	12.268	0.882	63.344	77.334	0.697	63.344	77.334	0.697
39	2500	1.5	2.000	44.723	53.629	8.524	0.600	44.444	53.629	0.451	44.444	53.629	0.451

ενώ στον πίνακα 8 εμφανίζονται τα αντίστοιχα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των κεραιών No24 & No39.

Πίνακας 8: Πίνακας ηλεκτρικών χαρακτηριστικών κεραιών No24 & No39

A/A	$f_c$ (MHz)	$f_{c1}$ (MHz)	$f_{c2}$ (MHz)	S11 (dB)	BW (MHz)	VSWR @ $f_c$	Re(Z) ( $\Omega$ ) @ $f_c$	Im(Z) ( $\Omega$ ) @ $f_c$	Realized Gain (dBi) @ $f_c$	Directivity (dBi) @ $f_c$
24	1699.700	1659.100	1743.100	-62.443	84.000	1.001	49.779	0.013	4.380	8.020
39	2495.500	2435.700	2558.800	-44.668	123.100	1.011	49.923	-0.578	4.490	8.170

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι οι δύο «καλύτερες» κεραιές που προσομοιώθηκαν είναι η No24 και η No39 αφού και οι δύο παρουσιάζουν εξαιρετικές ιδιότητες, με την No39 να ξεχωρίζει για το εύρος ζώνης, το κέρδος και την κατευθυντικότητα και την No24 να ξεχωρίζει για τον υψηλό δείκτη σκέδασης και το λόγο στασίμων ο οποίος αγγίζει απόλυτα την τιμή 1. Η τελική επιλογή εξαρτάται πάντα από το τι θέλω να πετύχω κάθε φορά.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω η χρήση του γραφενίου ως υλικό των παρασιτικών στοιχείων, κρίνεται αποτελεσματική, αφού όπως προκύπτει και από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ο τρόπος ακτινοβολίας της κεραίας με τη χρήση γραφενίου δεν αποκλίνει πολύ από αυτή του χαλκού, παρότι το γραφένιο παρουσιάζει μια ελαφρός μικρότερη αγωγιμότητα σε σχέση με αυτή του χαλκού.

Επίσης θα πρέπει να επισημάνουμε ότι το γραφένιο είναι πάρα πολύ ανθεκτικό σαν υλικό. Είναι εύκαμπτο και αντέχει στις μηχανικές καταπονήσεις και σε συνδυασμό με το ότι είναι πολύ πιο οικονομικό από το χαλκό, το καθιστά κατάλληλο και ανταγωνιστικό υλικό για χρήση (μελλοντικά) και για εμπορικούς σκοπούς.

Το γραφένιο μπορεί να μην έχει το Gain που έχει μια κεραία χαλκού, όμως από έρευνες στην παγκόσμια βιβλιογραφία έχει επαληθευτεί η ομοιότητά του στην πράξη με το χαλκό.

Η συγκεκριμένη διάταξη με τα παρασιτικά στοιχεία εμφανίζει μεγαλύτερο Gain σε σχέση με μια απλή παρασιτική ορθογωνική κεραία γραφενίου. Παρατηρούμε επίσης ότι όσο αυξάνεται το πάχος του υποστρώματος, αυξάνεται και το εύρος ζώνης (BW), ενώ τέλος με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν υλικά με διηλεκτρικές σταθερές από 1,6 έως 3,5.

**5 Βιβλιογραφία**

- [1980, C. Wood] C. Wood, “Improved bandwidth of microstrip antennas using parasitic elements”, IEE PROC., Vol 127, Pt. H, No. 4, August 1980.
- [2019, W. Wang] W. Wang – Chao Ma, “High-performance printable 2.4 GHz graphene-Based antenna using water-transferring technology”, SCIENCE AND TECHNOLOGY OF MATERIALS, Vol.20, No1, 870-875, 2019.
- [2020, S. Dash] S. Dash – A. Patnaik, “Behavior of graphene based planar antenna at microwave and terahertz frequency”, Elsevier B.V., 28 April 2020.
- [2009, W.-C. Liu] W.-C. Liu, M. Ghavami, and W.-C. Chung, “Triple-frequency meandered monopole antenna with shorted parasitic strips for wireless application,” IET Microwaves, Antennas and Propagation, vol. 3, no. 7, pp. 1110–1117, 2009
- [2018, A. Scidà] A. Scidà 1, S. Haque 2,†, E. Treossi 1, Application of graphene-based flexible antennas in consumer electronic devices, 28 April 2020.
- [2015, Rajni Bala] Rajni Bala \*, Anupma Marwaha, Investigation of graphene based miniaturized terahertz antenna for novel substrate materials, Elsevier B.V. 9 July 2015.
- [2018, A. Scidà] A. Scidà \*, Application of graphene-based flexible antennas in consumer electronic devices, ScienceDirect April 2018.