



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

## **Διπλωματική Εργασία**

### **Σχεδίαση και Κατασκευή Κάθετης Κεραίας Βραχέων Κυμάτων**



**Φοιτήτρια: Τζανετοπούλου Πηνελόπη**  
**ΑΜ: 50346349**

**Επιβλέπων Καθηγητής**

**Τσακιρίδης Οδυσσέας**  
**Επίκουρος Καθηγητής**

**ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΣΕΠΤΕΜΒΙΟΣ 2024**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**FACULTY OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

**Diploma Thesis**

**Design & Construction of a Vertical Shortwave Antenna**



**Student: Tzanetopoulou Pinelopi**  
**Registration Number: 50346349**

**Supervisor**

**Tsakiridis Odysseas**  
**Assistant Professor**

**ATHENS-EGALEO, SEPTEMBER 2024**

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Οδυσσεύς Τσακίριδης Επίκουρος Καθηγητής	Παναγιώτης Φωτόπουλος Αναπληρωτής Καθηγητής	Σωτηρία Γαλατά Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

**Copyright ©** Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και (Όνοματεπώνυμο Φοιτητή/ήτριας),  
Μήνας, Έτος**

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

### **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Τζανετοπούλου Πηνελόπη του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 50346349 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

**δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι ..... και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Η Δηλούσα  
Τζανετοπούλου Πηνελόπη



*Αφιερωμένη στους γονείς μου  
Γεώργιο και Παναγιώτα*

## Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία, νιώθω την ανάγκη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς ορισμένα άτομα, χωρίς τη συμβολή των οποίων αυτή η προσπάθεια δεν θα ήταν δυνατή.

Καταρχάς, θα ήθελα να απευθύνω ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στον επιβλέποντα καθηγητή μου, για την αδιάκοπη στήριξή του, τις χρήσιμες συμβουλές και τις πολύτιμες παρατηρήσεις του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Η καθοδήγηση και οι γνώσεις του υπήρξαν καθοριστικής σημασίας για την επιτυχή ολοκλήρωση αυτής της μελέτης.

Παράλληλα, νιώθω βαθιά ευγνωμοσύνη για την οικογένειά μου, που στάθηκε δίπλα μου με υπομονή και αγάπη σε όλες τις προκλήσεις που συνάντησα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Η συναισθηματική και ηθική τους στήριξη υπήρξε ανεκτίμητη, δίνοντάς μου τη δύναμη να προχωρήσω και να πετύχω τους στόχους μου.

## Περίληψη

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εστιάζει στη σχεδίαση και κατασκευή μιας κάθετης κεραίας για χρήση σε βραχέα κύματα. Η κεραία αυτή έχει σχεδιαστεί για να βελτιώσει την απόδοση της επικοινωνίας σε HF ζώνες, προσφέροντας αξιόπιστη και αποδοτική μετάδοση και λήψη σήματος. Οι κύριοι στόχοι της εργασίας περιλαμβάνουν τη θεωρητική ανάλυση της κάθετης κεραίας και των αρχών λειτουργίας της καθώς και σχεδίαση και κατασκευή της κεραίας σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίστηκαν.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται εργαλεία προσομοίωσης για τη σχεδίαση της κεραίας, με στόχο την βέλτιστη απόδοση σε συγκεκριμένες συχνότητες και συνθήκες περιβάλλοντος. Η προσομοίωση περιλαμβάνει την ανάλυση της κατανομής του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και της απόδοσης εκπομπής, ενώ εξετάζονται και διαφορετικές διαμορφώσεις για την καλύτερη κάλυψη και ελαχιστοποίηση των απωλειών.

Τέλος, πραγματοποιείται η κατασκευή της κεραίας βάσει των ευρημάτων από τις θεωρητικές μελέτες και τις προσομοιώσεις. Ακολουθούν δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες, για να επιβεβαιωθούν οι θεωρητικές προβλέψεις και να αξιολογηθεί η πραγματική απόδοση της κεραίας. Τα αποτελέσματα δείχνουν πώς οι διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν την απόδοση και παρέχουν προτάσεις για μελλοντικές βελτιώσεις και εφαρμογές.

Αυτή η εργασία συμβάλλει στην κατανόηση και τη βελτιστοποίηση των κεραιών βραχέων κυμάτων, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη προσέγγιση από τη θεωρία έως την πρακτική εφαρμογή.

Η κατασκευή γίνεται σύμφωνα με το λογισμικό 4NEC2.

## Λέξεις – κλειδιά

Κάθετη κεραία βραχέων κυμάτων, HF , Βραχέα Κύματα, 4NEC2

## **Abstract**

This thesis focuses on the design and fabrication of a vertical antenna for use in short waves. This antenna is designed to improve communication performance in HF bands by providing reliable and efficient signal transmission and reception. The main objectives of this diploma include theoretical analysis of the vertical antenna and its operating principles as well as design and fabrication of the antenna according to the defined specifications.

Simulation tools are then used to design the antenna for optimal performance at specific frequencies and environmental conditions. The simulation includes the analysis of the electromagnetic field distribution and the transmission efficiency, and different configurations are considered for the best coverage and minimization of losses.

Finally, antenna fabrication is carried out based on the findings from the theoretical studies and simulations. This is followed by real-world tests to confirm the theoretical predictions and evaluate the actual performance of the antenna. The results show how various factors affect the performance and provide suggestions for future improvements and applications.

This thesis contributes to the understanding and optimization of short-wave antennas by offering comprehensive approach from theory to practical application.

The simulation is done according to the 4NEC2 software.

## **Keywords**

END FED VERTICAL ANTENNA, HF , SHORT-WAVE , 4NEC2



## Περιεχόμενα

<b>Κατάλογος Εικόνων.....</b>	<b>10</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>12</b>
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας .....	12
Σκοπός και στόχοι.....	12
Μεθοδολογία.....	12
Καινοτομία .....	12
Δομή.....	12
<b>1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> :ΚΕΡΑΙΕΣ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ .....</b>	<b>133</b>
1.1.1 Ορισμός.....	133
1.1.2 Ιστορική Αναδρομή .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 4
1.2.1 Διάγραμμα Ακτινοβολίας.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 5
1.2.2 Διάγραμμα Πεδίου Ακτινοβολίας.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 6
1.2.3 Πυκνότητα Ισχύος Και Ένταση Ακτινοβολίας.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 8
1.2.4 Κατευθυντικότητα Κεραίας Και Εύρος Δεσμής.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 9
1.2.5 Απόδοση Δέσμης Και Εύρος Ζώνης.....	21
1.2.6 Πόλωση Κεραίων Και Παράγοντας Πόλωσης .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b> 2
1.2.7 Ισοδύναμο Κύκλωμα Κεραίας.....	23
1.2.8 S-Παράμετροι .....	24
1.2.9 Κέρδος Ισχύος Και Απόδοση Κεραίας.....	25
1.3 Διάφοροι Τύποι Κεραίων Σε Διάφορες Συχνότητες.....	24
1.3.1 Κεραίες Βραχέων Κυμάτων Σε Υψηλή Συχνότητα(HF3-30 MHZ).....	30
1.3.2 Καθετες Κεραίες Βραχέων Κυμάτων.....	31
<b>2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ 4NEC2.....</b>	<b>33</b>
2.1.1 Ιστορική Αναδρομή 4NEC2 .....	32
2.1.2 Ανάλυση Δυνατοτήτων Και Λειτουργιών Του Λογισμικού 4nec2 .....	33
2.2 Ανάλυση Περιβαλλοντος Λογισμικού 4NEC2.....	35
2.2.1 Main Window .....	37
2.2.2 Geometry Window .....	42
2.2.3 Pattern Window .....	44
2.2.4 Smith Chart .....	45
2.3 Σχεδίαση End Fed Καθετης Κεραίας.....	45
2.3.1 Προσομοίωση Και Ανάλυση Αποτελεσμάτων .....	47
2.3.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων Στο Μακρino Πεδιο ( Far Field Pattern) .....	47
2.3.3 Ανάλυση Αποτελεσμάτων Στη Σαρωση Συχνοτητων (Frequency Sweep) .....	49
<b>3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΘΕΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ.....</b>	<b>51</b>
3.1 Διάγραμμα πραγματικού (R) και φανταστικού (X) σε συναρτηση με τη συχνότητα .....	53
3.2 Διάγραμμα Group Delay Σε Συνάρτηση Με Τη Συχνότητα.....	54
3.3 Διάγραμμα S11 Φάσης σε συνάρτηση με τη συχνότητα.....	55
3.4 Διάγραμμα Quality Factor .....	56
3.5 Διάγραμμα S11 R + jX(Ω) .....	57
3.6 Διάγραμμα S11 Real / Imaginary.....	58
3.7 Διάγραμμα Return Loss σε Συνάρτηση με τη Συχνότητα .....	59
3.8 Διάγραμμα S11 Serial C (f).....	60
3.9 Διάγραμμα Serial L (H).....	61
3.10 Διάγραμμα Χαρτη Smith.....	62
3.11 Διάγραμμα  S11 .....	63
3.12 Διάγραμμα S11 VSWR .....	64
3.13 Διάγραμμα S11  Z  .....	65
3.14 Αποτελέσματα Πειράματος .....	66

<b>4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>68</b>
4.1 Σύνοψη Εργασίας .....	68
4.2 Μελλοντικές Βελτιώσεις.....	68
Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές.....	69

### **Κατάλογος Εικόνων**

EIKONA 1.1: Η κεραία ως μεταβατική διάταξη μεταξύ πηγής και ελεύθερου χώρου .....	[13]
EIKONA 1.2: The Marconi Company first antenna system at Poldhu, Cornwall, December 1901[14]	
EIKONA 1.3: Διάγραμμα Ακτινοβολίας Κεραίας [15]	
EIKONA 1.4: Περιοχές Ή Ζωνες Πεδιου Μιας Κεραιας [16]	
EIKONA 1.5 Διάγραμμα ακτινοβολίας [17]	
EIKONA 1.6 Ομοιοκατευθυντική κεραία στο αζιμουθιακό επίπεδο (xy) και κατευθυντική στο επίπεδο ανύψωσης (xz) [17]	
EIKONA 1.7: Τρισδιάστατο Διάγραμμα Ισχύος Σε Γραμμική Κλίμακα [18]	
EIKONA 1.8 :Διάγραμμα κατευθυντικότητας διπόλου $\lambda/2$ [19]	
EIKONA 1.9 : Στερεά γωνία δέσμης σε διάγραμμα ακτινοβολίας [20]	
EIKONA 1.10 : Δισδιάστατο Διάγραμμα Ισχύος Σε Γραμμική Κλίμακα [21]	
EIKONA 1.11 :Διάγραμμα παραμέτρων S11 [22]	
EIKONA 1.12 : Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που διαγράφει το άκρο του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου [22]	
EIKONA 1.13 Γωνία Απωλειών Πόλωσης [23]	
EIKONA 1.14 Κεραία Σε Λειτουργία Εκπομπής [24]	
EIKONA 1.15 Κατά Thevenin ισοδύναμο κύκλωμα [25]	
EIKONA 1.16 Μορφές Κεραιών Σύρματος [26]	
EIKONA 1.17 : Μορφές Κεραιών Ανοίγματος [27]	
EIKONA 1.18 Ορθογωνιες Και Κυκλικες Κεραιες Μικροταινιας. [27]	

ΕΙΚΟΝΑ 1.19 Τυπικές Διατάξεις Στοιχειοκεραιών. [28]

ΕΙΚΟΝΑ 1.20 υπικές Μορφές Ανακλαστών [28]

ΕΙΚΟΝΑ 2.1: Γεωμετρική Διάταξη Της Κεραίας (1η ) και 3D Διάγραμμα Ακτινοβολίας (2η) [45]

ΕΙΚΟΝΑ 2.3 : Διαγράμματα SWR/ref και Gain/FB για συχνότητα 12.5MHz [47]

ΕΙΚΟΝΑ 2.4: Αντίσταση Εισόδου και Φάση [48]

ΕΙΚΟΝΑ 3.1 : Κάθετη Κεραία Πειράματος [52]

ΕΙΚΟΝΑ 3.2: Διάγραμμα πραγματικού (R) και φανταστικού (X) σε συναρτηση με τη συχνότητα[53]

ΕΙΚΟΝΑ 3.3 : Διάγραμμα Group Delay Σε Συνάρτηση Με Τη Συχνότητα[54]

ΕΙΚΟΝΑ 3.4 : Διάγραμμα S11 Φάσης σε συνάρτηση με τη συχνότητα[56]

ΕΙΚΟΝΑ 3.5 Διάγραμμα Quality Factor [57]

ΕΙΚΟΝΑ 3.6 : Διάγραμμα S11  $R + jX(\Omega)$ [58]

ΕΙΚΟΝΑ 3.7: Διάγραμμα S11 Real / Imaginary[59]

ΕΙΚΟΝΑ 3.8 Διάγραμμα Return Loss σε Συνάρτηση με τη Συχνότητα[60]

ΕΙΚΟΝΑ 3.9 Διάγραμμα S11 Serial C (f) [61]

ΕΙΚΟΝΑ 3.10: Διάγραμμα Serial L (H) [62]

ΕΙΚΟΝΑ 3.11: Διάγραμμα Χαρτη Smith[63]

ΕΙΚΟΝΑ 3.12 : Διάγραμμα  $|S_{11}|$  ( Απόλυτου Συντελεστή Ανάκλασης)[64]

ΕΙΚΟΝΑ 3.13 Διάγραμμα S11 VSWR[65]

ΕΙΚΟΝΑ 3.14 :Διάγραμμα S11  $|Z|$ [66]

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η κεραία τύπου end-fed vertical αποτελεί μια σημαντική τεχνολογία στον χώρο της ραδιοεπικοινωνίας. Είναι ευρέως διαδεδομένη τόσο στους ραδιοερασιτέχνες όσο και στους επαγγελματίες, λόγω της απλής κατασκευής, της ευκολίας εγκατάστασης και της ικανότητάς της να λειτουργεί σε διάφορες συχνότητες χωρίς την ανάγκη για πολλές προσαρμογές. Η δημιουργία μιας τέτοιας κεραίας απαιτεί μόνο ένα απλό σύρμα και έναν μετασχηματιστή προσαρμογής, ενώ η κάθετη διάταξή της επιτρέπει την αποτελεσματική λήψη και εκπομπή σημάτων σε διάφορα περιβάλλοντα. Παρότι είναι απλή και ευέλικτη, υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις στην κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοσή της.

### **Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας**

Το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η εις βάθος μελέτη και ανάλυση της κεραίας end-fed vertical. Η εργασία θα επικεντρωθεί στην κατανόηση των θεωρητικών αρχών λειτουργίας της, στην εξέταση των τεχνικών χαρακτηριστικών και της απόδοσής της, καθώς και στην ανάλυση των αποτελεσμάτων από την προσομοίωση της στο πρόγραμμα 4NEC2. Επιπλέον, θα υλοποιηθεί σε κατασκευαστικό πλαίσιο η κεραία της προσομοίωσης καθώς θα γίνει και ανάλυση των απολεσμάτων.

### **Σκοπός και στόχοι**

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να παρέχει μια ολοκληρωμένη κατανόηση της λειτουργίας και της απόδοσης της κεραίας end-fed vertical. Οι στόχοι της εργασίας μέσω από το θεωρητικό υπόβαθρο είναι η υλοποίηση της κεραίας στο κομμάτι της προσομοίωσης μέσω του λογισμικού αλλά και η πειραματική κατασκευή της.

### **Μεθοδολογία**

Η μεθοδολογία της διπλωματικής εργασίας αποτελείται από την μελέτη βιβλίων και άρθρων με τρόπο ώστε να καλύπτεται το σημαντικότερο θεωρητικό υπόβαθρο διπλωματικής. Στην συνέχεια γίνεται εκτενής ανάλυση του λογισμικού 4NEC2 μέσω του οποίου θα γίνει η προσομοίωση της end-fed κάθετης κεραίας. Έπειτα από τον συνδυασμό του θεωρητικού κομματιού και της κατασκευής της κεραίας προκύπτουν τα συμπεράσματα της ανάλυσης.

### **Καινοτομία**

Η καινοτομία αυτής της διπλωματικής εργασίας έγκειται στην προσέγγιση που συνδυάζει θεωρητική ανάλυση, πειραματική μελέτη και υπολογιστική προσομοίωση για την πλήρη κατανόηση και βελτιστοποίηση της απόδοσης της κεραίας end-fed vertical. Η εργασία θα προτείνει επίσης νέες μεθόδους σχεδίασης και εγκατάστασης για τη βελτίωση της λειτουργικότητας της κεραίας σε διάφορες εφαρμογές, όπως η βελτιστοποίηση του μήκους του σύρματος και των συνθηκών γείωσης για καλύτερη απόδοση σε συγκεκριμένες συχνότητες.

### **Δομή**

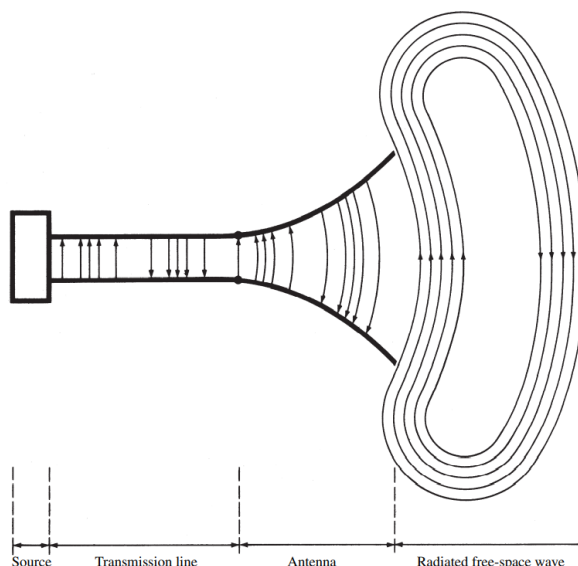
Η δομή της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται σε κεφάλαια και υποκεφάλαια, αναλύοντας την βασική θεωρία παραμέτρων κεραίας. Επιπλέον πραγματοποιείται και ανάλυση διαφόρων τύπων κεραιών και ιδιαίτερα στις κάθετες κεραιές βραχέων κυμάτων. Επιπρόσθετα, υπάρχουν πολλά διαγράμματα και πίνακες όπου απαιτείται για την καλύτερη κατανόηση της εκάστοτε θεωρίας.

## 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : ΚΕΡΑΙΕΣ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι θεμελιώδεις έννοιες που σχετίζονται με τις κεραίες και τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που αποτελούν τη βάση των ασύρματων επικοινωνιών. Αρχικά, παρουσιάζεται ο ορισμός της κεραίας, συνοδευόμενος από μια σύντομη ιστορική επισκόπηση που εξετάζει την εξέλιξη των κεραιών παράλληλα με την ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας διαχρονικά. Έπειτα, παρέχονται ορισμοί και εξηγήσεις σχετικά με το πεδίο ακτινοβολίας και τις μετρικές απόδοσης των κεραιών. Το κεφάλαιο αυτό τελειώνει με την ανάλυση της κεραίας ως ολοκληρωμένου συστήματος που αλληλεπιδρά με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και εξηγεί τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί μέσα σε αυτό το πλαίσιο.

### 1.1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

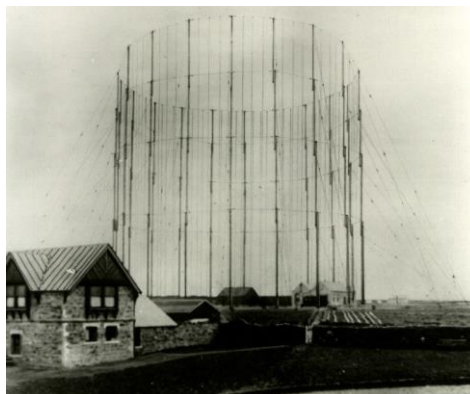
Διάφορες μέθοδοι περιγραφής κεραιών καταγράφονται στη βιβλιογραφία. Σύμφωνα με το λεξικό Webster, ο όρος "κεραία" περιγράφεται ως μια μεταλλική διάταξη που είναι κατάλληλη για εκπομπή ή λήψη ραδιοκυμάτων, ενώ το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) ορίζει την κεραία ως ένα μέσο κατάλληλο για εκπομπή ή λήψη ραδιοκυμάτων. Η κεραία, περιγραφικά, αποτελεί τον ενδιάμεσο κρίκο μεταξύ μιας διάταξης κυματοδότησης ή γραμμής μεταφοράς και του περιβάλλοντος χώρου. Μετατρέπει την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που διακινείται μέσω μιας γραμμής μεταφοράς ή ενός κυματοδηγού σε ηλεκτρομαγνητικό κύμα στον χώρο και αντίστροφα. Μια κεραία λειτουργεί ως πομπός όταν μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια από μια πηγή, μέσω μιας συνδεδεμένης γραμμής μεταφοράς ή κυματοδηγού, σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται στον ελεύθερο χώρο. Αντίθετα, λειτουργεί ως δέκτης όταν μετατρέπει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα από το περιβάλλον σε ηλεκτρικά σήματα στις γραμμές μεταφοράς ή στους κυματοδηγούς. Παρόλα αυτά, μια κεραία μπορεί να λειτουργεί ταυτόχρονα και ως πομπός και ως δέκτης.



ΕΙΚΟΝΑ 1.1: Η κεραία ως μεταβατική διάταξη μεταξύ πηγής και ελεύθερου χώρου

### 1.1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η ιστορική εξέλιξη των κεραιών ξεκινά από τον James Clerk Maxwell ο οποίος κατάφερε να θεμελιώσει τις έννοιες του ηλεκτρομαγνητισμού μέσω σημαντικών εξισώσεων γνωστές και ως εξισώσεις του Maxwell καθώς και το έργο του πάνω στον ηλεκτρομαγνητισμό δημοσιεύτηκε το 1873. Επιπλέον απέδειξε ότι το φως είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό φαινόμενο και ότι τόσο το φως όσο και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται μέσω κυματικών διαταραχών της ίδιας ταχύτητας. Το 1886, ο καθηγητής Heinrich Rudolph Hertz επιβεβαίωσε πειραματικά την ύπαρξη αυτών των κυμάτων και απέδειξε τη μετάδοση και τη λήψη τους όταν κατάφερε να παράξει σπινθήρα σε μήκος κύματος 4m στο διάκενο διπολικής κεραίας. Συγκεκριμένα, καθοριστικό ρόλο έπαιξε ο Guglielmo Marconi στις 12 Δεκεμβρίου του 1901 στην ανάπτυξη της ασύρματης επικοινωνίας, ο οποίος πραγματοποίησε την πρώτη διατλαντική μετάδοση μεταξύ Μεγάλης Βρετανίας και Βόρειας Αμερικής χρησιμοποιώντας για κεραιές εκπομπής και λήψης κατακόρυφα σύρματα μεγάλου ύψους. Ο Marconi δημιούργησε έναν πομπό υψηλής ισχύος στο Poldhu, ο οποίος παρήγαγε ηλεκτρομαγνητικά κύματα με τη μορφή σημάτων κώδικα Μορς. Ο πομπός ήταν εξοπλισμένος με μια κεραία που υποστηριζόταν από χαρταετό, σχεδιασμένη να εκπέμπει τα σήματα στην ατμόσφαιρα. Το μήνυμα, που μεταδόθηκε με κώδικα Μορς, έδειξε ότι τα ασύρματα σήματα θα μπορούσαν πράγματι να διασχίσουν τον Ατλαντικό Ωκεανό, ανοίγοντας νέες δυνατότητες για παγκόσμια επικοινωνία. Από την εποχή του Marconi μέχρι το 1940, η τεχνολογία των κεραιών επικεντρώθηκε σε συχνότητες έως UHF και σε συρμάτινα στοιχεία ακτινοβολίας. Στον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο παρατηρήθηκε γρήγορη ανάπτυξη της τεχνολογίας των κεραιών, καθώς και η εύρεση νέων στοιχείων ακτινοβολίας (όπως χοάνες, ανακλαστήρες, ανοίγματα κυματοδηγών). Καθοριστικός παράγοντας στην τεχνολογία των κεραιών ήταν η εφεύρεση μικροκυματικών πηγών, όπως klystron και magnetron, με συχνότητες άνω του 1 GHz. Από τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο και μετά άρχισαν να υλοποιούνται και άλλοι τύποι στοιχείων ακτινοβολίας, γεγονός που κατέστησε την ανάγκη για καλύτερη κατανόηση και βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας τους με αποτέλεσμα να εμφανίζονται και τα ραντάρ. Το 1950 παρατηρείται εντυπωσιακή πρόοδος η οποία αύξησε το μέγιστο εύρος ζώνης των κεραιών με αποτέλεσμα να προσδιορίζονται από γωνίες και όχι από γεωμετρικές διαστάσεις. Για αυτό το λόγο χαρακτηρίζονται ως ανεξάρτητες από τη συχνότητα. Οι κεραιές αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως 10-10.000 MHz και σε εφαρμογές όπως η τηλεόραση, επικοινωνίες κ.α. Έπειτα από δύο δεκαετίες, το 1970, έντονο ενδιαφέρον βρίσκουν οι ταινίες μικροταινίας (microstrip ή patch antennas). Έγιναν ζωτικής σημασίας για εφαρμογές σε φορητές συσκευές επικοινωνίας και άλλα συμπαγή ηλεκτρονικά συστήματα.

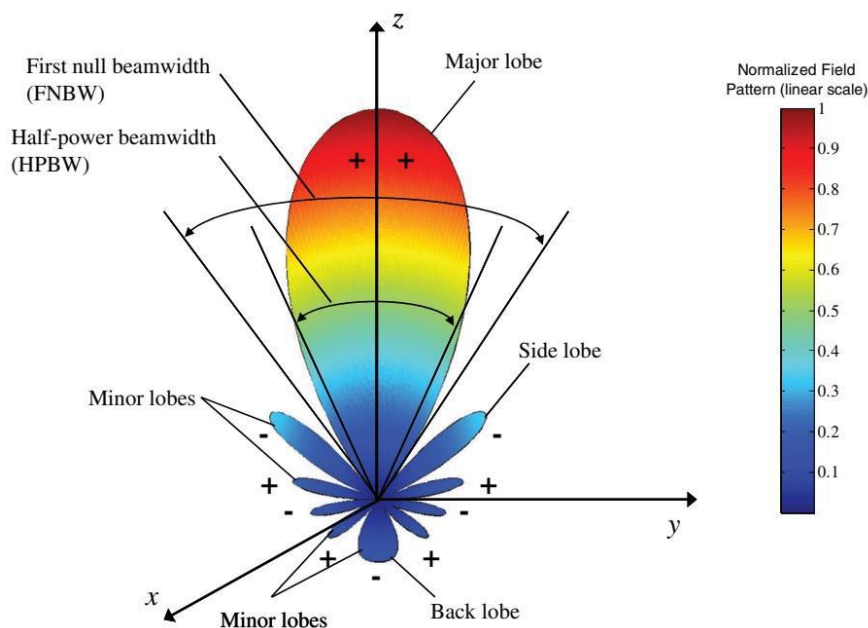


ΕΙΚΟΝΑ 1.2: The Marconi Company first antenna system at Poldhu, Cornwall, December 1901

### 1.2.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραίας είναι η γραφική απεικόνιση των ιδιοτήτων ακτινοβολίας της κεραίας σε σχέση με τις χωρικές συντεταγμένες. Συνήθως, το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας προσδιορίζεται στην περιοχή του μακρινού πεδίου. Επιπλέον, οι ιδιότητες ακτινοβολίας περιλαμβάνουν την πυκνότητα ροής ισχύος, την ένταση ακτινοβολίας, την ένταση του πεδίου, την κατευθυντικότητα και την πόλωση. Τα διαγράμματα ακτινοβολίας διακρίνονται σε διάγραμμα πλάτους του πεδίου και σε διάγραμμα ισχύος, το οποίο παρουσιάζεται είτε σε λογαριθμική κλίμακα είτε σε decibel.

Το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας κεραίας περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους λοβούς. Οι λοβοί αυτοί διακρίνονται σε κύριους ή μέγιστους λοβούς (Major Lobe), δευτερεύοντες λοβούς (Minor Lobe), πλευρικούς λοβούς (Side Lobe) και οπίσθιους λοβούς (Back Lobes). Ο κύριος λοβός είναι εκείνος που περιέχει τη διεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας. Οι δευτερεύοντες λοβοί είναι όλοι οι λοβοί εκτός του κύριου. Ο πλευρικός λοβός είναι αυτός που έχει διεύθυνση διαφορετική από την επιθυμητή και συνήθως βρίσκεται κοντά στον κύριο λοβό. Ο οπίσθιος λοβός σχηματίζει γωνία περίπου  $180^\circ$  από τον κύριο λοβό. Συνήθως, οι πλευρικοί λοβοί είναι μεγαλύτεροι από τους δευτερεύοντες και στάθμες πλευρικών λοβών  $-20$  dB ή μικρότερες θεωρούνται μη αποδεκτές.



ΕΙΚΟΝΑ 1.3: Διάγραμμα Ακτινοβολίας Κεραίας

### 1.2.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΕΔΙΟΥ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Στον ελεύθερο περιβάλλοντα χώρο γύρω από μια ακτινοβολούσα κεραία, θεωρητικά διακρίνονται τρεις περιοχές. Η πρώτη περιοχή, που ξεκινά από το κέντρο της ακτινοβολίας, ονομάζεται αντιδρών κοντινό πεδίο. Η δεύτερη περιοχή, καθώς αυξάνεται η απόσταση από το κέντρο, αναφέρεται ως κοντινό πεδίο ακτινοβολίας ή ζώνη Fresnel. Η τρίτη περιοχή, γνωστή και ως περιοχή Fraunhofer, χαρακτηρίζεται ως μακρινό πεδίο ακτινοβολία.

Η απόσταση του κοντινού αντιδρών πεδίου γύρω από την κεραία ορίζεται ως εξής:

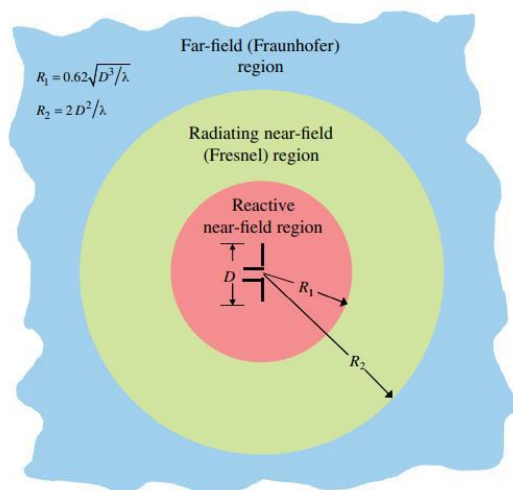
$$R_1 = 0.62\sqrt{\frac{2D^2}{\lambda}}$$

Όπου R είναι η απόσταση από την κεραία, D είναι η μεγαλύτερη διάσταση της κεραίας, λ είναι το μήκος κύματος. Επίσης το D πρέπει να είναι μεγάλο συγκριτικά με το μήκος κύματος λ (D>λ).

Η δεύτερη απόσταση που περιλαμβάνει το κοντινό πεδίο ακτινοβολίας γύρω από μια κεραία ορίζεται ως:

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda}$$

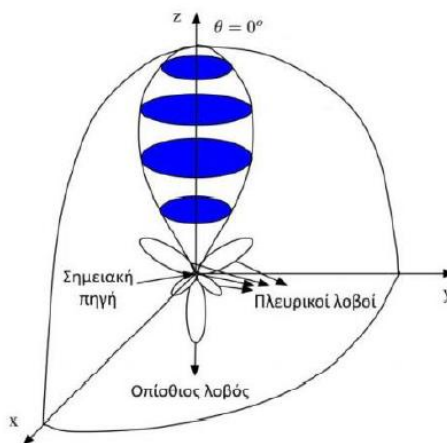
Οτιδήποτε πέρα από την περιοχή του κοντινού πεδίου, ορίζεται ως μακρινό πεδίο, στο οποίο πραγματοποιούνται και οι περισσότερες παρατηρήσεις.



ΕΙΚΟΝΑ 1.4: Περιοχές Ή Ζώνες Πεδίου Μιας Κεραίας

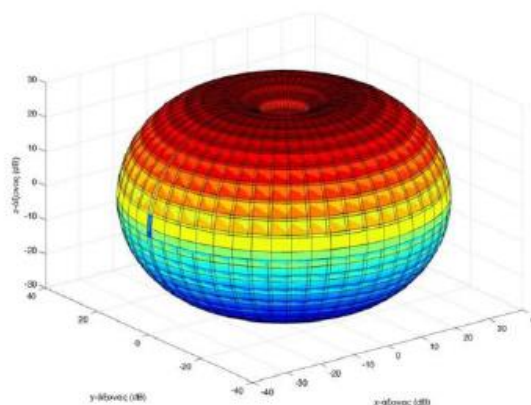
Ο τρόπος με τον οποίο περιγράφεται μαθηματικά η ακτινοβολία μιας κεραίας σε σχέση με τις χωρικές συντεταγμένες στην περιοχή του μακρινού πεδίου είναι μέσω της γραφικής απεικόνισης του διαγράμματος ακτινοβολίας. Παρατηρώντας ένα τέτοιο διάγραμμα, μπορούμε να εξάγουμε σημαντικά συμπεράσματα για τις ιδιότητες του ακτινοβολουμένου πεδίου, με την ένταση ακτινοβολίας να είναι μία από τις πιο σημαντικές. Αυτά τα διαγράμματα ισχύος είναι συνήθως τρισδιάστατα και απεικονίζονται σε μονάδες dB σε συνάρτηση με τις γωνιακές συντεταγμένες θ και φ.





ΕΙΚΟΝΑ 1.5 :Διάγραμμα ακτινοβολίας

Ο κύριος λοβός και η κατεύθυνσή του στα διαγράμματα ακτινοβολίας διακρίνονται εύκολα από το μέγεθός τους. Ο κύριος λοβός περιλαμβάνει τη διεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας. Οι πλευρικοί λοβοί και οι κατευθύνσεις τους σε ένα τέτοιο διάγραμμα θα πρέπει να παραμένουν σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα, της τάξεως των -20 dB έως -30 dB σε σχέση με τον κύριο λοβό. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να εμφανιστούν λοβοί σε άλλες κατευθύνσεις με σημαντικό ποσοστό ακτινοβολίας. Αυτοί οι λοβοί ονομάζονται δευτερεύοντες. Επίσης, σε ένα διάγραμμα ακτινοβολίας εμφανίζεται ο οπίσθιος λοβός, ο οποίος βρίσκεται σε αντίθετη κατεύθυνση από τον κύριο λοβό.



ΕΙΚΟΝΑ 1.6 :Ομοιοκατευθυντική κεραία στο αζιμουθιακό επίπεδο (xy) και κατευθυντική στο επίπεδο ανύψωσης (xz)

### 1.2.3 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ - ΕΝΤΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η πυκνότητα ισχύος είναι μέγεθος το οποίο δίνεται για την περιγραφή της ισχύος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων απο τη στιγμή που θεωρούνται φορείς ισχύος και ενέργειας. Το διάνυσμα Poynting χρησιμοποιείται για να περιγράψουμε την πυκνότητα ισχύος. Επιπλέον, περιγράφει την στιγμιαία ροή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας και οι μονάδες μέτρησης που έχει είναι (W/m<sup>2</sup>). Μαθηματικά μπορεί να οριστεί ως το γινόμενο στιγμιαίας τιμής έντασης του ηλεκτρικού E και του μαγνητικού H πεδίου:

$$W = E \times H$$

Όπου  $W$  είναι το στιγμιαίο διάνυσμα Poynting σε ( $W/m^2$ ),  $E$  η στιγμιαία ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε ( $V/m$ ),  $H$  η στιγμιαία ένταση του μαγνητικού πεδίου σε ( $A/m$ ).

Η μέση τιμή του διανύσματος Poynting αντιπροσωπεύει την μέση πυκνότητα ισχύος που εκπέμπεται από μια κεραία. Με αυτήν την τιμή μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση ισχύ που εκπέμπεται. Συγκεκριμένα, η μέση τιμή του διανύσματος Poynting εκφράζει πόση ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας διέρχεται μέσα από μια συγκεκριμένη περιοχή σε μια χρονική περίοδο.

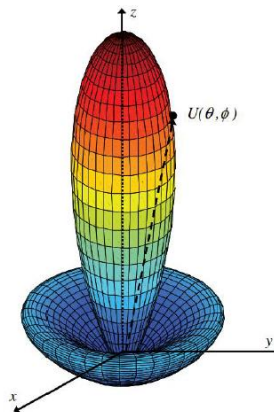
$$\bar{P}_{av}(\vec{r}) = \frac{1}{2} \text{Re}\{E(\vec{r}) \times \bar{H}(\vec{r})^*\}$$

Επίσης, η μέση ισχύς  $W_{rad}$  που εκπέμπεται από μια κεραία σε μια κλειστή επιφάνεια  $S$  υπολογίζεται :

$$W_{rad} = \iiint_S \bar{P}_{av}(\vec{r}) d\bar{S}$$

Το μέτρο της μέσης πυκνότητας ισχύος που ακτινοβολείται από μια κεραία ως συνάρτηση της κατεύθυνσης στόχου μπορεί να παρουσιαστεί χρησιμοποιώντας διαγράμματα ισχύος. Εντός του απομακρυσμένου πεδίου ακτινοβολίας, η ένταση της ακτινοβολίας εκφράζεται σε μονάδες ( $W/μονάδα$  στερεάς γωνίας) και προσδιορίζεται πολλαπλασιάζοντας τη μέση τιμή πυκνότητας ισχύος με το τετράγωνο της απόστασης  $r$  σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση.

$$U(\theta, \phi) = r^2 \bar{P}_{av}(\vec{r})$$



ΕΙΚΟΝΑ 1.7: Τρισδιάστατο Διάγραμμα Ισχύος Σε Γραμμική Κλίμακα

#### 1.2.4 ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΕΡΑΙΑΣ - ΕΥΡΟΣ ΔΕΣΜΗΣ

Η κατευθυντικότητα είναι μια επιπλέον σημαντική διάσταση της κεραίας. Η σχέση μεταξύ της έντασης ακτινοβολίας μιας κεραίας σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση και της μέσης έντασης ακτινοβολίας που εκπέμπει η κεραία προς όλες τις κατευθύνσεις είναι γνωστή ως κατευθυντικότητα. Η ένταση της ακτινοβολίας σε μια ισότροπη κεραία προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο αφού είναι ανεξάρτητη από τις γωνίες  $\theta$  και  $\phi$ .

$$U_o = \frac{P_{rad}}{4\pi}$$

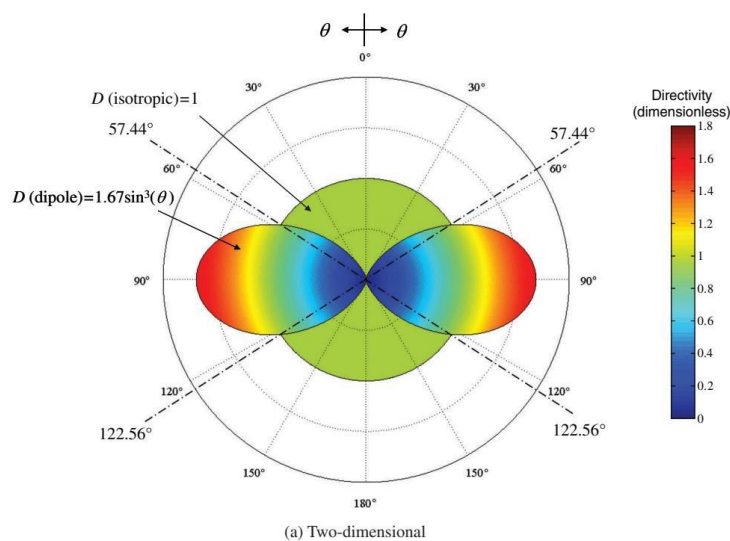
Στην παραπάνω σχέση, το  $P_{rad}$  συμβολίζει τη συνολική ακτινοβολούμενη ισχύς. Ως εκ τούτου, η κατευθυντικότητα μιας μη-ισοτροπικής κεραίας γίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$D = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi U}{P_{rad}}$$

Όταν δεν γίνεται αναφορά στην διεύθυνση, τότε θεωρούμε διεύθυνση μέγιστης έντασης άρα και μέγιστη κατευθυντικότητα.

$$D = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}}$$

Συμβολίζουμε με  $D$  την κατευθυντικότητα,  $D_o$  είναι η μέγιστη κατευθυντικότητα,  $U$  σε (W/ανά μονάδα στερεάς γωνίας) είναι η ένταση ακτινοβολίας,  $U_{max}$  σε (W/ανά μονάδα στερεάς γωνίας) είναι η μέγιστη ένταση ακτινοβολίας,  $U_o$  σε (W/ανά μονάδα στερεάς γωνίας) είναι η ένταση ακτινοβολίας ισοτροπικής κεραίας,  $P_{rad}$  σε (W) είναι η συνολική ακτινοβολούμενη ισχύς.



ΕΙΚΟΝΑ 1.8 :Διάγραμμα κατευθυντικότητας διπόλου  $\lambda/2$

Η κατευθυντικότητα είναι ένα αδιάστατο μέγεθος και συνήθως εκφράζεται σε dBι σε σύγκριση με την ακτινοβολούμενη ένταση ισοτροπικού στοιχείου. Σε μια τρισδιάστατη ανάλυση του διαγράμματος ακτινοβολίας η ακτινοβολία χωρίζεται σε μεμονωμένες συνιστώσες  $D_\theta$  και  $D_\phi$  οπότε  $D_{max} = D_\theta + D_\phi$ .

Οι δυο αυτές συνιστώσες κατευθυντικότητας υπολογίζονται ως:

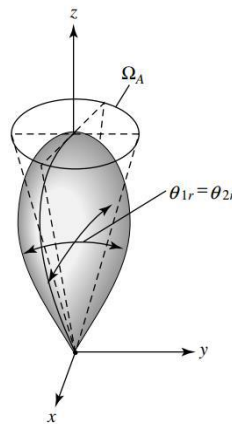
$$D\theta = \frac{4\pi U_{\theta}}{Wrad_{\theta} + Wrad_{\varphi}}$$

$$D\varphi = \frac{4\pi U_{\varphi}}{Wrad_{\theta} + Wrad_{\varphi}}$$

Για περιγραφή της κατευθυντικότητας μιας κεραίας, γίνεται χρήση ενός μεγέθους που ονομάζεται στερεά γωνία εύρους δέσμης. Η στερεά γωνία εύρους δέσμης είναι σημαντική όταν οι πλευρικοί λοβοί είναι αμελητέοι και ο κύριος λοβός είναι αρκετά στενός. Με άλλα λόγια, η στερεά γωνία εύρους δέσμης μας βοηθά να κατανοήσουμε πόσο συγκεντρωμένη είναι η ακτινοβολία της κεραίας στην κύρια κατεύθυνση της εκπομπής, παραβλέποντας τις ασθενέστερες ακτινοβολίες προς άλλες κατευθύνσεις. Επομένως, η μέγιστη κατευθυντικότητα εκφράζεται ως ακολούθως :

$$D_0 = \frac{4\pi}{\Omega_A} = \frac{4\pi}{\theta_{1r}\theta_{2r}}$$

Το  $\Omega_A$  είναι η στερεά γωνία δέσμης (Beam Solid Angle):  $\Omega_A \approx \theta_{1r}\theta_{2r}$

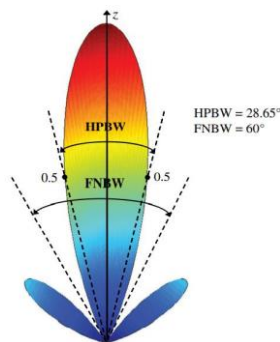


ΕΙΚΟΝΑ 1.9 : Στερεά γωνία δέσμης σε διάγραμμα ακτινοβολίας

Σε περίπτωση που το εύρος δέσμης είναι σε μοίρες τότε έχουμε τη μέγιστη κατευθυντικότητα να παίρνει την μορφή:

$$D_0 = \frac{41,253}{\theta_{1r}\theta_{2r}}$$

Καθοριστικό ρόλο παίζει στην ανάλυση κεραιών εξίσου και το **εύρος δέσμης (beamwidth)**. Το εύρος δέσμης μιας κεραίας ορίζεται από δύο ίδια σημεία τα οποία είναι αντίθετα στο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας. Σημαντικό παράγοντα έχει το εύρος ημισείας ισχύος 3dB (Half-Power Beamwidth-HPBW) το οποίο εκφράζει τη γωνία μεταξύ των δύο διευθύνσεων όπου η ένταση της ακτινοβολίας είναι η μισή της μέγιστης και το εύρος ζώνης πρώτου μηδενισμού (FNBW) το οποίο αναπαριστά την γωνιακή απόσταση μεταξύ των πρώτων σημείων που μηδενίζει η ενέργεια μετάδοσης της κεραίας.



ΕΙΚΟΝΑ 1.10 : Δισδιάστατο Διάγραμμα Ισχύος Σε Γραμμική Κλίμακα

Στον σχεδιασμό μιας κεραίας, διακρίνεται ότι η μείωση του εύρους ζώνης αυξάνει τη στάθμη των πλευρικών λοβών, ενώ το αντίθετο συμβαίνει όταν το εύρος ζώνης αυξάνεται. Επιπλέον, το εύρος του κύριου λοβού καθορίζει την ικανότητα της κεραίας να διακρίνει δύο πηγές ακτινοβολίας που βρίσκονται κοντά η μία στην άλλη. Με άλλα λόγια, ένας στενότερος κύριος λοβός επιτρέπει στην κεραία να διακρίνει καλύτερα δύο κοντινές πηγές, ενώ ένας ευρύτερος κύριος λοβός μπορεί να δυσκολεύει αυτή τη διάκριση.

### 1.2.5 ΑΠΟΔΟΣΗ ΔΕΣΜΗΣ ΚΑΙ ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ

Μία επιπλέον παράμετρος που μελετάται για την αξιολόγηση της ποιότητας μιας κεραίας είναι η απόδοση δέσμης (beam efficiency - BE). Αυτή η παράμετρος ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος που εκπέμπεται ή λαμβάνεται εντός μιας γωνίας κώνου  $\theta$ , για παράδειγμα, ώστε η απόδοση της δέσμης να αφορά το ποσοστό της ισχύος του κύριου λοβού, προς την συνολική ισχύ που εκπέμπεται ή λαμβάνεται από την κεραία.

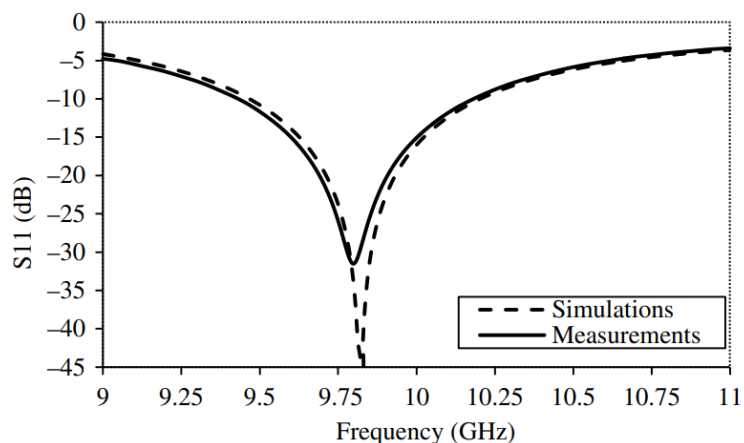
Το εύρος ζώνης (bandwidth) λειτουργίας μιας κεραίας καθορίζεται από το φάσμα των συχνοτήτων στις οποίες η κεραία παρουσιάζει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά για την εφαρμογή της, όπως η εμπέδηση εισόδου, το διάγραμμα ακτινοβολίας, το εύρος δέσμης, η πόλωση, τα επίπεδα των πλευρικών λοβών, η απολαβή, η κατεύθυνση της δέσμης και η απόδοση ακτινοβολίας. Συνήθως, το εύρος ζώνης υπολογίζεται από τη διαφορά μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης συχνότητας στις οποίες το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης  $S_{11}$  είναι μικρότερο από -10 dB.

$$BW = f_H - f_L$$

Αρκετές φορές είναι σημαντική η αναφορά του κλασματικού εύρους ζώνης, δηλαδή ο λόγος του εύρους ζώνης προς την κεντρική συχνότητα συντονισμού.

$$BW' = \frac{BW}{f_c} = \frac{f_H - f_L}{f_c}$$

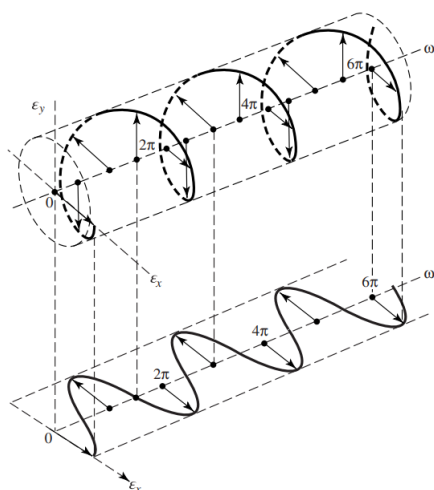
Η παραπάνω σχέση μπορεί να εκφραστεί και ως ποσοστό (%).



ΕΙΚΟΝΑ 1.11 : Διάγραμμα παραμέτρων S11

### 1.2.6 ΠΟΛΩΣΗ ΚΕΡΑΙΩΝ - ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΠΟΛΩΣΗΣ

Η πόλωση μιας κεραίας αφορά την πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που εκπέμπεται ή λαμβάνεται από αυτήν. Συγκεκριμένα, περιγράφει την τροχιά που διαγράφει το άκρο του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου και την κατεύθυνση που διαγράφεται σε μια συγκεκριμένη χωρική θέση στο χρόνο. Σε ένα σημείο που βρίσκεται στο μακρινό πεδίο της κεραίας, η πόλωση της εκπέμπουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι παρόμοια με ένα επίπεδο κύμα, του οποίου το πλάτος και η κατεύθυνση διάδοσης ταιριάζουν με την ένταση ακτινοβολίας του κύματος. Επιπλέον, η πόλωση του λαμβανόμενου κύματος είναι αυτή που εξασφαλίζει μέγιστη ισχύ στους ακροδέκτες της κεραίας. Ανάλογα με τις συνθήκες, ένα κύμα μπορεί να έχει γραμμική, κυκλική ή ελλειπτική πόλωση.



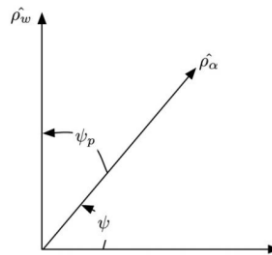
ΕΙΚΟΝΑ 1.12 : Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που διαγράφει το άκρο του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου

Γενικά, η πόλωση του δέκτη δεν συμπίπτει με αυτή του πομπού, με αποτέλεσμα η ισχύς που λαμβάνεται από την κεραία να μην είναι η μέγιστη δυνατή. Οι απώλειες που προκύπτουν όταν οι δύο πολώσεις διαφέρουν, δηλαδή όταν το προσπίπτον κύμα ακτινοβολίας έχει πόλωση σε μία κατεύθυνση ενώ η κεραία έχει πόλωση ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Τζανετοπούλου Πηνελόπη

σε άλλη κατεύθυνση, περιγράφονται από τον παράγοντα απωλειών πόλωσης (Polarization Loss Factor - PLF).

$$PLF = \left| \hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_\alpha \right|^2 = \left| \cos \psi_p \right|^2$$

Με  $\psi_p$  συμβολίζεται η γωνία μεταξύ των μοναδιαίων διανυσμάτων

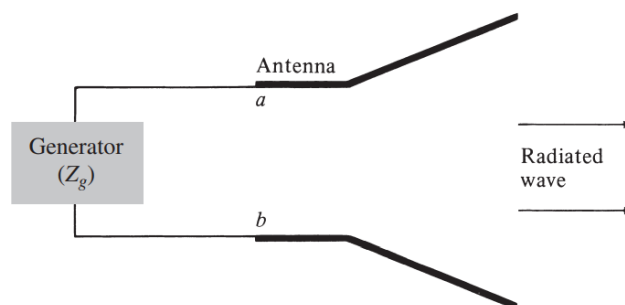


ΕΙΚΟΝΑ 1.13 Γωνία Απωλειών Πόλωσης

Η μέγιστη τιμή του PLF είναι 1 όταν οι πολώσεις είναι πλήρως ευθυγραμμισμένες και 0 όταν η γωνία μεταξύ των δύο διανυσμάτων είναι 90 μοίρες.

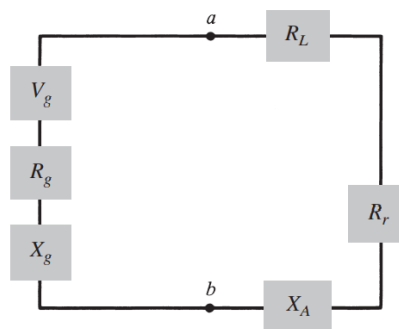
### 1.2.7 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΚΕΡΑΙΑΣ

Η χρήση ισοδύναμου κυκλώματος κεραίας οδηγεί σε αρκετά σημαντικά συμπεράσματα τα οποία σχετίζονται με την αντίσταση εισόδου, την απόδοση ακτινοβολίας και τις συνθήκες μέγιστης μεταφοράς ενέργειας από την γεννήτρια στην κεραία μέσω της γραμμής μεταφοράς. Η παρακάτω εικόνα επικεντρώνεται στους ακροδέκτες της κεραίας οι οποίοι συνδέονται με την εσωτερική γεννήτρια εμπέδωσης  $Z_g$ .



ΕΙΚΟΝΑ 1.14 Κεραία Σε Λειτουργία Εκπομπής

Το πάνω κύκλωμα κεραίας το οποίο φαίνεται να είναι σε λειτουργία εκπομπής μπορεί ισοδύναμα να απεικονιστεί από το παρακάτω ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin:



ΕΙΚΟΝΑ 1.15 Κατά Thevenin ισοδύναμο κύκλωμα

Εδώ, το  $R_r$  είναι μια παράμετρος που αντιπροσωπεύει την αντίσταση ακτινοβολίας της κεραίας, το  $R_L$  είναι η αντίσταση απωλειών της κεραίας,  $X_A$  η άεργη αντίσταση της κεραίας στους ακροδέκτες  $a, b$ ,  $V_g$  η μέγιστη τάση τους σήματος της γεννήτριας, το  $R_g$  είναι η ωμική αντίσταση της γεννήτριας και  $X_g$  η άεργη αντίδραση της εμπέδησης της γεννήτριας.

Η αντίσταση της ακτινοβολίας υπολογίζεται πειραματικά και είναι ένα χαρακτηριστικό που εξαρτάται από το φυσικό μέγεθος της κεραίας. Επίσης συμβάλει στο μέγεθος  $ecd$ .

Η μέγιστη ισχύς απορροφάται απο την κεραία όταν :

$$R_r + R_L = R_g$$

$$X_A = -X_g$$

Οι παραπάνω ισότητες ονομάζονται συνθήκες συζυγούς προσαρμογής.

Επομένως η κεραία τροφοδοτείται απο ισχύ  $P_s$  υπό συνθήκες συζυγούς προσαρμογής ως εξής:

$$P_s = \frac{|V_g|^2}{4} \left[ \frac{1}{R_r + R_L} \right]$$

Ενώ η κεραία προσλαμβάνει ισχύς  $P_c$  υπό συνθήκες συζυγούς προσαρμογής ως εξής:

$$P_s = \frac{|V_g|^2}{4} \left[ \frac{1}{R_r + R_L} \right]$$

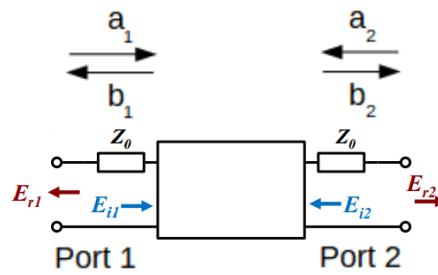
Λόγω της προσπίπτουσας ακτινοβολίας η οποία δημιουργείται στα άκρα  $ab$ , όπου  $V_T$  η ανάλογη  $V_g$ .

### 1.2.8 S-ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin του προηγούμενου υποκεφαλαίου μπορεί να ονομαστεί ως τετράπολο και μπορεί επίσης να αναγνωριστεί ως δίθυρο δεδομένων των δυο ακροδεκτών εισόδου και δυο ακροδεκτών εξόδου. Η συσχέτιση των παραπάνω παραδοχών μας επιτρέπει να σκεφτούμε το ισοδύναμο κύκλωμα μιας κεραίας ως ένα μαύρο κουτί που αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του



μόνο με τις θύρες εισόδου και εξόδου που κατέχει. Συνηθίζεται να εμφανίζεται σε κάθε πορτα αντίσταση μεγέθους  $Z_0 = 50 \text{ Ohm}$



S- Παράμετροι

Τα τετράγωνα των μεταβλητών  $a$  και  $b$  στο παραπάνω σχήμα αντιστοιχούν στην ισχύ  $E$  των προσπίπτοντων και ανακλώμενων κυμάτων. Αυτό σημαίνει ότι η ισχύς εισόδου στην είσοδο  $a_{12}$  η εισερχόμενη ισχύς στην είσοδο, η ισχύς εισόδου στην έξοδο  $a_{22}$ , η ανακλώμενη ισχύς στην είσοδο  $b_{12}$  και η ανακλώμενη ισχύς στην έξοδο  $b_{22}$  υπολογίζονται ως εξής:

$$a_1 = \frac{E_{i1}}{\sqrt{Z_0}}$$

$$a_2 = \frac{E_{i2}}{\sqrt{Z_0}}$$

$$b_1 = \frac{E_{r1}}{\sqrt{Z_0}}$$

$$b_2 = \frac{E_{r2}}{\sqrt{Z_0}}$$

Τα σήματα εισόδου και εξόδου θεωρούνται τώρα κύματα και όχι τιμές τάσης και ρεύματος. Αυτό δίνει τον ορισμό S παραμέτρων με  $S_{11}$  να είναι ο συντελεστής ανάκλασης εισόδου με προσαρμοσμένη έξοδο ή  $\Gamma$  όπως περιγράφεται στην σχέση,  $S_{21}$  να είναι ο συντελεστής κέρδους τάσης με προσαρμοσμένη έξοδο,  $S_{22}$  να είναι ο συντελεστής ανάκλασης εξόδου με προσαρμοσμένη είσοδο και  $S_{12}$  να είναι ο συντελεστής αναστροφής διάδοσης τάσης με προσαρμοσμένη είσοδο. Η παράμετρος  $S$  υπολογίζεται ως κάτωθι:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1}$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2}$$

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2}$$

Οι παράμετροι S είναι ένας σημαντικός τρόπος μοντελοποίησης ηλεκτρονικών διατάξεων, επειδή μπορούν εύκολα να μετρηθούν και να χρησιμοποιηθούν σε προσομοιωτές κυκλωμάτων ραδιοσυχνότητας RF.

### 1.2.9 ΚΕΡΔΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΕΡΑΙΑΣ

Το κέρδος  $G_g$  μιας κεραίας αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ της ισχύος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση και της ισχύος εισόδου  $P_{in}$  που τροφοδοτεί την κεραία. Η σχέση που περιγράφει το κέρδος  $G_g$  είναι η ένταση της ακτινοβολίας διαιρεμένη με την ισχύ  $P_{in}$  που τροφοδοτεί την κεραία.

$$G_g(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}}$$

Η συνάρτηση κέρδους ισχύος (Power Gain) συνδυάζει την ποιότητα τροφοδοσίας της κεραίας και αναφέρεται στην κατεύθυνση μέγιστης ακτινοβολίας. Συνήθως, η μονάδα μέτρησης του κέρδους είναι το dBi. Η συνολική ακτινοβολούμενη ισχύς, που συμβολίζεται είτε ως  $P_{rad}$  είτε ως  $P_{rad}$ , εξαρτάται από τη συνολική ισχύ εισόδου  $P_{in}$ , σύμφωνα με την εξίσωση:

$$P_{rad} = e_{cd} P_{in}$$

Η μέγιστη τιμή της απολαβής σχετίζεται άμεσα με την κατευθυντικότητα και με τις παραπάνω δύο σχέσεις έχουμε:

$$G_{max}(\theta, \varphi) = e_{cd} D_o$$

Ο όρος  $e_{cd}$ , αντιστοιχεί στο γινόμενο της απόδοσης λόγω της πεπερασμένης αγωγιμότητας μιας κεραίας ( $e_c$ ) και της διηλεκτρικής απόδοσης ( $e_d$ ). Τα μεγέθη υπολογίζονται βάση πειράματος και είναι αδιάστατα. Όσον αφορά την σχέση  $G_{max}(\theta, \varphi) = e_{cd} D_o$ , ισχύει όταν η κεραία τροφοδοτείται με τέλεια προσαρμογή χωρίς απώλειες μεταξύ της γραμμής μεταφοράς ή του κυματοδηγού και της κεραίας. Ωστόσο, όταν η απόδοση είναι ρεαλιστική και υλοποίηση, χρήζει να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς και η απόδοση λόγω ανάκλασης, δηλαδή η απόδοση που αναφέρεται στην κακή προσαρμογή ( $e_r$ ).

$$e_r = (1 - |\Gamma|^2)$$

Ο συντελεστής ανάκλασης της τάσης εισόδου της κεραίας ορίζεται με  $\Gamma$  και είναι ο λόγος:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o}$$

όπου  $Z_{in}$  και  $Z_0$  είναι η αντίσταση εισόδου της κεραίας και η αντίσταση της γραμμής μεταφοράς, αντίστοιχα.

Επίσης ο λόγος στάσιμων κυμάτων  $VSWR$ , όπου είναι λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη τιμή του κύματος στη γραμμή μεταφοράς, είναι η παρακάτω σχέση:

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

Όταν έχουμε τέλεια προσαρμογή ο λόγος  $VSWR$  ισούται με 1 δηλαδή η τιμή του συντελεστή ανάκλασης  $\Gamma$  είναι 0.

Είναι σαφές ότι μπορεί να γίνει ανάλυση του κέρδους σε επιμέρους απολαβές ως προς τις ορθογώνιες συνιστώσες  $\theta$  και  $\varphi$ , και είναι μέγιστο στη διεύθυνση της μέγιστης ακτινοβολίας. Η ισχύς που εκπέμπεται από μια κεραία καθορίζεται από τον συντελεστή απόδοσης ( $\epsilon_0$ ), η οποία μπορεί να έχει συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η ιδιότητα αυτή περιγράφεται με την Ισοδύναμη Ισοτροπικά Ακτινοβολούμενη Ισχύ (EIRP), όπου το κέρδος ισχύος σχετίζεται με την ισοτροπική πηγή στην κατεύθυνση που είναι μέγιστο και πολλαπλασιάζεται με την ακτινοβολούμενη ισχύ.

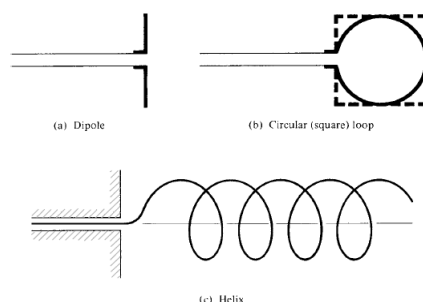
$$EIRP(\theta, \varphi) = P_{rad} G_{max}$$

### 1.3 ΔΙΑΦΟΡΟΙ ΤΥΠΟΙ ΚΕΡΑΙΩΝ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ

Σε αυτήν την υποενότητα θα παρουσιαστούν συνοπτικά διάφοροι τύποι κεραίων, με στόχο ο αναγνώστης να αποκτήσει μια ευρεία εικόνα για τα διάφορα είδη κεραίων που υπάρχουν. Ειδικότερα, θα αναφερθούμε στις κάθετες κεραίες βραχέων κυμάτων.

#### ΚΕΡΑΙΕΣ ΣΥΡΜΑΤΟΣ (WIRE ANTENNA)

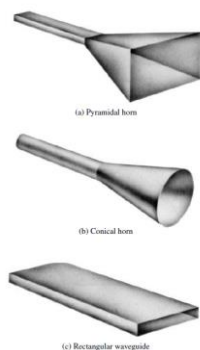
Οι κεραίες σύρματος είναι οι πιο διαδεδομένες, καθώς βρίσκονται σχεδόν παντού, όπως σε αυτοκίνητα, κτίρια, πλοία και αεροπλάνα. Υπάρχουν διάφορες μορφές κεραίων σύρματος, όπως το ευθύγραμμο σύρμα (δίπολο), ο βρόχος και ο ελικοειδής.



ΕΙΚΟΝΑ 1.16 Μορφές Κεραίων Σύρματος

#### ΚΕΡΑΙΕΣ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ( APERTURE ANTENNAS)

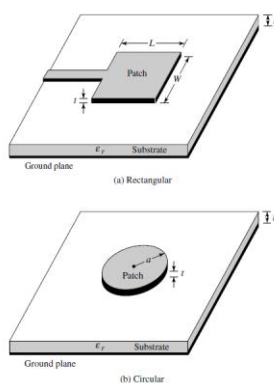
Τις τελευταίες δεκαετίες οι κεραίες ανοίγματος έχουν λόγω της αποδοτικότητάς τους σε υψηλές συχνότητες σε πολύπλοκες εφαρμογές. Συγκεκριμένα, είναι κατάλληλες σε διαστημικές εφαρμογές. Οι μορφές κεραίων ανοίγματος είναι η πυραμιδοειδής χωάνη, η κωνική χωάνη και ο ορθογώνιος κυματοδότης.



ΕΙΚΟΝΑ 1.17 : Μορφές Κεραίων Ανοίγματος

### ΚΕΡΑΙΕΣ ΜΙΚΡΟΤΑΙΝΙΑΣ(MICROSTRIP ANTENNA)

Οι κεραιες μικροταινιας παλιότερα χρησιμοποιούνταν ιδιαίτερα σε διαστημικές εφαρμογές. Παρόλα αυτά σήμερα χρησιμοποιούνται σε κυβερνητικές και εμπορικές εφαρμογές. Αποτελούνται από μια λωρίδα επάνω σε γειωμένο υπόστρωμα. Η λωρίδα μπορεί να έχει διαφορές μορφές. Ωστόσο, οι λωρίδες ορθογώνιου και κυκλικού σχήματος είναι οι πιο διαδεδομένες, λόγω της ευκολίας τους στην ανάλυση και κατασκευή. Επιπλέον, έχουν διακριτική εμφάνιση, προσαρμόζονται σε επίπεδες και καμπύλες επιφάνειες, έχουν χαμηλό κόστος και κατασκευάζονται εύκολα με τη σύγχρονη τεχνολογία τυπωμένων κυκλωμάτων.

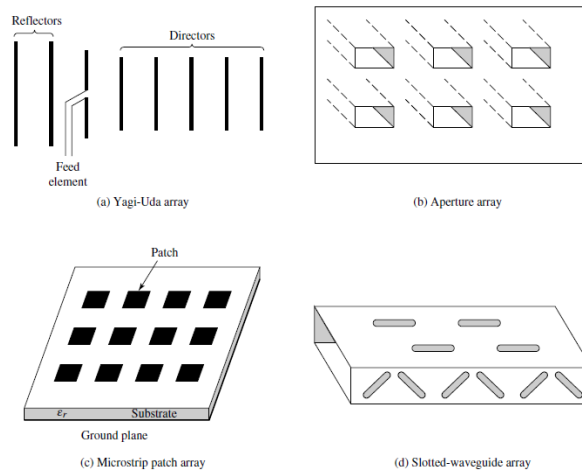


ΕΙΚΟΝΑ 1.18 Ορθογωνιες Και Κυκλικες Κεραιες Μικροταινιας.

### ΣΤΟΙΧΕΙΟΚΕΡΑΙΕΣ ( ARRAY ANTENNA)

Σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι αδύνατο να επιτευχθούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας με ένα μόνο ακτινοβολητή. Αυτές οι απαιτήσεις αντιμετωπίζονται με τη χρήση στοιχειοκεραίων. Οι στοιχειοκεραίες αποτελούνται από πολλούς όμοιους ακτινοβολητές που έχουν τον ίδιο προσανατολισμό και εκπέμπουν ή λαμβάνουν ταυτόχρονα. Η χρήση στοιχειοκεραίων προσφέρει βελτιωμένες ιδιότητες σε σύγκριση με αυτές ενός μεμονωμένου ακτινοβολητή. Συνήθως, ο όρος στοιχειοκεραία αναφέρεται σε διατάξεις όπου τα επιμέρους στοιχεία ακτινοβολίας είναι διακριτά, όπως φαίνεται στα σχήματα (a-c). Ωστόσο, ο ίδιος όρος χρησιμοποιείται γενικότερα για να περιγράψει ένα σύστημα ακτινοβολητών που λειτουργούν σε συνεχή δομή, όπως φαίνεται

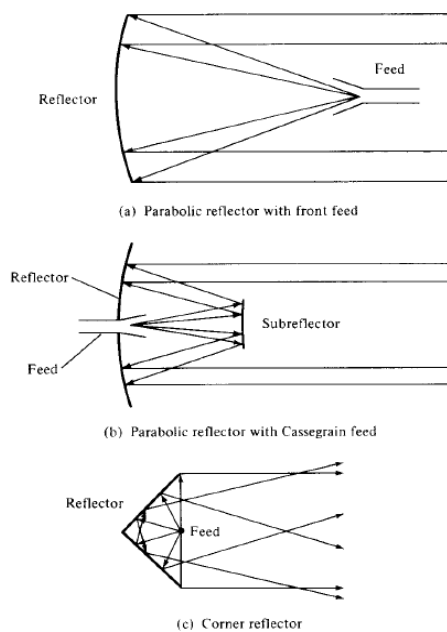
στο Σχήμα(d). Η κεραία που θα χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση του παρεμβολέα είναι παρόμοια του σχήματος (a), καθώς αποτελείται από πολλά στοιχεία διπόλων.



ΕΙΚΟΝΑ 1.19 Τυπικές Διατάξεις Στοιχειοκεραιων.

## ΚΕΡΑΙΕΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΑ

Οι επιτυχίες στην εξερεύνηση του διαστήματος έχουν δώσει σημαντική ώθηση στην ανάπτυξη της θεωρίας των κεραιών. Η ανάγκη για επικοινωνίες σε πολύ μεγάλες αποστάσεις έκανε επιτακτική τη χρήση προηγμένων τύπων κεραιών, ικανών να εκπέμπουν και να λαμβάνουν σήματα που καλύπτουν εκατομμύρια χιλιόμετρα.



ΕΙΚΟΝΑ 1.20 Τυπικές Μορφές Ανακλαστήρων

### 1.3.1 ΚΕΡΑΙΕΣ ΒΡΑΧΕΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΥΨΗΛΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (HF 3-30 MHz)

Συγκεκριμένα, οι κεραίες βραχέων κυμάτων λειτουργούν στην υψηλή συχνότητα (HF), που κυμαίνεται από 3 έως 30 MHz. Η μετάδοση σε αυτή τη ζώνη γίνεται κυρίως μέσω της ιονόσφαιρας. Δεδομένου ότι η ιονοσφαιρική μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις συνεπάγεται σημαντικές απώλειες και κινδύνους παρεμβολών, χρησιμοποιούνται κεραίες με υψηλό κέρδος και κατευθυντικότητα. Οι πιο σημαντικές παράμετροι σχεδίασης κεραιών στη ζώνη HF περιλαμβάνουν το εύρος ζώνης, το κέρδος ισχύος, την κατευθυντικότητα, τις γωνίες μισής ισχύος, τον λόγο στάσιμου κύματος, καθώς και άλλες μηχανικές και περιβαλλοντικές απαιτήσεις.

Η ανάλυση των HF κεραιών είναι μαθηματικά σύνθετη, ειδικά για πολύπλοκες γεωμετρικές διατάξεις, όπως αυτές που απαιτούν την επίλυση των εξισώσεων του Maxwell. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί λογισμικά προγράμματα, όπως το NEC, που μπορούν να προσομοιώνουν με μεγάλη ακρίβεια τη συμπεριφορά των κεραιών. Ένας παράγοντας που επηρεάζει την ανάλυση είναι η απόσταση της κεραίας από το έδαφος, καθώς επηρεάζει τη σύνθετη αντίσταση εισόδου και το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας. Για την ευκολία των υπολογισμών, το έδαφος συχνά θεωρείται ως τέλεια αγωγίμη επιφάνεια και χρησιμοποιείται η θεωρία ειδώλων. Η σύνθετη αντίσταση εισόδου δίνεται από τη σχέση:  $Z_{ant} = Z_f + mZ$ . Οι πόλωσεις των HF κεραιών είναι είτε κατακόρυφες είτε οριζόντιες.

Οι κεραίες βραχέων κυμάτων είναι σημαντικά στοιχεία στον τομέα των επικοινωνιών, κυρίως λόγω της ικανότητάς τους να μεταδίδουν και να λαμβάνουν σήματα σε μεγάλες αποστάσεις. Ανεξαρτήτως του τύπου της κεραίας, οι βραχές κεραίες χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς όπως οι επικοινωνίες εκτός πόλης, οι ραδιοερασιτεχνικές δραστηριότητες, η στρατιωτική επικοινωνία και η διάσωση σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Οι βραχείς κεραίες μπορούν να χωριστούν σε διάφορες κατηγορίες βάσει του σχεδιασμού και της λειτουργίας τους. Ορισμένοι τύποι κεραιών περιλαμβάνουν κάθετες κεραίες μονοπολικού σύρματος (monopole antennas), κάθετες κεραίες με γείωση (vertical antennas), κεραίες με τετραγωνικό ή ορθογώνιο στοιχείο (loop antennas) και κεραίες πολλαπλών στοιχείων (array antennas).

### 1.3.2 ΚΑΘΕΤΕΣ ΚΕΡΑΙΩΝ ΒΡΑΧΕΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Οι κάθετες κεραίες βραχέων κυμάτων είναι κρίσιμες για την επίτευξη μακρινών επικοινωνιών λόγω της ικανότητάς τους να εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε μεγάλες αποστάσεις. Η κάθετη διάταξή τους επιτρέπει τη μετάδοση και λήψη σημάτων με μεγάλη αποδοτικότητα. Ακολουθεί μια ανάλυση των κυριότερων τύπων κάθετων κεραιών βραχέων κυμάτων, μαζί με τα χαρακτηριστικά και τις εφαρμογές τους.

#### Κάθετη Κεραία Μονού Σύρματος (Monopole Antenna)

Η κάθετη κεραία μονού σύρματος είναι η απλούστερη μορφή κάθετης κεραίας και αποτελείται από έναν κάθετο αγωγό που τροφοδοτείται από τη βάση του. Αποτελείται από έναν απλό κάθετο αγωγό. Απαιτεί καλή γείωση ή αντίστοιχο δίκτυο radials για να λειτουργήσει αποδοτικά. Κάθετη πολωτικότητα, κατάλληλη για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων. Ιδανική για σταθερές εγκαταστάσεις, όπου μπορεί να εξασφαλιστεί καλή γείωση. Χρησιμοποιείται ευρέως σε σταθμούς ραδιοφωνίας και σε συστήματα επικοινωνιών HF (High Frequency).

#### Κάθετη Κεραία με Τετραγωνικό Δίκτυο Γείωσης (Vertical Antenna with Ground Radials)

Αυτή η κεραία είναι μια βελτιωμένη έκδοση της κάθετης κεραίας μονού σύρματος, που περιλαμβάνει ένα δίκτυο radials για να βελτιώσει την απόδοση και την αποδοτικότητα. Δίκτυο

Radials. Περιλαμβάνει πολλούς ακτινωτούς αγωγούς (radials) τοποθετημένους οριζόντια ή κεκλιμένα. Το δίκτυο radials βελτιώνει τη γείωση και την απόδοση της κεραίας. Παρέχει ομοιόμορφη ακτινοβολία σε όλες τις κατευθύνσεις. Χρησιμοποιείται σε σταθμούς ραδιοερασιτεχνών και εμπορικούς σταθμούς ραδιοφωνίας. Κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αποδοτικότητα και σταθερότητα σήματος.

### **Κάθετη Κεραία End-fed (End-fed Vertical Antenna)**

Η κάθετη κεραία end-fed είναι τροφοδοτούμενη από τη βάση της και συνήθως δεν απαιτεί δίκτυο radials. Μονοσήμαντη Τροφοδοσία: Τροφοδοτείται από το ένα άκρο, κάνοντάς την εύκολη στην εγκατάσταση. Μπορεί να εγκατασταθεί σε περιορισμένους χώρους λόγω της απλότητας της. Εξακολουθεί να απαιτεί καλή γείωση ή χρήση αντίστοιχου αντισταθμιστικού συστήματος. Κατάλληλη για φορητές και προσωρινές εγκαταστάσεις λόγω της απλότητας και της ευκολίας μεταφοράς της. Χρησιμοποιείται συχνά σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και από ραδιοερασιτέχνες που χρειάζονται γρήγορη εγκατάσταση.

### **Κάθετη Κεραία Μαστίγιο (Whip Antenna)**

Η κεραία μαστίγιο είναι μια συμπαγής, κάθετη κεραία που συνήθως χρησιμοποιείται σε κινητές εφαρμογές. Ευκολία Χρήσης: Ελαφριά και φορητή, ιδανική για χρήση σε οχήματα και φορητούς σταθμούς. Κατασκευασμένη από ευέλικτο υλικό που μπορεί να αντέξει τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Συμβιβάζεται σε απόδοση λόγω του μικρού της μεγέθους. Χρησιμοποιείται ευρέως σε κινητές επικοινωνίες, συμπεριλαμβανομένων στρατιωτικών και πολιτικών εφαρμογών. Ιδανική για οχήματα, πλοία και φορητές συσκευές επικοινωνίας.

Οι κάθετες κεραίες βραχέων κυμάτων προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά τη μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις και την κατευθυντικότητα των σημάτων. Οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοσή το μήκος, η γείωση, οι καιρικές συνθήκες και το υλικό της κεραίας.

Το μήκος της κεραίας επηρεάζει την αποδοτικότητα και την κατευθυντικότητα. Ιδανικά, το μήκος πρέπει να είναι κοντά στο μισό μήκος κύματος της συχνότητας λειτουργίας. Μια καλή γείωση ή ένα δίκτυο radials είναι κρίσιμο για την αποδοτική λειτουργία της κεραίας. Οι καιρικές συνθήκες καθώς και η τοπογραφία είναι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση αλλά και τη σταθερότητα του σήματος. Το υλικό της κεραίας επηρεάζει την αντοχή και την αποδοτικότητα της κεραίας σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Οι κάθετες κεραίες βραχέων κυμάτων είναι βασικά εργαλεία για την επίτευξη αξιόπιστων επικοινωνιών σε μεγάλες αποστάσεις. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου κάθετης κεραίας εξαρτάται από τις συγκεκριμένες ανάγκες και περιορισμούς της εφαρμογής. Είτε πρόκειται για σταθερές εγκαταστάσεις είτε για φορητές εφαρμογές, οι κάθετες κεραίες προσφέρουν την ευελιξία και την αποδοτικότητα που απαιτούνται για αποτελεσματικές επικοινωνίες βραχέων κυμάτων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΘΕΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ 4NEC2

Σε αυτό το κεφάλαιο, εξετάζουμε το λογισμικό 4NEC, ένα ισχυρό εργαλείο προσομοίωσης βασισμένο στο Numerical Electromagnetics Code (NEC), και τη χρήση του για την ανάλυση μιας κάθετης κεραίας βραχέων κυμάτων. Το 4NEC επιτρέπει την ακριβή μοντελοποίηση της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς των κεραιών, διευκολύνοντας την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών τους, όπως το διάγραμμα ακτινοβολίας, το κέρδος και η αντίσταση εισόδου. Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να παράσχει μια αναλυτική επισκόπηση των λειτουργιών του 4NEC και να παρουσιάσει τα βήματα της προσομοίωσης για τη συγκεκριμένη κεραία. Μέσω αυτής της διαδικασίας, επιδιώκουμε να βελτιστοποιήσουμε το σχεδιασμό της κεραίας, να προβλέψουμε την απόδοσή της και να εντοπίσουμε πιθανά σημεία βελτίωσης πριν την κατασκευή και τις πρακτικές μετρήσεις.

### 2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Το Numerical Electromagnetics Code (NEC) είναι ένα σημαντικό λογισμικό εργαλείο για τη μοντελοποίηση και την ανάλυση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, ειδικά για το σχεδιασμό και την ανάλυση κεραιών. Η ανάπτυξή του ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970 και συνεχίζεται μέχρι σήμερα, προσφέροντας βελτιώσεις και νέες δυνατότητες με κάθε νέα έκδοση. Η ανάπτυξη του NEC ξεκίνησε στο Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) στην Καλιφόρνια, με σκοπό τη δημιουργία ενός εργαλείου για τη προσομοίωση και ανάλυση της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς των κεραιών και άλλων δομών. Βασικός στόχος ήταν η ανάπτυξη μιας μεθόδου που θα μπορούσε να λύσει τις εξισώσεις του Maxwell για σύνθετες τρισδιάστατες δομές. Το NEC βασίζεται στη Μέθοδο των Στιγμών (MoM), μια αριθμητική τεχνική για την επίλυση ολοκληρωτικών εξισώσεων. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τη διακριτοποίηση της επιφάνειας της δομής σε μικρά τμήματα ή patches, μετατρέποντας το συνεχή πρόβλημα σε ένα σύνολο γραμμικών εξισώσεων που μπορούν να λυθούν υπολογιστικά.

Η πρώτη έκδοση, NEC-1, κυκλοφόρησε στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Σχεδιάστηκε κυρίως για κεραιές σύρματος και μπορούσε να χειριστεί περιορισμένο αριθμό τμημάτων. Γράφτηκε σε FORTRAN και χρησιμοποιήθηκε κυρίως από το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ και άλλους αμυντικούς οργανισμούς.

Το NEC-2 αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1980 ως βελτιωμένη έκδοση του NEC-1. Εισήγαγε πιο προηγμένους αλγορίθμους, βελτιωμένη ακρίβεια και διευρυμένες δυνατότητες, συμπεριλαμβανομένου του χειρισμού πιο σύνθετων δομών και μεγαλύτερου αριθμού τμημάτων. Το NEC-2 έγινε ευρέως αποδεκτό τόσο σε στρατιωτικές όσο και σε πολιτικές εφαρμογές, καθιστώντας το ένα στάνταρ εργαλείο για την ανάλυση κεραιών.

Το NEC-3 ήταν μια περαιτέρω αναβάθμιση που περιλάμβανε βελτιώσεις στη μοντελοποίηση των επιδράσεων του εδάφους και την προσθήκη νέων χαρακτηριστικών για τη διαχείριση πιο σύνθετων γεωμετριών. Δεν έγινε τόσο ευρέως αποδεκτό όσο το NEC-2, αλλά παρείχε σημαντικές βελτιώσεις για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Το NEC-4, που κυκλοφόρησε τη δεκαετία του 1990, αντιπροσώπευε μια σημαντική αναβάθμιση σε σχέση με τις προηγούμενες εκδόσεις. Περιλάμβανε μεγάλες βελτιώσεις στην ακρίβεια της μοντελοποίησης διηλεκτρικών υλικών, των επιφανειακών κυμάτων και των υπολογισμών κοντινού πεδίου. Το NEC-4 παρείχε επίσης καλύτερη υποστήριξη για σύνθετες γεωμετρίες και αλληλεπιδράσεις μεταξύ πολλαπλών δομών.



## 2.1.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ 4NEC2

Το 4NEC2 παρέχει μια πληθώρα εργαλείων και λειτουργιών που διευκολύνουν την ανάλυση και τον σχεδιασμό κεραιών, όπως:

- **Προσομοίωση ακτινοβολίας:** Μπορεί να προσομοιώσει την ακτινοβολία μιας κεραίας σε διάφορες συχνότητες και να παράγει διαγράμματα ακτινοβολίας σε 2D και 3D μορφή.
- **Υπολογισμός παραμέτρων SWR και Gain:** Το λογισμικό υπολογίζει τη σχέση στασίμων κυμάτων (SWR), την απόδοση της κεραίας (efficiency), καθώς και το κέρδος (gain) σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις.
- **Υποστήριξη διαφορετικών υλικών:** Παρέχει τη δυνατότητα να μοντελοποιηθούν κεραίες που αποτελούνται από διαφορετικά αγώγιμα υλικά και να εξεταστεί πώς αυτά επηρεάζουν την απόδοση.
- **Διαχείριση γειωδούς επιπέδου (ground plane):** Το 4NEC2 μπορεί να προσομοιώσει κεραίες με ή χωρίς γειωδές επίπεδο, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση της κεραίας με το έδαφος, και παρέχει εργαλεία για την προσαρμογή του.
- **Δυνατότητα εισαγωγής προσαρμοσμένων παραμέτρων:** Ο χρήστης μπορεί να ορίσει το μέγεθος της κεραίας, τις γωνίες και τις διαστάσεις των στοιχείων της, όπως και να προσαρμόσει τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Η ανάλυση των κεραιών στο 4NEC2 βασίζεται στην εισαγωγή ενός συνόλου γεωμετρικών και ηλεκτρικών παραμέτρων. Οι βασικές παράμετροι εισόδου περιλαμβάνουν:

- **Γεωμετρία της κεραίας:** Τοποθέτηση και μέγεθος των στοιχείων της κεραίας (αγωγοί, μήκος, γωνίες).
- **Συχνότητα λειτουργίας:** Καθορισμός των συχνοτήτων στις οποίες θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση.
- **Τύπος γειωδούς επιφάνειας:** Επιλογή μεταξύ ιδανικού ή πραγματικού εδάφους, το οποίο επηρεάζει την αγωγιμότητα και την αντανάκλαση των ραδιοκυμάτων.
- **Τροφοδοσία:** Ορισμός της πηγής ισχύος που τροφοδοτεί την κεραία και το σημείο στο οποίο εφαρμόζεται.

### Μέθοδος Υπολογισμού

Το 4NEC2 βασίζεται στην Μέθοδο των Στοιχείων των Ρευμάτων (Method of Moments), η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ηλεκτρικών ρευμάτων που δημιουργούνται στους αγωγούς της κεραίας από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Αυτή η μέθοδος διασπά τους αγωγούς της κεραίας σε μικρότερα τμήματα (segments) και υπολογίζει την κατανομή του ρεύματος σε κάθε τμήμα, επιτρέποντας ακριβείς υπολογισμούς για την απόδοση και την ακτινοβολία της κεραίας.

### Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Το 4NEC2 προσφέρει διάφορα είδη αποτελεσμάτων προσομοίωσης, όπως:

- **Διαγράμματα ακτινοβολίας:** Εμφανίζουν τον τρόπο διασποράς της ισχύος της κεραίας σε διάφορες κατευθύνσεις.
- **Υπολογισμός VSWR:** Το λογισμικό υπολογίζει τη σχέση στασίμων κυμάτων, η οποία δείχνει την προσαρμογή της κεραίας με το σύστημα τροφοδοσίας.
- **Απόδοση (Efficiency):** Υπολογίζεται η συνολική αποδοτικότητα της κεραίας, λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες ισχύος και τις αντανakλάσεις.
- **Ανάλυση ρευμάτων και τάσεων:** Δείχνει την κατανομή των ρευμάτων και των τάσεων κατά μήκος της κεραίας.

Η χρήση του 4NEC2 στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επιτρέπει την πλήρη προσομοίωση της κάθετης κεραίας  $\lambda/4$ , δίνοντας ακριβή στοιχεία για την απόδοσή της, πριν ακόμη την κατασκευή της. Επιπλέον, η δυνατότητα πειραματισμού με διαφορετικές διατάξεις radials, το μήκος των στοιχείων και η τοποθέτηση της κεραίας, δίνει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης της κεραίας για τη μέγιστη δυνατή απόδοση, προσαρμοσμένη στις ανάγκες της εφαρμογής.

Με το 4NEC2, μπορεί να γίνει ανάλυση και να διορθωθούν πιθανά προβλήματα ή ελλείψεις στη σχεδίαση, προτού προβεί στην κατασκευή της κεραίας, εξοικονομώντας χρόνο και πόρους.

## 2.2 ΒΑΣΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ 4NEC2

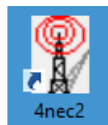
Για τη δημιουργία της κεραίας θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό 4NEC2. Το εργαλείο 4NEC2 είναι ένα εργαλείο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία, την προβολή και τον έλεγχο της γεωμετρικής δομής της κεραίας, καθώς και για τη δημιουργία, την εμφάνιση και τη σύγκριση διαγραμμάτων ακτινοβολίας κοντινού και μακρινού πεδίου ακτινοβολίας. Περιλαμβάνεται ένας επεξεργαστής τρισδιάστατης γεωμετρίας βασισμένος σε γραφικά, ο οποίος δεν απαιτεί πρόσθετες γνώσεις NEC, ενώ δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας και οπτικοποίησης μοτίβων διανομής ρεύματος, μακρινών/εγγύς πεδίων καθώς και γραφημάτων κέρδους της κεραίας (Gain) και λόγο στάσιων κυμάτων (SWR).

Η χρήση του 4NEC2 στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επιτρέπει την πλήρη προσομοίωση της κάθετης κεραίας  $\lambda/4$ , δίνοντας ακριβή στοιχεία για την απόδοσή της, πριν ακόμη την κατασκευή της. Επιπλέον, η δυνατότητα πειραματισμού με διαφορετικές διατάξεις radials, το μήκος των στοιχείων και η τοποθέτηση της κεραίας, δίνει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης της κεραίας για τη μέγιστη δυνατή απόδοση, προσαρμοσμένη στις ανάγκες της εφαρμογής.

Με το 4NEC2, μπορεί να γίνει ανάλυση και να διορθωθούν πιθανά προβλήματα ή ελλείψεις στη σχεδίαση, προτού προβεί στην κατασκευή της κεραίας, εξοικονομώντας χρόνο και πόρους.

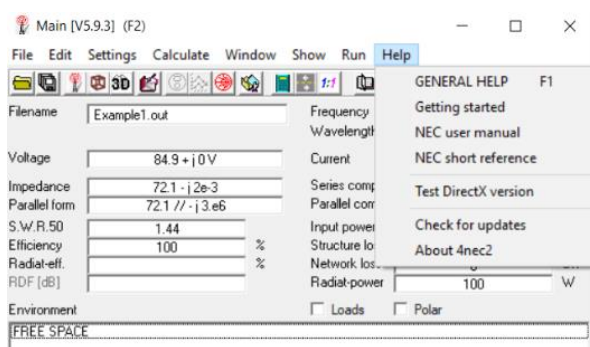
## 2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ 4NEC2

Στο περιβάλλον εργασίας του 4NEC2 κάνουμε διπλό κλικ στο εικονίδιο της επιφάνειας εργασίας 4NEC2 για να γίνει εκκίνηση του προγράμματος.

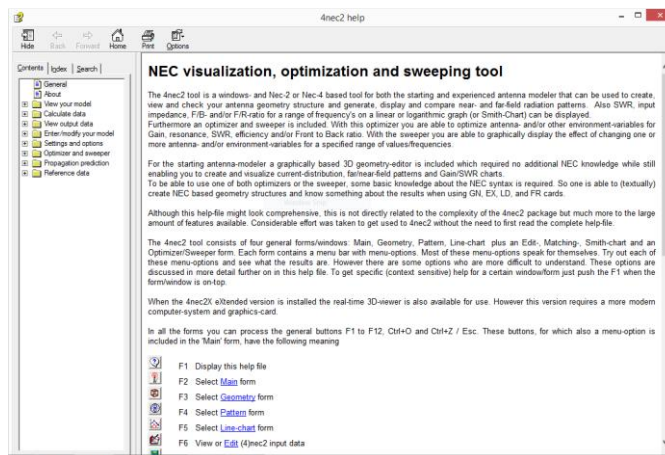


4NEC2 Desktop Icon

Κατά την πρώτη εκκίνηση, το 4NEC2 θα εμφανίσει δύο παράθυρα, το Κύριο παράθυρο (MAIN) και το παράθυρο γεωμετρίας (GEOMETRY). Το 4NEC2 διαθέτει Βοήθεια με ευαισθησία περιβάλλοντος. Για πρόσβαση στη Βοήθεια, πατάμε το πλήκτρο F1. Από την ιστοσελίδα του 4NEC2, υπάρχει επίσης ένα φόρουμ αφιερωμένο στο λογισμικό και μπορεί να βρεθεί στη διεύθυνση 4NEC2 forums.













Help Menu



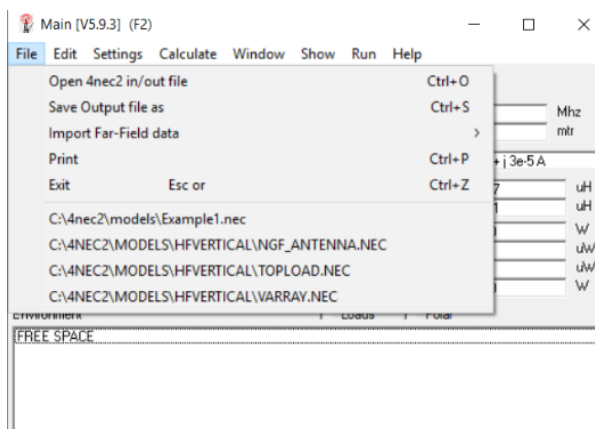
4NEC2 Main Help Screen

Κάθε φόρμα περιέχει μια γραμμή μενού με επιλογές μενού. Σε όλες τις φόρμες μπορούμε να επεξεργαστούμε τα γενικά κουμπιά F1 έως F12, Ctrl+O και Ctrl+Z / Esc. Αυτά τα κουμπιά, για τα οποία περιλαμβάνουν επίσης μια επιλογή μενού στη φόρμα «Main», έχουν την ακόλουθη σημασία:

-  F1 Display this help file
-  F2 Select [Main](#) form
-  F3 Select [Geometry](#) form
-  F4 Select [Pattern](#) form
-  F5 Select [Line-chart](#) form
-  F6 View or [Edit](#) (4)nec2 input data
-  F7 Start NEC-engine and [Generate](#) new output data
-  F8 View NEC output-file
-  F9 Start/select [3D-viewer](#) form
-  F10 Start [Matching](#) form
-  F11 Display [Smith-chart](#) form
-  F12 [Optimize](#) or [Sweep](#) variables
  
-  Ctrl+O [Open](#) (new) input file
-  Ctrl+S [Save](#) output file (as)
  
- Ctrl+Z Exit program (also ESC may be used)

## 2.2.1 MAIN WINDOW

### →FILE



**Open 4nec2 in/out file** Χρησιμοποιείται για να ανοίξουμε υπάρχοντα αρχεία εισόδου ή εξόδου του 4NEC2.

#### Save Output file as

Αποθηκεύει το τρέχον ανοικτό αρχείο του 4NEC2 σε άλλο όνομα αρχείου.

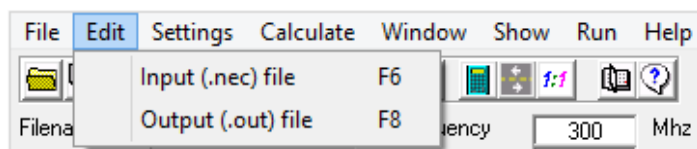
#### Import Far-Field Data

Τα δεδομένα μακρινού πεδίου χρησιμοποιούνται από λογισμικό πρόβλεψης διάδοσης.

#### Print

Εκτυπώνουμε το 4NEC2 project.

### →EDIT



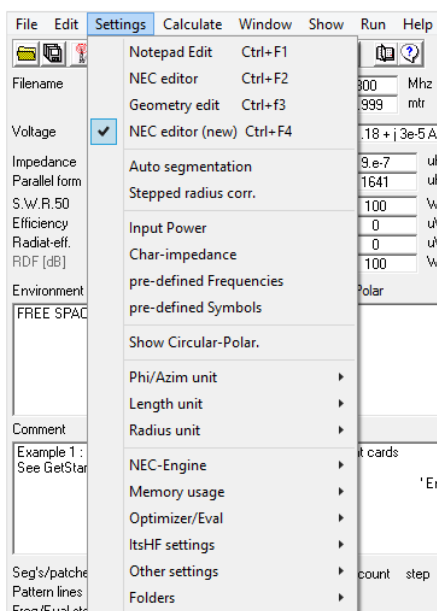
#### Input (.nec) file

Εμφανίζει το παράθυρο Γραφικού Περιβάλλοντος (GUI) του 4NEC2 όπου εισάγεται η κεραία που θα μοντελοποιηθεί.

#### Output (.out) file

Χρησιμοποιεί τον προεπιλεγμένο επεξεργαστή κειμένου για να εμφανίσει το αρχείο εξόδου του 4NEC2.

## →SETTINGS



### **Notepad Edit | NEC editor/Geometry edit | NEC editor (new)**

Ορίζει τον προεπιλεγμένο editor για αρχεία \*.nec. Η προεπιλογή είναι ο NEC EDITOR (NEW).

### **Auto segmentation**

Όταν είναι επιλεγμένο, επιτρέπει σε μακρά τμήματα να διαχωρίζονται αυτόματα σε υποτμήματα. Η Προεπιλογή είναι 20 τμήματα ανά μισό μήκος κύματος.

### **Input Power**

Εισαγωγή ισχύος σε Watt που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των τάσεων και των ρευμάτων στο κοντινό πεδίο. ( Προτείνεται 100 watts )

### **Char-Impedance**

Χαρακτηριστική αντίσταση του συστήματος σε Ωμ. Συνήθως 50 Ωμ.

### **Pre-defined Frequencies**

Άνοιγμα του προεπιλεγμένου επεξεργαστή όπου προστίθενται οι συχνότητες για την εκτέλεση σάρωσης συχνοτήτων.

### **Pre-defined Symbols**

Σταθερές για το Ρι και τους Μεγέθη των Καλωδίων. Πρόσθετες σταθερές μπορούν να προστεθούν στο αρχείο Freq.txt

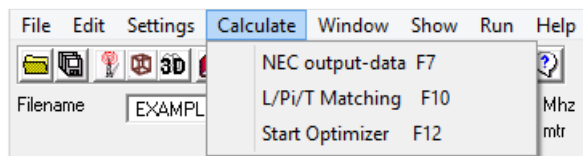
### **Show Circular-Polar**

Αλλάζει την οθόνη ώστε να εμφανίζει κυκλικό ή πολικό σύστημα συντεταγμένων.

### **Phi/azim unit | Length unit | Radius unit**

Αλλαγή των μονάδων για την αζιμούθιο γωνία ως φ/θ, κυκλικό ή αρνητικό αζιμούθιο, μήκος σε μέτρα ή πόδια, ή ακτίνα σε χιλιοστά/ίντσες (AWG) των στοιχείων των καλωδίων. [Προτείνονται μετρα (meters) και χιλιοστά (mm) ,αντίστοιχα ]

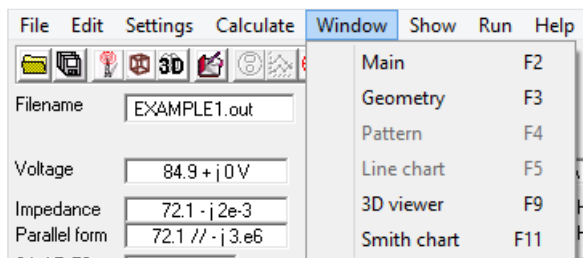
## → CALCULATE



### NEC output-data

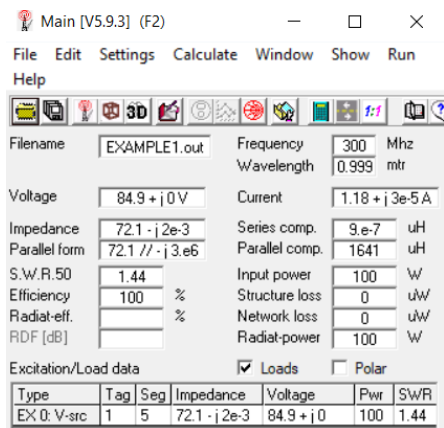
Αυτή η γενική επιλογή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία νέων δεδομένων εξόδου NEC.

## → WINDOW



Στο μενού window είναι οι επιλογές Main ,Geometry ,Pattern , Line Chart, 3D Viewer και Smith Chart .

## → SHOW



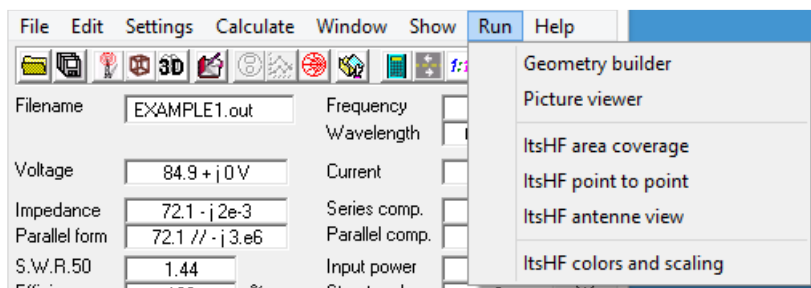
### Excite/Load info

Εμφανίζει τις υπολογισμένες πληροφορίες σε τετραγωνική μορφή αντικαθιστώντας την ενότητα Περιβάλλοντος του Κύριου Παραθύρου.

### Polar Notation

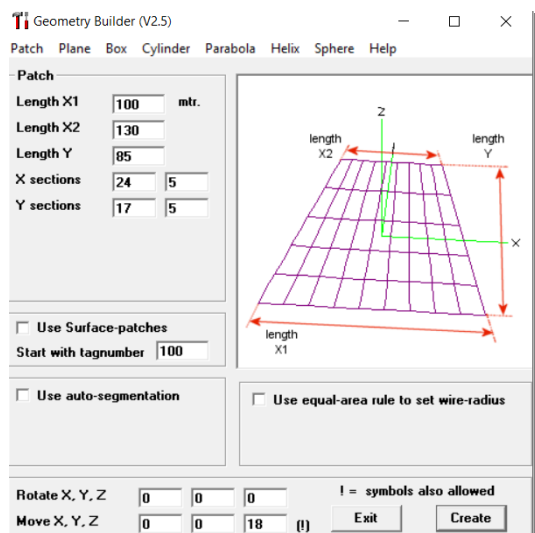
Εμφανίζει τα υπολογισμένα αποτελέσματα σε πολική μορφή.

➔ RUN

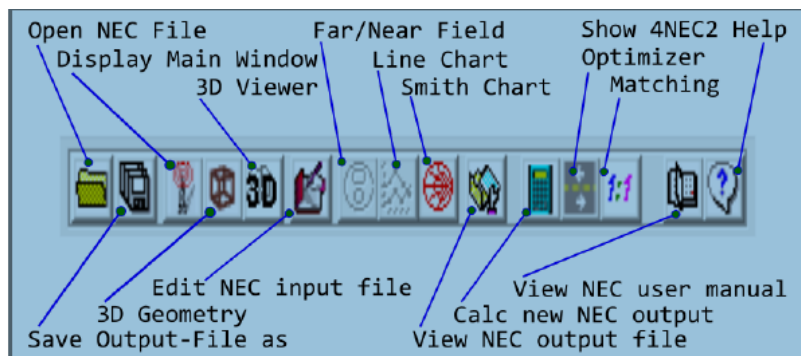


### Geometry Builder

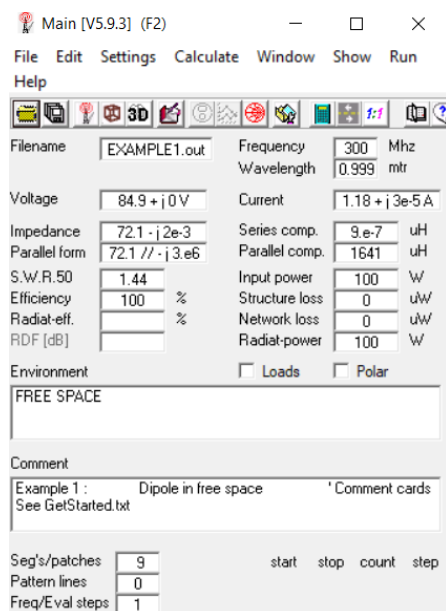
Εμφανίζει τον Geometry builder για τη δημιουργία σύνθετων συστημάτων κεραίων και εδάφους.



➔ Μπάρες Λειτουργιών Φόρμας Main Window (Toolbar Description)



Main Toolbar



**Voltage** Τάση στο σημείο τροφοδοσίας

**Impedance** Αντίσταση σε σειρά στο σημείο τροφοδοσίας

**Parallel Form** Παράλληλη αντίσταση στο σημείο τροφοδοσίας

**S.W.R.50** Λόγος στάσιμου κύματος στην τροφοδοσία στα 50Ω

**Efficiency** Αποδοτικότητα κεραίας

**Radiat-eff** Ολική απόδοση κεραίας .Πραγματική αποδοτικότητα ακτινοβολίας. Αυτή η απόδοση καθορίζει πόσο ακτινοβολεί η κεραία ως ποσοστό της εισόδου.

**RDF [ db. ]** Κέρδος κεραίας αναφερόμενο σε ιστροπικό δίπολο.

**Frequency** Η συχνότητα που αναλύθηκε η κεραία.

**Wavelength** Υπολογισμένο μήκος κύματος της αναλυθείσας συχνότητας.

**Current** Ρεύμα στο σημείο τροφοδοσίας

**Series comp.** Συνιστώσα σειράς σε microhenries.

**Parallel comp.** Παράλληλη συνιστώσα σε microhenries.

**Input power** Η εφαρμοζόμενη ισχύς σε Watt από τον πομπό όπως μετρήθηκε στο σημείο τροφοδοσίας της κεραίας.

**Structure loss** Ισχύς σε μικροβάτ ( $10^{-6}$ ) που χάνεται λόγω των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή της κεραίας.

**Network loss** Ισχύς σε μικροβάτ ( $10^{-6}$ ) που χάνεται λόγω του δικτύου ταιριάσματος στο σημείο τροφοδοσίας της κεραίας.

**Radiat-Power** Ποσότητα ισχύος σε Watt που ακτινοβολείται από την κεραία.

**Environment** Μεγάλο πλαίσιο κειμένου που εμφανίζει τον τύπο περιβάλλοντος στον οποίο αναλύεται η κεραία.

**Seg's/patches** Ο αριθμός των υποστοιχείων ή των επικομματικών στοιχείων στα οποία έχει διαιρεθεί η κεραία για ανάλυση.

**Pattern Lines** Αριθμός γραμμών που υπολογίζονται για όλα τα τμήματα.

**Freq/Eval steps** Εμφανίζει τον αριθμό των βημάτων συχνότητας ή αξιολόγησης. Η ανάλυση σε μία μόνο συχνότητα θα εμφανίσει ένα. Η ανάλυση με σάρωση συχνοτήτων ή πολλαπλά βήματα θα εμφανίσει έναν αριθμό μεγαλύτερο από 1.

**Theta** Αρχή/Τέλος - αριθμός μοιρών στο κατακόρυφο επίπεδο. (Υψός)

Πλήθος - συνολικός αριθμός βημάτων.

Βήμα - πόσες μοίρες σε κάθε βήμα.

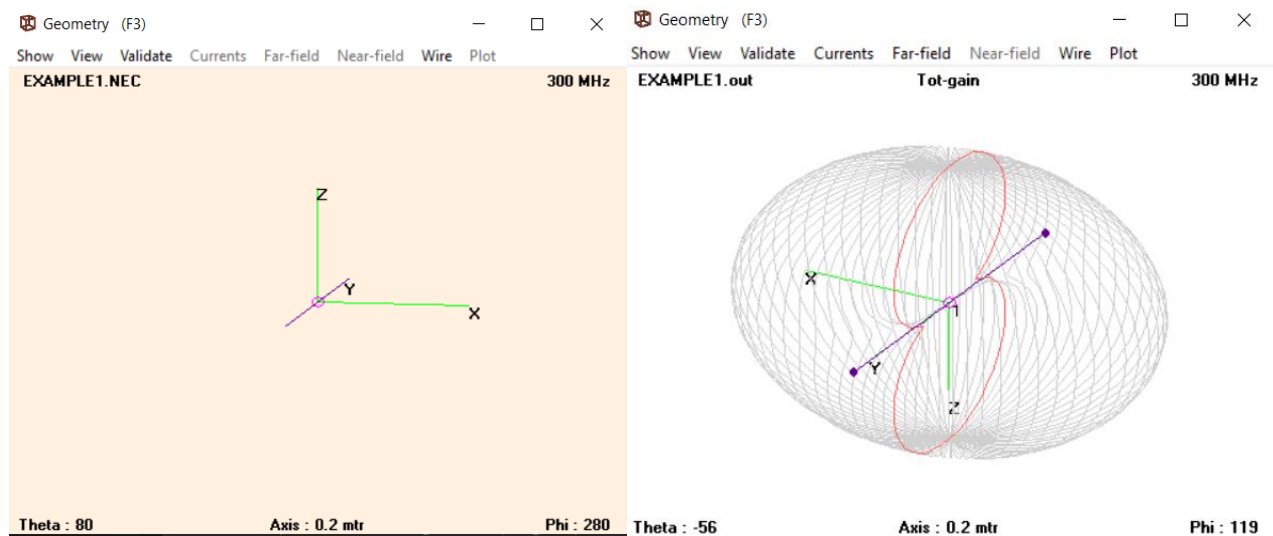
**Phi Start/Stop** Αριθμός μοιρών στο οριζόντιο επίπεδο. (Αζιμούθιο)

Πλήθος - συνολικός αριθμός βημάτων.

Βήμα - πόσες μοίρες σε κάθε βήμα.



## 2.2.2 GEOMETRY WINDOW



### →SHOW

**Input file | Output file** Προβολή της γεωμετρίας της κεραίας με βάση τα δεδομένα του αρχείου εισόδου ή του υπολογισμένου αρχείου εξόδου 4NEC2.

**Wire numbers** Εμφανίζει τον αριθμό των καλωδίων στη σχεδίαση της κεραίας.

**Tag-Numbers** Εμφανίζει τον αριθμό ετικέτας του καλωδίου. Κάθε καλώδιο πρέπει να έχει διαφορετικούς αριθμούς ετικέτας. Οι αριθμοί καλωδίων και οι αριθμοί ετικέτας εμφανίζονται στο κέντρο του καλωδίου.

**Open ends** Εμφανίζει κόκκινους κύκλους στα άκρα των καλωδίων που δεν είναι συνδεδεμένα με τίποτα.

**Junctions (>2)** Εμφανίζει τον αριθμό των συνδέσεων στην κεραία.

**Segments** Εμφανίζει κάθε τμήμα μεταξύ ενός συνόλου κενών κύκλων που έχουν το ίδιο χρώμα με το καλώδιο.

**Struc/Wire load** Εμφανίζει με καφέ γραμμή το φορτίο του καλωδίου ή της δομής - π.χ. σωληνώσεις.

**Near/Far field** Εμφανίζει κάθετες (El) και οριζόντιες (Az) γραμμές του διαγράμματος της κεραίας.

### →VIEW

**Reset** Επιστρέφει τη γεωμετρία της κεραίας στο κέντρο της οθόνης και στην προεπιλεγμένη προβολή.

**Fix rot-center** Καθορίζει το κέντρο περιστροφής της κεραίας. Διευκολύνει την περιστροφή γύρω από ένα σταθερό σημείο.

**Zoom in | Zoom out | Shift left | Shift right | Shift up | Shift down**

Μεγέθυνση και σμίκρυνση της γεωμετρίας.

### Last NEC-input

Εμφανίζει τα δεδομένα εισόδου της NEC σε ακατέργαστη μορφή χρησιμοποιώντας τον προεπιλεγμένο επεξεργαστή κειμένου.

### →VALIDATE

**Run geometry check** Επικυρώνει χειροκίνητα τη γεωμετρία της κεραίας.

**Show geo-check** Εμφανίζει το αρχείο καταγραφής των αποτελεσμάτων του γεωμετρικού ελέγχου.

**Set Auto geo-check** Ρυθμίζει το 4NEC2 να ελέγχει αυτόματα τη γεωμετρία της κεραίας.

**Run segment checks** Ελέγχει κάθε τμήμα για εγκυρότητα και στη συνέχεια εμφανίζει τα αποτελέσματα από το αρχείο Model.log στο προεπιλεγμένο επεξεργαστή κειμένου.

**Show all seg-checks** Εμφανίζει όλους τους ελέγχους τμημάτων από τη γεωμετρία της κεραίας.

**Segm. Length** Επικυρώνει το μήκος τμήματος. Προεπιλογή σε μέτρα.

**Segm. R(adius)** Επικυρώνει την ακτίνα του τμήματος. Προεπιλογή σε μέτρα.

#### → CURRENT

**Current magnitude** Εμφανίζει το μέγεθος όλων των ρευμάτων στην κεραία με πράσινες γραμμές.

**Phase only** Εμφανίζει τις φάσεις.

**Current real** Εμφανίζει την πραγματική συνιστώσα του ρεύματος στα στοιχεία της κεραίας.

**Current imaginary** Εμφανίζει τη φανταστική συνιστώσα του ρεύματος στα στοιχεία της κεραίας.

**Magnitude as color** Εμφανίζει ένα υπόμνημα και το μέγεθος ρεύματος σε διαφορετικά χρώματα που αντιστοιχούν στο ρεύμα μεγέθη.

**Phase as color** Εμφανίζει ένα έγχρωμο υπόμνημα και τη φάση σε διαφορετικά χρώματα που αντιστοιχούν σε υπολογισμούς φάσης.

#### → FAR-FIELD

Εμφανίζει το μοτίβο κεραίας μακρινών πεδίων στη γεωμετρία της κεραίας.

**Next pattern | Previous pattern** Εμφανίζει το επόμενο ή το προηγούμενο μοτίβο μακρινών πεδίων Phi ή Theta..

**Linear/ARRL** Εμφανίζει το πλέγμα σε γραμμική μορφή ή σε μορφή ARRL.

**Gain as color** Εμφανίζει το συνολικό κέρδος σε V/m με αντίστοιχο υπόμνημα μεγέθους

**Tilt/Phase** Εμφανίζει το μέγεθος φάσης σε μοίρες

**Axial Ratio**

Εμφανίζει την αναλογία σε dB μεταξύ ηλεκτρικών πεδίων που είναι ενενήντα μοίρες μεταξύ τους σε ένα κυκλικά πολωμένη κεραία.

**Decrease lines | Increase lines** Μειώνει ή αυξάνει τον αριθμό των γραμμών που αναπαριστούν το μοτίβο κεραίας μακρινού πεδίου.

#### → WIRE

**Identify W/S | Identify Tag**

Εμφάνιση συγκεκριμένου αριθμού καλωδίου, αριθμού τμήματος ή αριθμού ετικέτας στη γεωμετρία της κεραίας. Το καλώδιο/τμήμα/ετικέτα που βρέθηκε θα εμφανιστεί με έντονο πράσινο χρώμα.

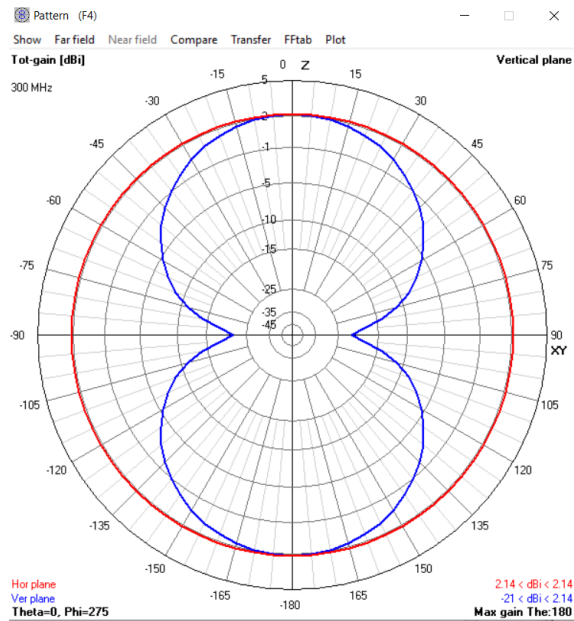
Πληροφορίες σύρματος/τμήματος θα εμφανιστεί ένα πλαίσιο με σχετικές πληροφορίες για το συγκεκριμένο τμήμα.

**Next | Previous** Βήματα προς τους επόμενους ή προηγούμενους αριθμούς καλωδίων/τμημάτων/ετικετών.

**Set as center** Μετακινεί το σύρμα/τμήμα/ετικέτα που βρέθηκε και το μετακινεί στο κέντρο του παραθύρου γεωμετρίας.

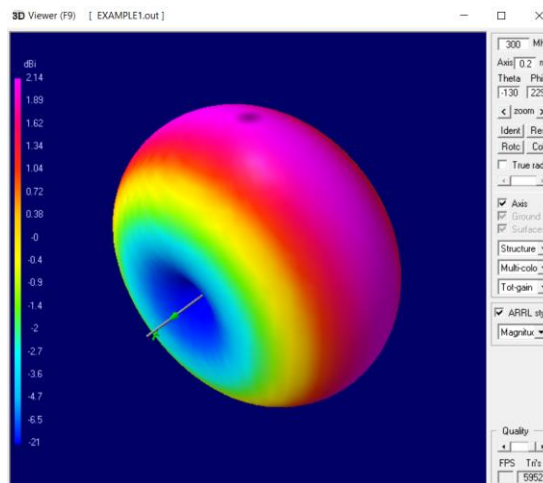
**Polar notation** Εναλλαγή μεταξύ ορθογώνιας σημειογραφίας ή πολικής σημειογραφίας στο πλαίσιο πληροφοριών σύρματος/τμήματος.

### 2.2.3 PATTERN WINDOW



Εμφανίζονται τα κατακόρυφα (EI) και οριζόντια (Az) υπολογισμένα διαγράμματα ακτινοβολίας της κεραίας όπου δείχνει ότι το μέγιστο κέρδος ( maximum gain) είναι 2.14 dBi για azimuth  $\Phi$  (phi) = 275° και elevation  $\Theta$  (theta) = 0°.

### 3D VIEWER WINDOW



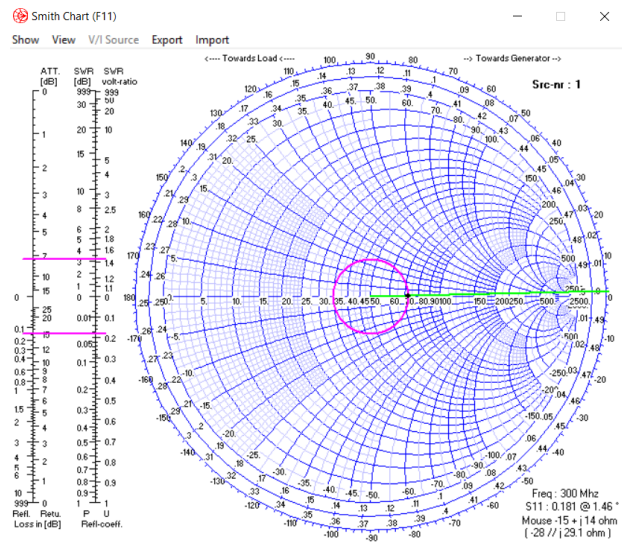
Διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας σε τρεις διαστάσεις

**MHz** Συχνότητα στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί.

**AXIS** Ο κύριος άξονας της κεραίας.

**Theta & Phi** Εμφανίζει τις τρέχουσες τιμές για Phi/Αζιμούθιο & Θήτα/Υψωσης καθώς το διάγραμμα κεραίας περιστρέφεται.

### 2.2.4 SMITH CHART

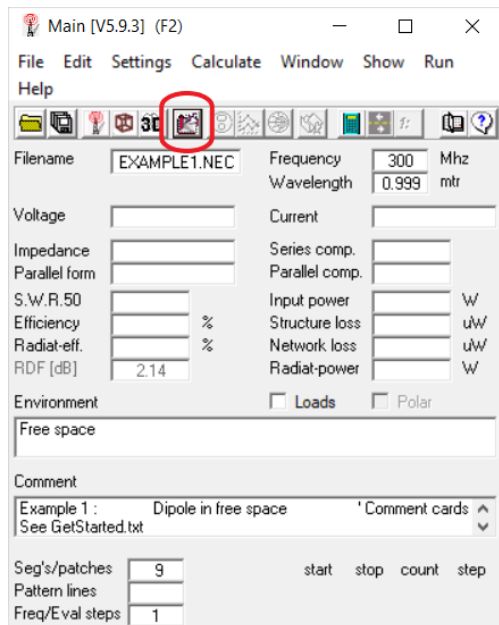


Το Smith Chart παρουσιάζει τον συντελεστή αντανάκλασης (Reflection Coefficient), ο οποίος δείχνει πόσο από το σήμα ανακλάται πίσω προς την πηγή από το φορτίο. Αυτός ο συντελεστής μπορεί να είναι σε πολικές συντεταγμένες (με μέτρο και φάση) και βοηθάει στον υπολογισμό της ισχύος που χάνεται λόγω αντανάκλασης.

Επίσης δειχνει την συνθετη αντισταση (impedance) και τους παράμετρους S ( S- parameters).

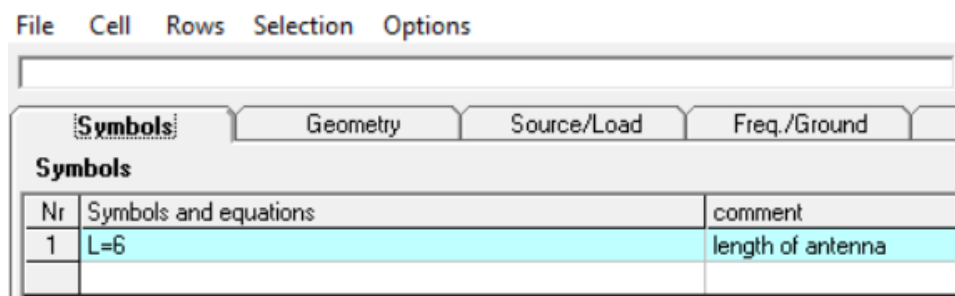
## 2.4 ΣΧΕΔΙΑΣΗ END FED ΚΑΘΕΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ

Για να ξεκινήσουμε την διαδικασία κατασκευής της διάταξης της κεραίας χρησιμοποιούμε το εικονίδιο Edit NEC Input File ,οπως φαίνεται στο παρακατω σχημα.αφού πρώτα επιλέξουμε ως τρόπο κατασκευής το NEC EDITOR (NEW) ,το οποίο το επιλέγουμε από Main→ Setting → NEC EDITOR (NEW).



Αρχικό παράθυρο του προγράμματος 4nec2

Στην συνέχεια, αναδύεται παράθυρο το οποίο μας επιτρέπει να δηλώσουμε τις μεταβλητές της κεραίας.Συγκεκριμένα, θα δηλώσουμε οτι το μήκος της κεραίας θα είναι 6 μέτρα η οποία θα χρησιμοποιηθεί και στο πειραματικό μέρος.



Έπειτα, η γεωμετρική διάταξη της κεραίας θα αποτελείται από έξι σύρματα (wires), τα οποία θα έχουν μήκος 1 μέτρο το κάθε ένα και ακτίνα (radius) 0.001 , 0.004 , 0.007, 0.011 , 0.014 και 0.018 αντίστοιχα.Κάθε σύρμα (wire) διαιρείται σε 11 τμήματα (segments ) τα οποία είναι ένα ουσιαστικό στάδιο στη διαδικασία σχεδιασμού και προσομοίωσης κεραίων. Διευκολύνει την ακριβή προσομοίωση των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων, την αναλυτική καταγραφή της κατανομής ρεύματος και τάσης, την καλύτερη ανάλυση των παρεμβολών και των αντηχήσεων,

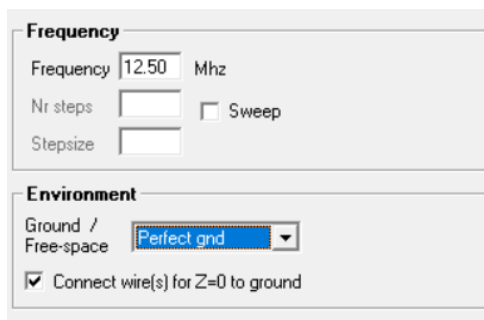
καθώς και τη βελτιστοποίηση του σχεδίου. Αυτές οι πτυχές είναι καθοριστικής σημασίας για την ανάπτυξη αποδοτικών και λειτουργικών κεραιών που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των σύγχρονων συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας. Οι συντεταγμένες καθορίζουν τη θέση ενός σημείου στον τρισδιάστατο χώρο. Οι συντεταγμένες (X,Y,Z) του αρχικού σημείου και του τελικού σημείου ορίζουν τον προσανατολισμό και το μήκος του σύρματος. Για να προσθέσουμε έξι κάθετα σύρματα που ξεκινούν από το σημείο (0, 0, 0) και καταλήγουν στο σημείο (0, 0, 6) με μήκος σύρματος όπως αναφέρθηκε ότι είναι 1 μέτρο καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα.

Nr	Type	Tag	Segs	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	Radius
1	Wire	1	11	0	0	0	0	0	1	0.018
2	Wire	2	11	0	0	1	0	0	2	0.014
3	Wire	3	11	0	0	2	0	0	3	0.011
4	Wire	4	11	0	0	3	0	0	4	0.007
5	Wire	5	11	0	0	4	0	0	5	0.004
6	Wire	6	11	0	0	5	0	0	6	0.001


Έπόμενο βήμα για την προσομοίωση της κεραίας είναι η προσθήκη πηγής για την τροφοδότηση της κάθετης κεραίας. Στην end-fed κάθετη κεραία, η πηγή θα τοποθετηθεί στη βάση της κεραίας (tag 1) και στο segment 11 για αποφυγή σφάλματος. Οι πραγματικές και φανταστικές συνιστώσες της σύνθετης έντασης της πηγής (0 + j1). Οι πραγματικές και φανταστικές συνιστώσες της σύνθετης αντίστασης της πηγής (0 + j1).

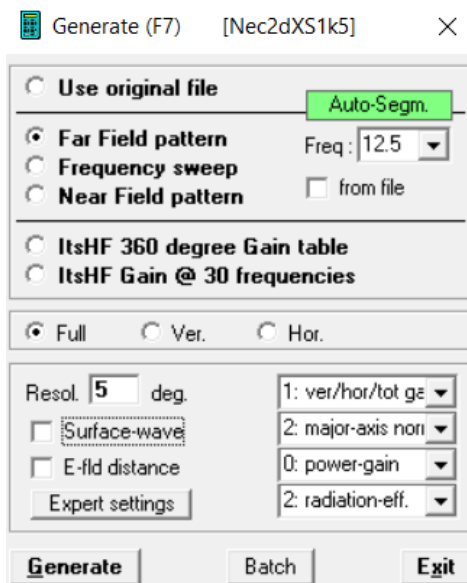
Nr	Type	Tag	Seg	(opt)	Real	Imag	Magn	Phase	(norm)
1	Voltage-src	1	6	0	1	0	1	0	0

Τελευταίο βήμα της προσομοίωσης είναι η επιλογή συχνότητας. Επιλέχθηκε συχνότητα στα 12.50MHz και επιλογή εδάφους perfect ground. Η συχνότητα λειτουργίας προκύπτει από το μήκος της κεραίας η οποία είναι στα 6 μέτρα (L) και τις σχέσεις  $c=\lambda f$  και  $L=\lambda/4$ . Γνωρίζουμε ότι η ταχύτητα του φωτός είναι  $3 \cdot 10^8 \text{m/s}$ . Επομένως, οδηγούμαστε στην ακόλουθη συχνότητα όπως αποτυπώνεται στην παρακάτω εικόνα.



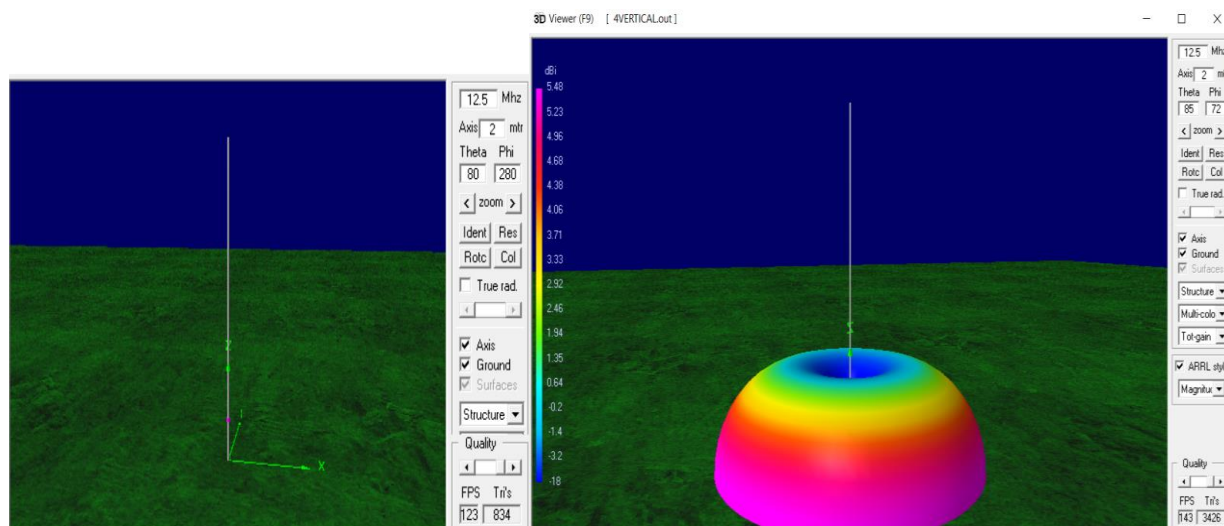
## 2.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Αφού έχουμε συμπληρώσει όλες τις μεταβλητές προχωράμε στην τελική προσομοίωση και στην ανάλυση αποτελεσμάτων, η οποία επιτυγχάνεται με το κουμπί . Αφού το πατήσουμε ανοίγει παράθυρο το οποίο μας δίνει την επιλογή να τρέξουμε την προσομοίωση στο μακρινό πεδίο (Far Field Pattern) ή Σάρωση Συχνοτήτων (Frequency Sweep).

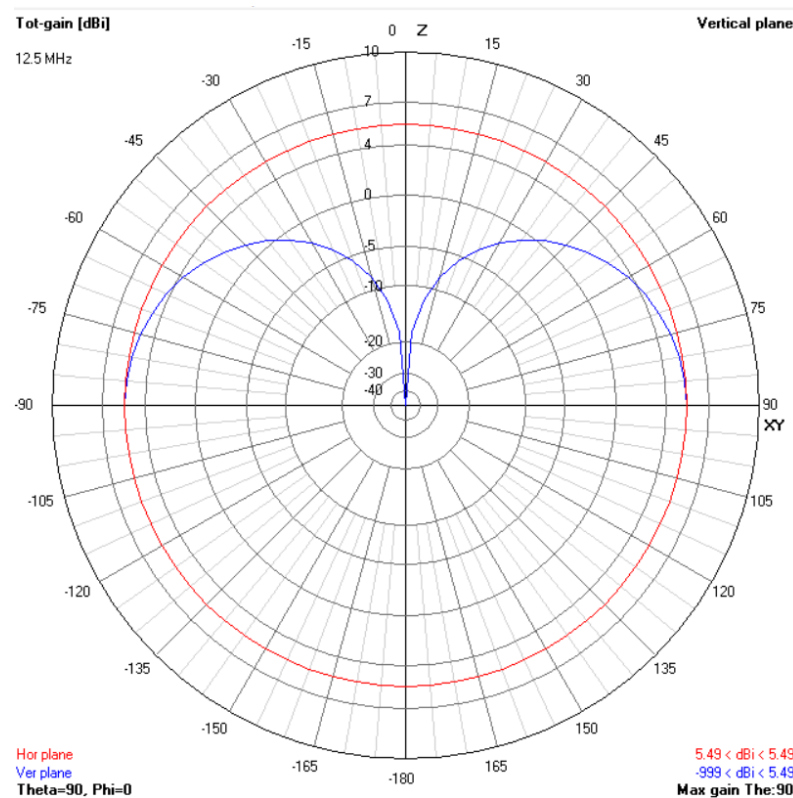


### 2.5.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΜΑΚΡΙΝΟ ΠΕΔΙΟ ( FAR FIELD PATTERN)

Ύστερα από την προσομοίωση της κεραίας στο μακρινό πεδίο έχουμε τα εξής αποτελέσματα.



ΕΙΚΟΝΑ 2.1: Γεωμετρική Διάταξη Της Κεραίας (1<sup>η</sup>) και 3D Διάγραμμα Ακτινοβολίας (2<sup>η</sup>)



ΕΙΚΟΝΑ 2.2: Διάγραμμα Ακτινοβολίας Στη Συχνότητα 12.5 MHz

Οι  $\lambda/4$  κάθετες κεραίες έχουν χαρακτηριστικά που ευνοούν την ομοιοκατευθυντική ακτινοβολία (omnidirectional) στο οριζόντιο επίπεδο (Azimuth Plane), ενώ στο κατακόρυφο επίπεδο (Elevation plane) η ισχυρότερη ακτινοβολία συμβαίνει κοντά στον ορίζοντα.

Το διάγραμμα ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο (γωνία ανύψωσης  $0^\circ$ ) είναι ομοιοκατευθυντικό. Αυτό σημαίνει ότι η κεραία ακτινοβολεί ισότιμα σε όλες τις κατευθύνσεις γύρω από αυτήν ( $360^\circ$ ), κάτι που είναι χαρακτηριστικό των κάθετων κεραιών.

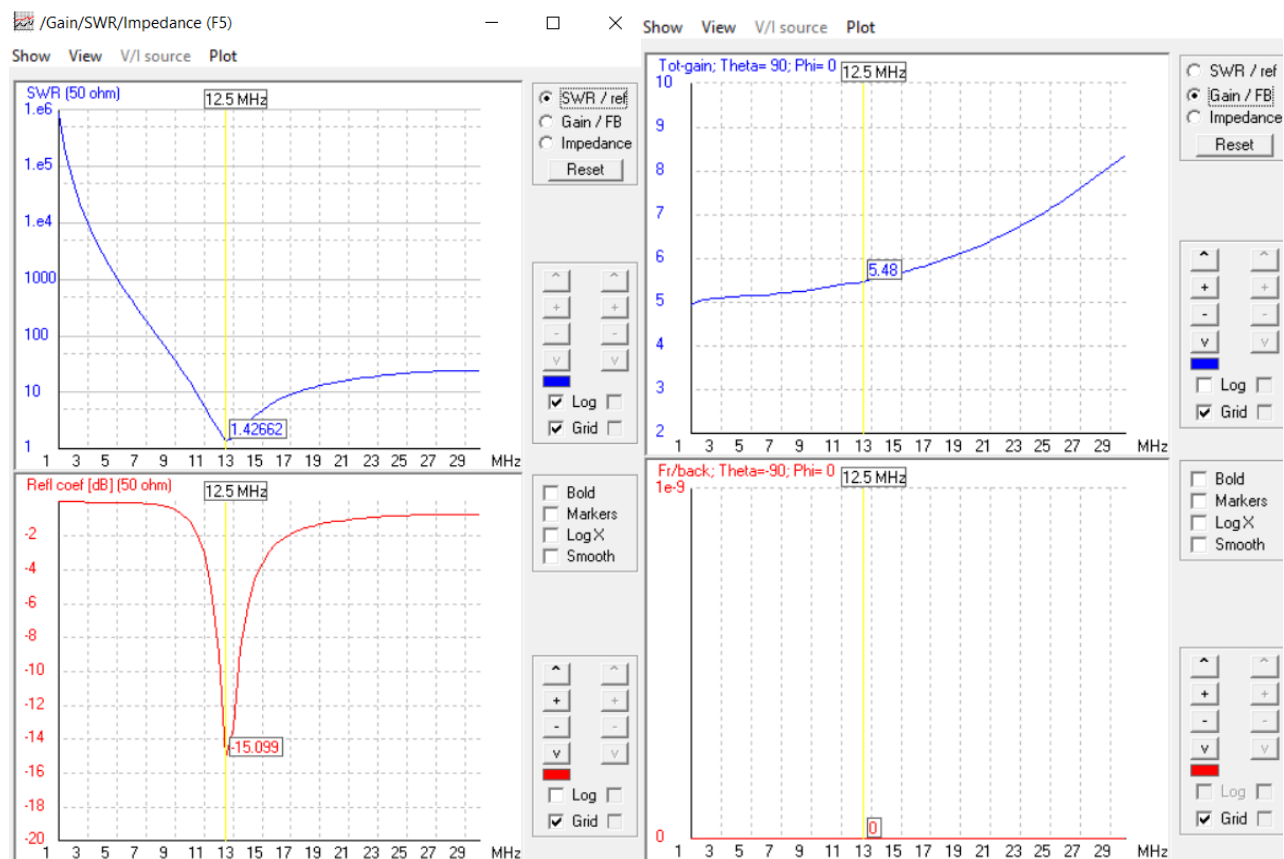
Το διάγραμμα στο κατακόρυφο επίπεδο δείχνει ότι η ακτινοβολία είναι πιο ισχυρή κοντά στον ορίζοντα. Αυτό είναι σημαντικό για τις επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων, καθώς το σήμα ταξιδεύει πιο μακριά όταν εκπέμπεται παράλληλα με την επιφάνεια της γης.

Το διάγραμμα μοιάζει με μια καμπύλη που ξεκινά χαμηλά κοντά στον ορίζοντα, με μια ισχυρή κορυφή σε γωνίες κοντά στις  $10^\circ$ - $20^\circ$  από τον ορίζοντα, και μειώνεται όσο πλησιάζουμε την κατακόρυφη κατεύθυνση ( $90^\circ$ ). Το μέρος που μας ενδιαφέρει είναι το κάθετο κέρδος, δηλαδή πού κατευθύνεται το σήμα όταν φεύγει από την κεραία και κατευθύνεται προς τον ορίζοντα. Για  $\lambda/4$  φαίνεται όπως στην παραπάνω εικόνα 2.2.



## 2.5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΤΗ ΣΑΡΩΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ( FREQUENCY SWEEP)

Ύστερα από την προσομοίωση της κεραίας με τη χρήση Σάρωση Συχνοτήτων έχουμε τα εξής αποτελέσματα.



ΕΙΚΟΝΑ 2.3 : Διαγράμματα SWR/ref και Gain/FB για συχνότητα 12.5MHz

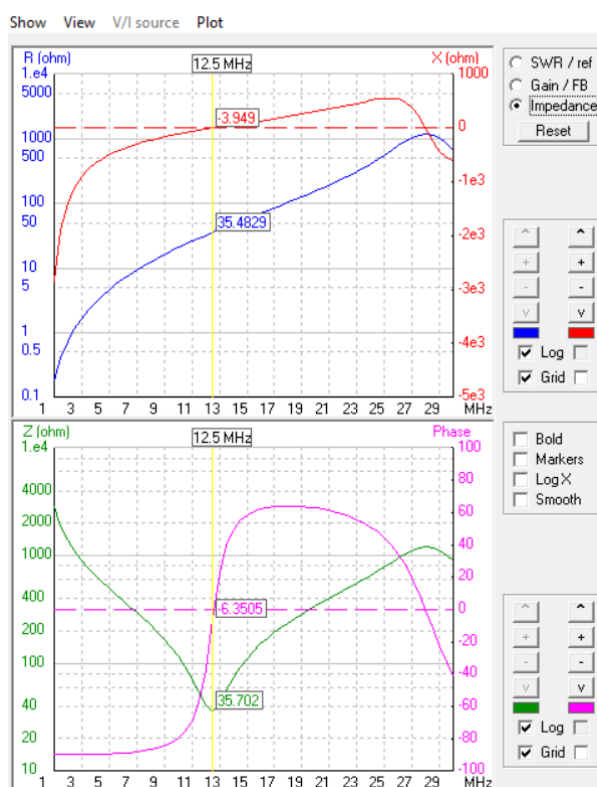
Στη συχνότητα 12.5 MHz, το SWR είναι περίπου 1.426, που δείχνει πολύ καλή προσαρμογή της κεραίας σε αυτή τη συχνότητα. Ο ιδανικός λόγος SWR είναι 1:1, που αντιστοιχεί σε τέλεια προσαρμογή, οπότε η τιμή 1.4262 είναι πολύ κοντά σε αυτό. Παρατηρούμε ότι το SWR αυξάνεται δραματικά σε χαμηλότερες και υψηλότερες συχνότητες, κάτι που υποδηλώνει ότι η κεραία δεν είναι ιδανικά προσαρμοσμένη εκτός της συχνότητας των 12.5 MHz. Κοντά στη συντονισμένη συχνότητα (12.5 MHz), η κεραία έχει καλή προσαρμογή στην πηγή (αντίσταση εισόδου είναι κοντά στα 50 Ω).

Ο συντελεστής ανάκλασης σε αυτή τη συχνότητα είναι πολύ χαμηλός, -15.099 dB. Αυτό σημαίνει ότι πολύ λίγη ισχύς ανακλάται πίσω προς την πηγή, με το μεγαλύτερο μέρος να μεταδίδεται από την κεραία. Μακριά από τη συντονισμένη συχνότητα και καθώς απομακρυνόμαστε από τη συχνότητα συντονισμού (12.5 MHz), ο συντελεστής ανάκλασης αυξάνεται, υποδεικνύοντας χειρότερη προσαρμογή. Ο συντελεστής ανάκλασης μπορεί να φτάσει κοντά στο 0 dB, που σημαίνει ότι σχεδόν όλη η ισχύς ανακλάται πίσω και δεν εκπέμπεται αποτελεσματικά. Για καλά συντονισμένες κεραίες, η καμπύλη του συντελεστή ανάκλασης θα πρέπει να είναι πολύ χαμηλή στο κέντρο της συντονισμένης συχνότητας και να αυξάνεται απότομα καθώς μετακινείται από τη συχνότητα συντονισμού.

Το διάγραμμα κέρδους (Gain) υποδεικνύει ότι η κεραία αποδίδει καλά στη συχνότητα συντονισμού της 12.5 MHz με κέρδος 5.48 dBi

Οι κάθετες κεραίες είναι ομοιοκατευθυντικές (omnidirectional) σε οριζόντιο επίπεδο, δηλαδή εκπέμπουν ισοδύναμα σε όλες τις κατευθύνσεις γύρω από την κεραία. Στην περίπτωση αυτή, ο F/B δηλαδή ο δείκτης που περιγράφει την αναλογία του κέρδους ακτινοβολίας προς την κατεύθυνση του εμπρός (προς το σημείο που στοχεύει η κεραία) σε σύγκριση με την ακτινοβολία προς τα πίσω (προς την αντίθετη κατεύθυνση) είναι συνήθως χαμηλός, κοντά στο 0 dB, καθώς δεν υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ της ακτινοβολίας προς το εμπρός ή το πίσω μέρος. Συγκεκριμένα, είναι 0 dB επειδή η κεραία εκπέμπει σχεδόν ισότιμα σε όλες τις κατευθύνσεις γύρω από αυτήν.

### Αντίσταση και Άεργη Αντίσταση (Resistance and Reactance)



ΕΙΚΟΝΑ 2.4: Αντίσταση Εισόδου και Φάση

### Αντίσταση και Άεργη Αντίσταση (Resistance and Reactance)

Το πάνω μέρος του διαγράμματος δείχνει την πραγματική και φανταστική συνιστώσα της αντίστασης (impedance) της κεραίας σε σχέση με τη συχνότητα.

Μπλε γραμμή (R): Αυτή η γραμμή αντιπροσωπεύει την πραγματική συνιστώσα της αντίστασης (σε Ohms). Η πραγματική αντίσταση είναι το μέρος της αντίστασης που αντιστοιχεί σε απώλειες ισχύος, δηλαδή την ενέργεια που μετατρέπεται σε θερμότητα ή ακτινοβολία από την κεραία. Στη συχνότητα 12.5 MHz, η πραγματική αντίσταση είναι περίπου 35.48 Ω, κάτι που είναι αρκετά κοντά στα 50 Ω, μια τυπική τιμή προσαρμογής για ραδιοσυστήματα, γεγονός που δείχνει καλή προσαρμογή σε αυτή τη συχνότητα.

Κόκκινη γραμμή (X): Αυτή είναι η γραμμή της άεργης αντίστασης (reactance), η οποία αντιπροσωπεύει το φανταστικό μέρος της αντίστασης. Η αντίσταση δείχνει αν το κύκλωμα είναι επαγωγικό (θετική τιμή) ή χωρητικό (αρνητική τιμή). Στη συχνότητα 12.5 MHz, η αντίσταση είναι περίπου -3.949 Ω, που είναι χαμηλή τιμή, υποδεικνύοντας καλή προσαρμογή μεταξύ της κεραίας και του τροφοδοτικού συστήματος. Το σύστημα είναι ελαφρώς χωρητικό.

## Φάση και Σύνθετη Αντίσταση (Phase and Impedance)

Το κάτω διάγραμμα δείχνει τη φάση (Phase) και τη Σύνθετη Αντίσταση της κεραίας.

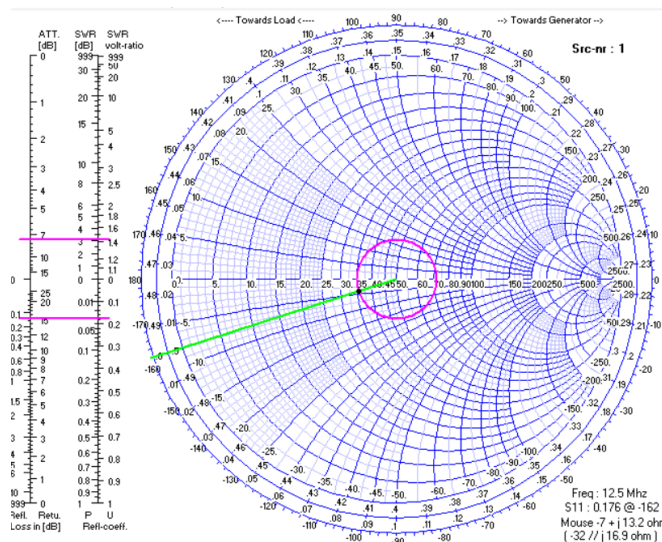
Πράσινη γραμμή (Phase): Αντιπροσωπεύει τη φάση της αντίστασης σε σχέση με τη συχνότητα. Στα 12.5 MHz, η φάση είναι κοντά στο 6.3505 μοίρες, κάτι που δείχνει μικρή απόκλιση, υποδεικνύοντας καλή προσαρμογή της κεραίας στη συγκεκριμένη συχνότητα.

Μωβ γραμμή (Z): Αυτή η γραμμή αντιπροσωπεύει το μέτρο της συνολικής αντίστασης. Στη συχνότητα 12.5 MHz, η συνολική αντίσταση είναι περίπου 35.702 Ω, υποδεικνύοντας ότι η κεραία είναι καλά προσαρμοσμένη στο σύστημα, καθώς αυτή η τιμή είναι κοντά στα 50 Ω, που είναι το σύνηθες πρότυπο για τα περισσότερα RF συστήματα.

Επομένως, η κεραία παρουσιάζει καλή προσαρμογή στη συχνότητα των 12.5 MHz, με πραγματική αντίσταση περίπου 35.48 Ω και χωρική αντίσταση (3.943 Ω), γεγονός που υποδεικνύει μικρές απώλειες και καλή αποδοτικότητα. Η χαμηλή αντίσταση και η φάση κοντά στο μηδέν δείχνουν ότι το σύστημα είναι καλά συντονισμένο σε αυτή τη συχνότητα, γεγονός που οδηγεί σε αποδοτική εκπομπή και λήψη.

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, όσο απομακρυνόμαστε από τα 12.5 MHz, η πραγματική αντίσταση αυξάνεται, γεγονός που δείχνει ότι η κεραία δεν είναι ιδανικά προσαρμοσμένη στις άλλες συχνότητες. Εν γένει, η κεραία παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση κοντά στα 12.5 MHz, όπου η αντίσταση της είναι κοντά στα 50 Ω, κάτι που την καθιστά ιδανική για χρήση σε αυτή τη συχνότητα.

## ΧΑΡΤΗΣ SMITH ( SMITH CHART)



Το διάγραμμα του χάρτη Smith ( Smith Chart) χρησιμοποιείται για την ανάλυση της σύνθετης αντίστασης (impedance) και των ανακλάσεων σε συστήματα RF. Η ανάλυση δείχνει τα δεδομένα στη συχνότητα των 12.5 MHz.

Στη συχνότητα 12.5 MHz, βλέπουμε ότι η σύνθετη αντίσταση (S11) είναι 0.176 - j0.162 ή 17.6 - j16.2 Ω. Αυτή η τιμή σημαίνει ότι η κεραία έχει πραγματική αντίσταση 17.6 Ω και μια φανταστική συνιστώσα -16.2 Ω (χωρητική αντίδραση).

Το S11 εκφράζει τον συντελεστή ανάκλασης, και η χαμηλή τιμή του υποδεικνύει καλή προσαρμογή της κεραίας, αλλά όχι τέλεια, δεδομένου ότι η αντίσταση δεν είναι κοντά στα 50 Ω. Η πράσινη γραμμή ξεκινά από το κέντρο του Smith Chart (που αντιστοιχεί στα 50 Ω) και καταλήγει στην περιοχή που αντιστοιχεί σε χαμηλότερη σύνθετη εισαγωγή. Το σημείο της εισαγωγής είναι κοντά στη μονάδα. Αυτό δείχνει κάποια μικρή ανακλασιμότητα. Η κεραία προσαρμόζεται σχετικά καλά με το σύστημα των 50 Ω, αφού το σημείο βρίσκεται κοντά στον κύκλο των 1.0 SWR.

Το S11 είναι χαμηλό, κάτι που σημαίνει καλή προσαρμογή, υποδεικνύοντας απόδοση της κεραίας αλλά όχι ιδανική.

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΘΕΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ

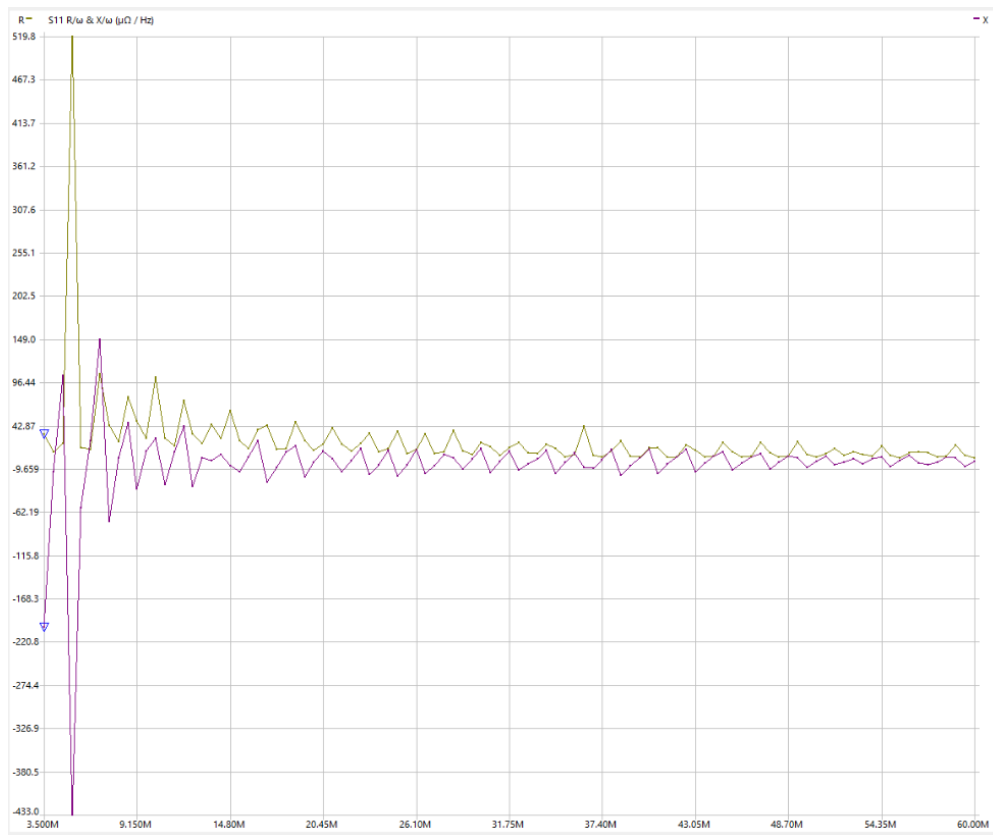
Η κεραία η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του πειράματος είναι η Moonraker GPA-80 HF (80-6M), μια κάθετη κεραία για χρήση σε υψηλές συχνότητες (HF), καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα από 80 έως 6 μέτρα (3.5 - 50 MHz). Η κατασκευή της κεραίας εμπίπτει σε έναν κλάδο της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας και του σχεδιασμού κεραιών, που συνδέεται με τη διάδοση ραδιοκυμάτων, την ηλεκτρική προσαρμογή και την αποδοτικότητα ακτινοβολίας. Η πραγματική κεραία που υλοποιήθηκε παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 3.1 : Κάθετη Κεραία Πειράματος

Τα πειραματικά αποτελέσματα μετρήθηκαν και απεικονίστηκαν με την χρήση ενός αναλυτή κεραίας NanoVNA Saver ,λογισμικό για ανάλυση δεδομένων από έναν αναλυτή δικτύου.Ύστερα από την πειραματική μελέτη λαμβάνουμε τα παρακάτω διαγράμματα στα οποία θα γίνει η ανάλυση τους.

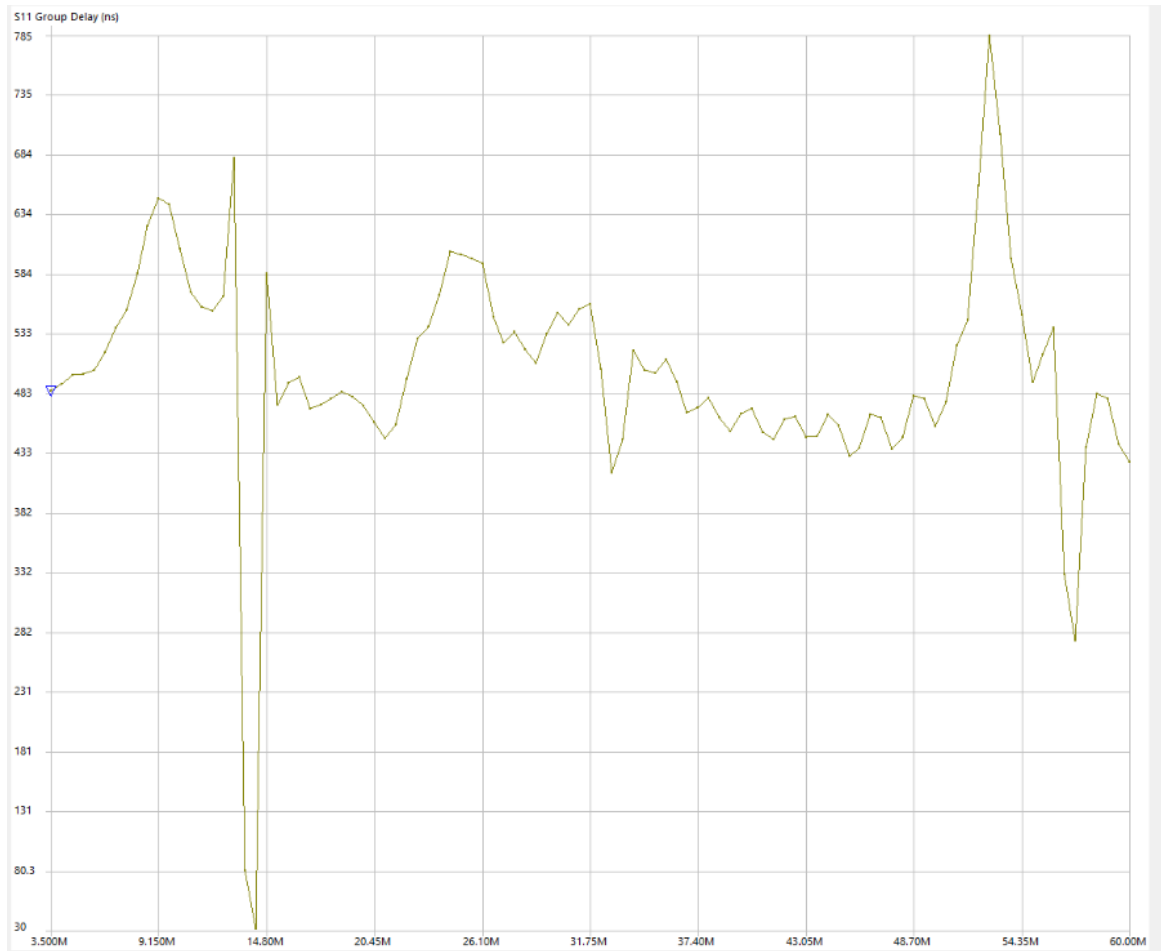
### 3.1 Διάγραμμα πραγματικού (R) και φανταστικού (X) σε συναρτηση με τη συχνότητα



Εικόνα 3.2: Διάγραμμα πραγματικού (R) και φανταστικού (X) σε συναρτηση με τη συχνότητα

Το διάγραμμα της εικόνας 3.2 αναδुकνύει τις τιμές του πραγματικού(R) και του φανταστικού (X) μέρους της αντίστασης σε συνάρτηση με τη συχνότητα. Παρατηρείται έντονη ταλάντωση ,ειδικά στα χαμηλά MHz , και στη συνέχεια σταδιακή εξασθένιση καθώς η συχνότητα αυξάνεται. Τα αποτελέσματα δείχνουν μια αρχική τιμή της αντίστασης που φθίνει με την αύξηση της συχνότητας λόγω συντονισμού. Στη συχνότητα 12.5MHz η μωβ γραμμή δείχνει τιμή 42,87Ω, κάτι που είναι αρκετά κοντά στα 50 Ω και η πράσινη γραμμή δείχνει ότι το σύστημα είναι καθαρά επαγωγικό. Η κεραία είναι καλά προσαρμοσμένη.

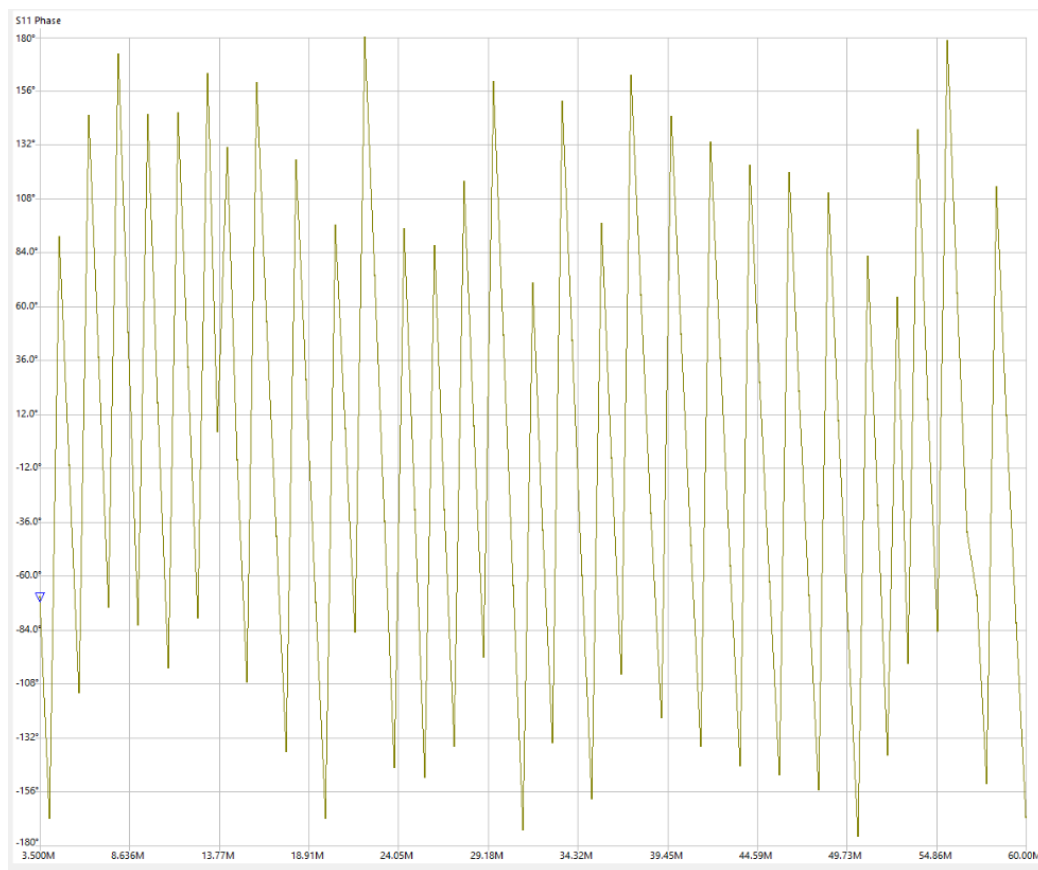
### 3.2 Διάγραμμα Group Delay Σε Συνάρτηση Με Τη Συχνότητα



Εικόνα 3.3 : Διάγραμμα Group Delay Σε Συνάρτηση Με Τη Συχνότητα

Το διάγραμμα της εικόνας 3.3 δείχνει τον πραγματικό χρόνο διέλευσης ενός σήματος που εισάγεται στη θέση τροφοδοσίας της κεραίας για να διαδοθεί μέσω του δικτύου προσαρμογής ως συνάρτηση της συχνότητας. Μια μεταβολή της καθυστέρησης 100-150ps και λιγότερο είναι αποδεκτή. Για συχνότητα 12.5 MHz είναι 30 ns, η οποία είναι επιθυμητή.

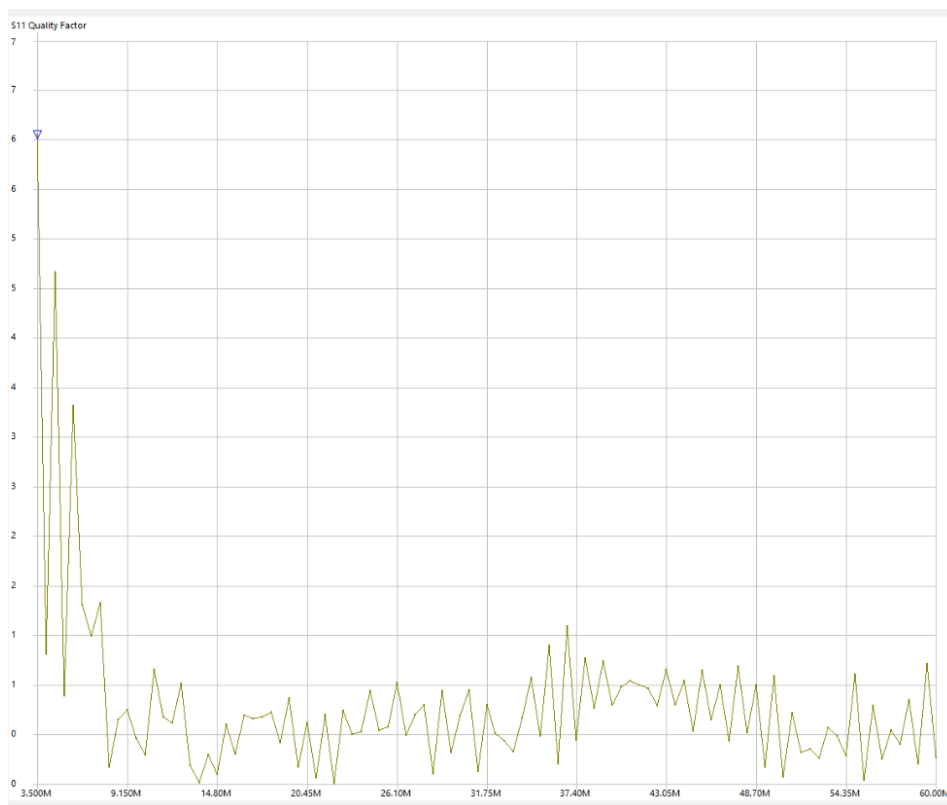
### 3.3 Διάγραμμα S11 Φάσης σε συνάρτηση με τη συχνότητα



Εικόνα 3.4 : Διάγραμμα S11 Φάσης σε συνάρτηση με τη συχνότητα

Το διάγραμμα της εικόνας 3.4 αναδεικνύει τη φάση της παραμέτρου S11, δηλαδή πόσο η κεραία αντανακλά το σήμα που λαμβάνει σε διάφορες συχνότητες. Παρατηρείται κυματομορφή σε εναλλασσόμενες κορυφές και κοιλάδες, υποδεικνύοντας ότι η φάση αλλάζει περιοδικά με τη συχνότητα. Οι έντονες εναλλαγές στη φάση είναι σύνηθες φαινόμενο και υποδηλώνει απόκριση συντονισμού σε ορισμένες συχνότητες. Συγκεκριμένα, στα 12.5MHz η τιμή είναι περίπου 6 μοίρες, κάτι που δείχνει μικρή απόκλιση, υποδεικνύοντας καλή προσαρμογή της κεραίας στη συγκεκριμένη συχνότητα.

### 3.4. Διάγραμμα Quality Factor

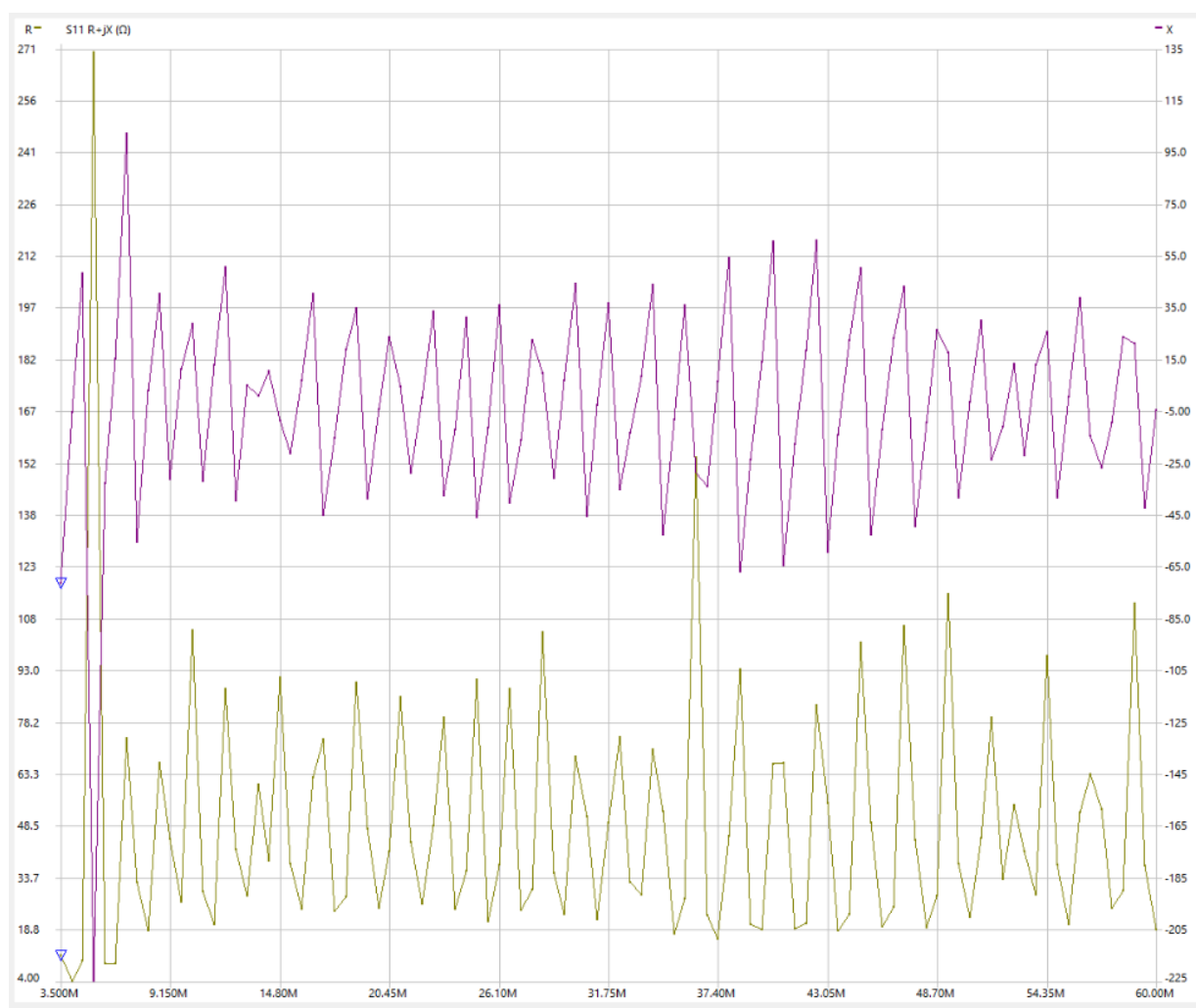


Εικόνα 3.5 Διάγραμμα Quality Factor

Ο συντελεστής Q (Quality Factor) μιας κεραίας αναφέρεται στην ευκρίνεια ή το εύρος ζώνης της συντονισμένης συχνότητας. Ένας υψηλός συντελεστής Q σημαίνει ότι η κεραία είναι πολύ αποδοτική σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, αλλά με μικρό εύρος ζώνης. Ένας χαμηλός συντελεστής Q σημαίνει ότι η κεραία μπορεί να λειτουργεί σε ευρύτερο εύρος συχνοτήτων, αλλά με μειωμένη αποδοτικότητα. Το διάγραμμα της εικόνας 3.5 S11 Quality Factor αντιπροσωπεύει την απώλεια επιστροφής (S11) της κεραίας στο συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων.



### 3.5 Διάγραμμα S11 R + jX(Ω)

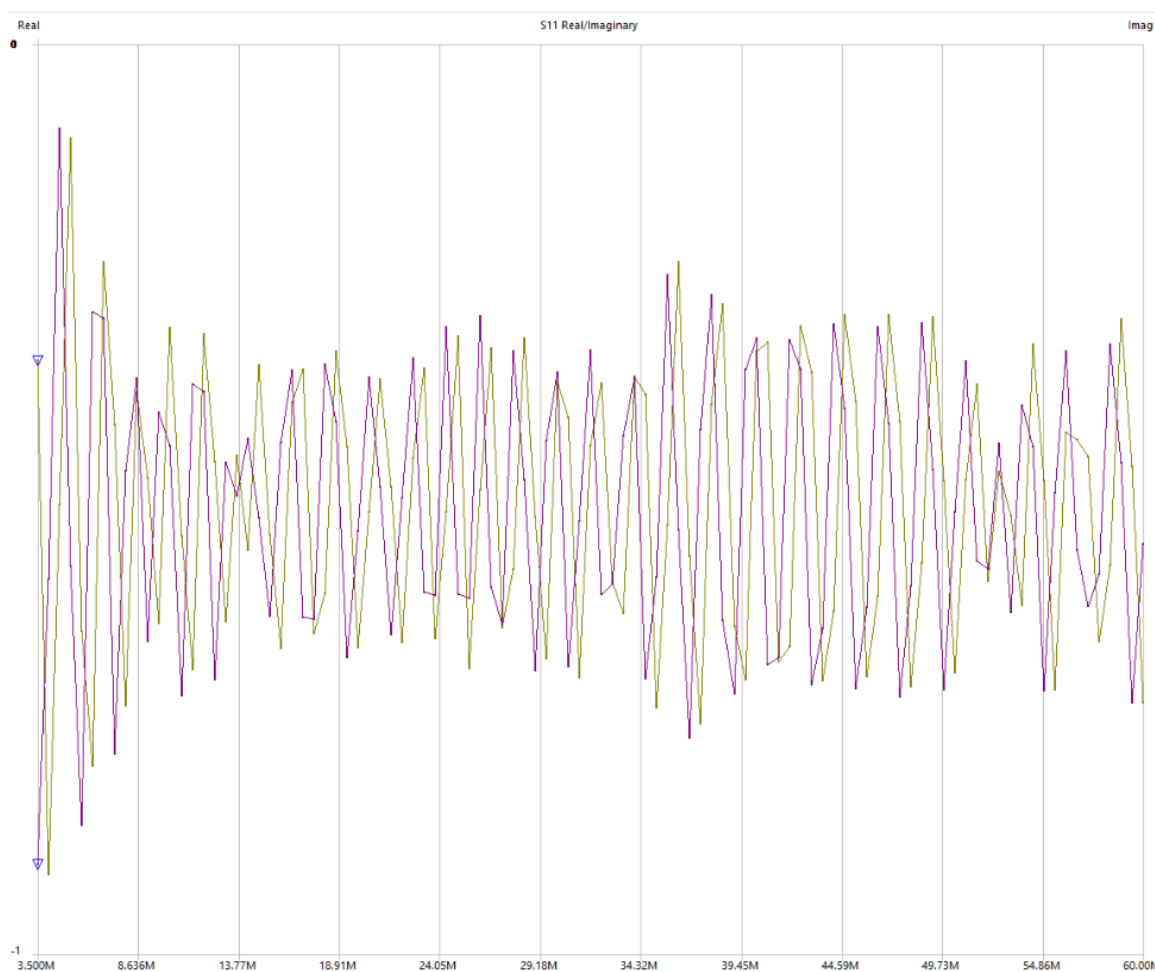


Εικόνα 3.6 : Διάγραμμα S11 R + jX(Ω)

Το διάγραμμα της εικόνας 3.6 αναπαριστά την αντίσταση R και την φανταστική αντίσταση jX σε σχέση με τη συχνότητα ( $\omega/f$ ). Πρέπει να είναι κοντά στην τιμή 50 (Ω) για την βέλτιστη απόδοση. Η πράσινη γραμμή στο διάγραμμα αναπαριστά την πραγματική συνιστώσα δηλαδή την καθαρή αντίσταση σε Ω (Ohm). Στο διάγραμμα, βλέπουμε ότι η αντίσταση R κυμαίνεται ανάλογα με τη συχνότητα, με αρκετές κορυφές και κοιλάδες, πράγμα που σημαίνει ότι η προσαρμογή της κεραίας δεν είναι σταθερή σε όλο το εύρος συχνοτήτων. Στην συχνότητα των 12.5 MHz έχει τιμή 48,50 Ω, το οποίο δηλώνει καλή προσαρμογή. Η μωβ γραμμή αναπαριστά την φανταστική συνιστώσα της

εμπέδησης ( $jX$ ), η οποία συνδέεται με τις χωρητικές ή επαγωγικές ιδιότητες της κεραίας. Στο διάγραμμα βλέπουμε ότι η  $jX$  παρουσιάζει θετική τιμή, είναι δηλαδή επαγωγική.

### 3.6 Διάγραμμα S11 Real / Imaginary

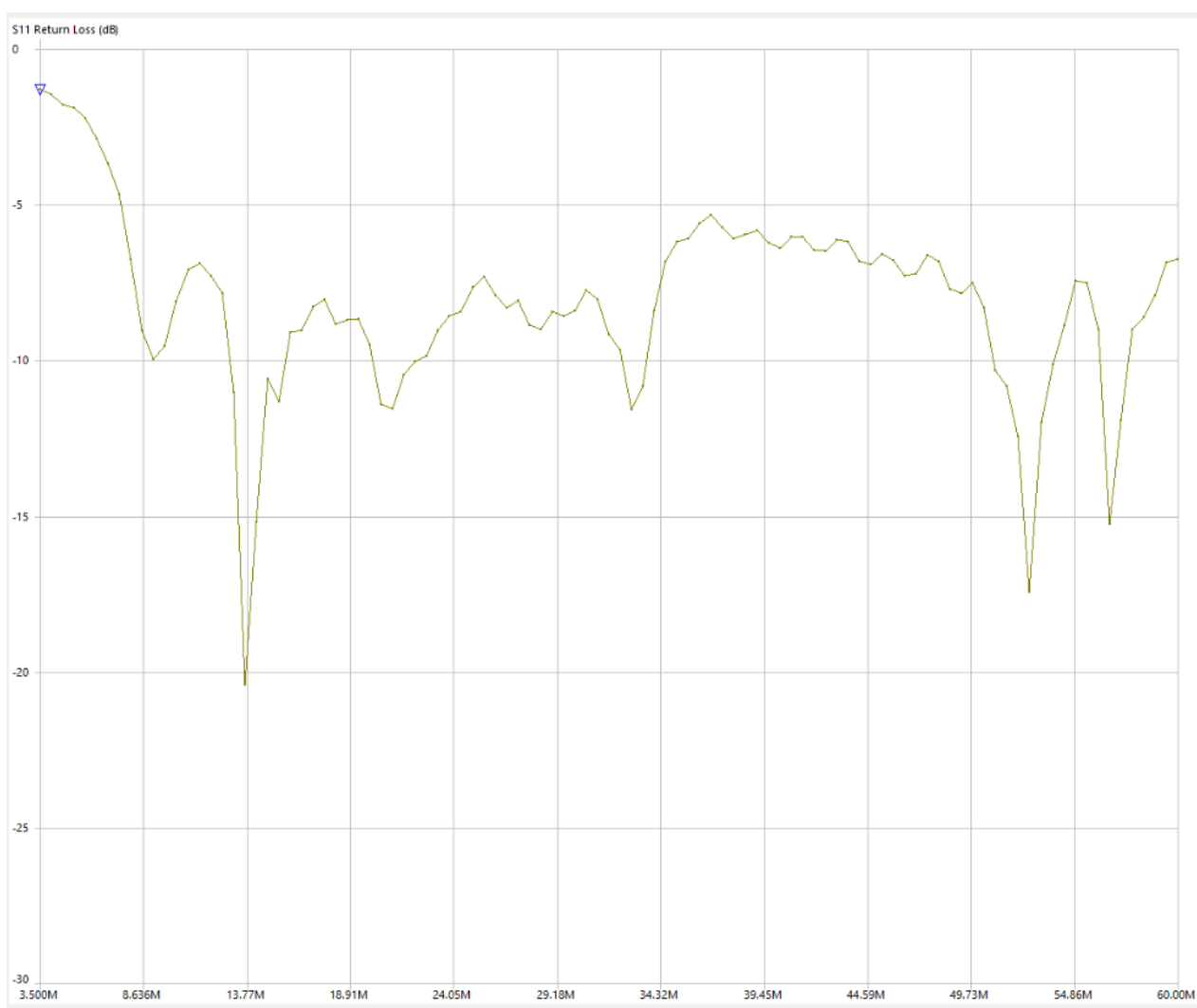


Εικόνα 3.7: Διάγραμμα S11 Real / Imaginary

Η παράμετρος S11 είναι ένας σύνθετος αριθμός, ο οποίος μπορεί να αναλυθεί σε πραγματικό και φανταστικό μέρος. Το πραγματικό μέρος αφορά το ποσοστό ανάκλασης που είναι σε φάση με το εισερχόμενο σήμα, ενώ το φανταστικό μέρος σχετίζεται με τη φάση της ανάκλασης που είναι εκτός φάσης με το εισερχόμενο σήμα. Το S11 ισούται με 0 όταν όλη η ισχύς εισέρχεται στη συσκευή και τίποτα δεν ανακλάται πίσω (ιδανική προσαρμογή). Ενώ το S11 κοντά στο -1 δείχνει σχεδόν ότι όλη η ισχύς ανακλάται πίσω στην πηγή (κακή προσαρμογή). Το φανταστικό μέρος παίζει ρόλο στη φάση της ανάκλασης. Το

διάγραμμα της εικόνας 3.7 δείχνει ότι είναι και το πραγματικό και το φανταστικό μέρος ενδιάμεσα της τιμής 0 και -1.

### 3.7. Διάγραμμα Return Loss σε Συνάρτηση με τη Συχνότητα

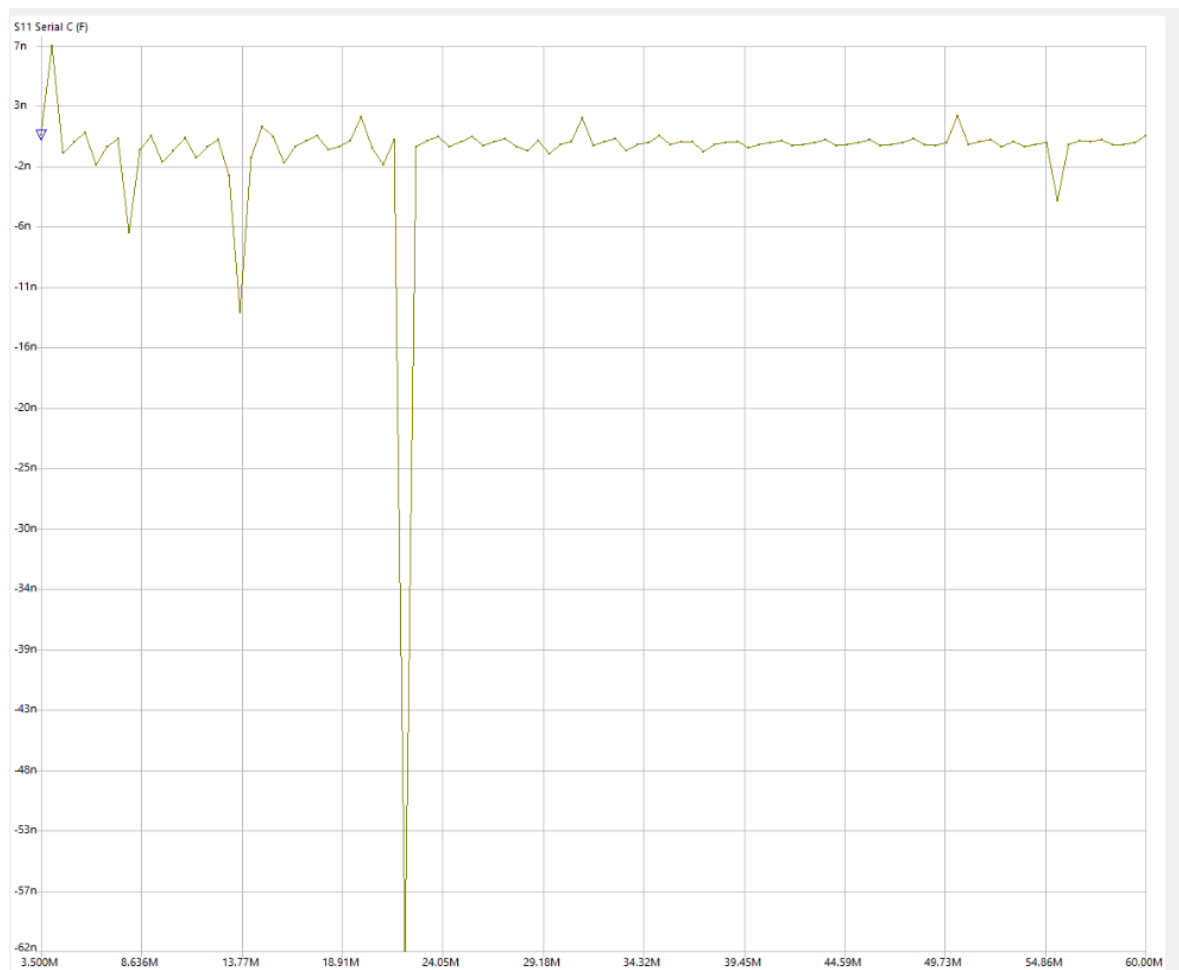


Εικόνα 3.8 Διάγραμμα Return Loss σε Συνάρτηση με τη Συχνότητα

Η παράμετρος S11 σχετίζεται άμεσα με την απώλεια επιστροφής (Return Loss), η οποία εκφράζεται σε dB. Το S11 μετρά την ανακλώμενη ισχύ πίσω στην πηγή, ενώ το Return Loss εκφράζει το πόσο καλά έχει προσαρμοστεί η κεραία. Το Return Loss σχετίζεται με το S11 και εκφράζεται ως  $\text{Return Loss (dB)} = -20\log_{10}(|S11|)$ . Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του Return Loss

(σε θετικούς dB) ,τόσο λιγότερη ισχύς ανακλάται και τόσο καλύτερη είναι η προσαρμογή της κεραίας.Το διάγραμμα της εικόνας 3.8 δείχνει ότι η τιμή είναι -20 dB στη συχνότητα 12.5MHz.

### 3.8. Διάγραμμα S11 Serial C (f)

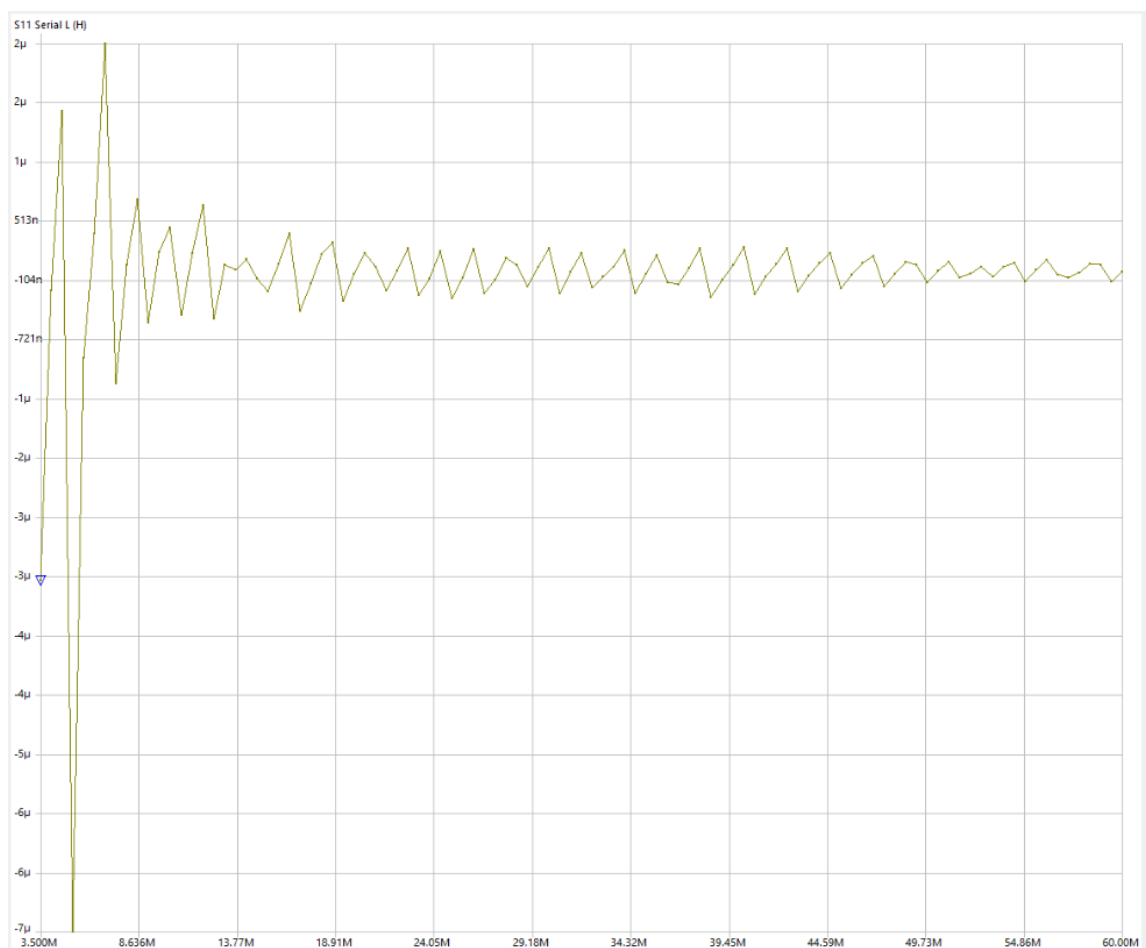


Εικόνα 3.9 Διάγραμμα S11 Serial C (f)

Ένα κύκλωμα που περιλαμβάνει έναν σειριακό πυκνωτή (serial capacitor), μπορεί να μας δείξει σημαντικές πληροφορίες για τη συμπεριφορά του κυκλώματος στις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Ένας σειριακός πυκνωτής προσθέτει μια αντίσταση στο κύκλωμα, η οποία εξαρτάται

από τη συχνότητα και προκαλεί αλλαγές τόσο στη φάση όσο και στο μέγεθος του. Ο πυκνωτής σε σειρά τείνει να μειώνει την αντίσταση σε χαμηλότερες συχνότητες και να μετατοπίζει τη συντονιστική συχνότητα της κεραίας προς υψηλότερες τιμές

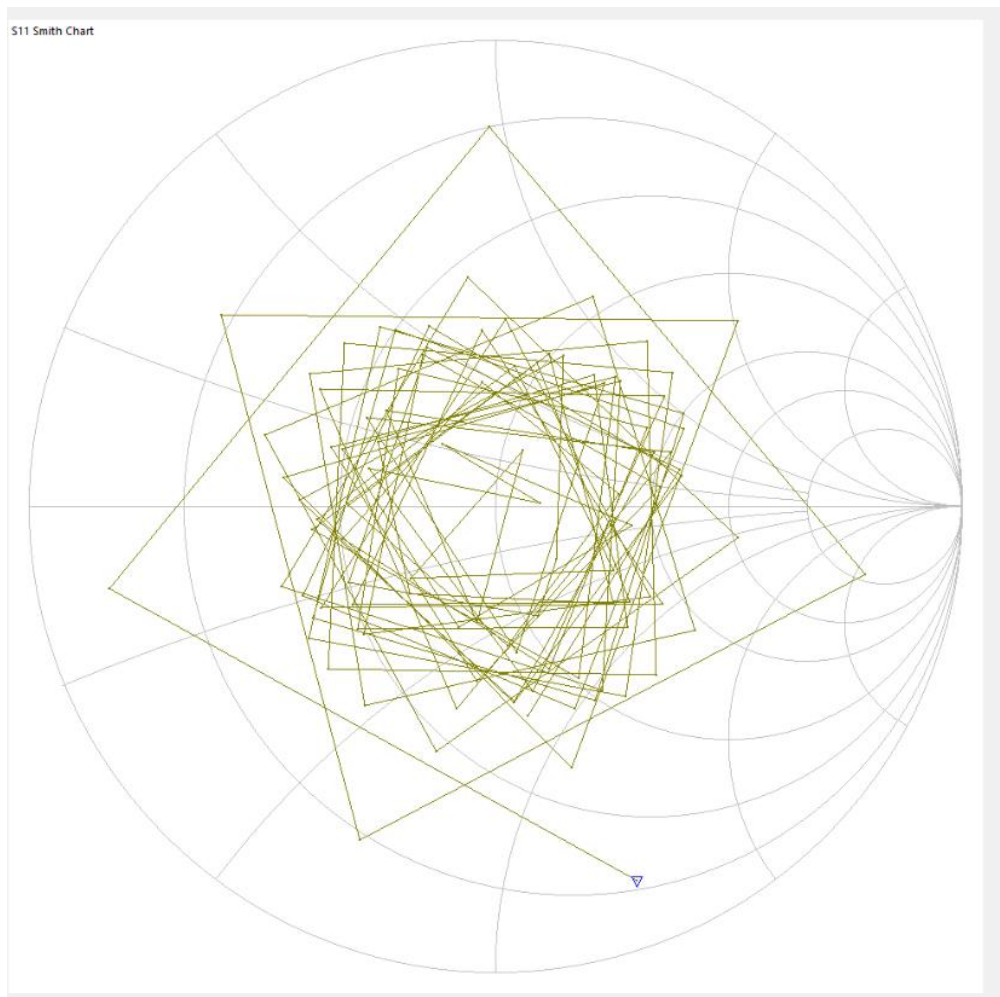
### 3.9. Διάγραμμα Serial L (H)



Εικόνα 3.10: Διάγραμμα Serial L (H)

Το διάγραμμα της εικόνας 3.10 περιλαμβάνει σειριακή επαγωγή (Serial L) η οποία δείχνει πως επηρεάζει τη προσαρμογή της κεραίας σε διαφορετικές συχνότητες. Η παρουσία ενός επαγωγικού στοιχείου στη γραμμή εισόδου της κεραίας προκαλεί αύξηση της συνολικής αντίδρασης του συστήματος.

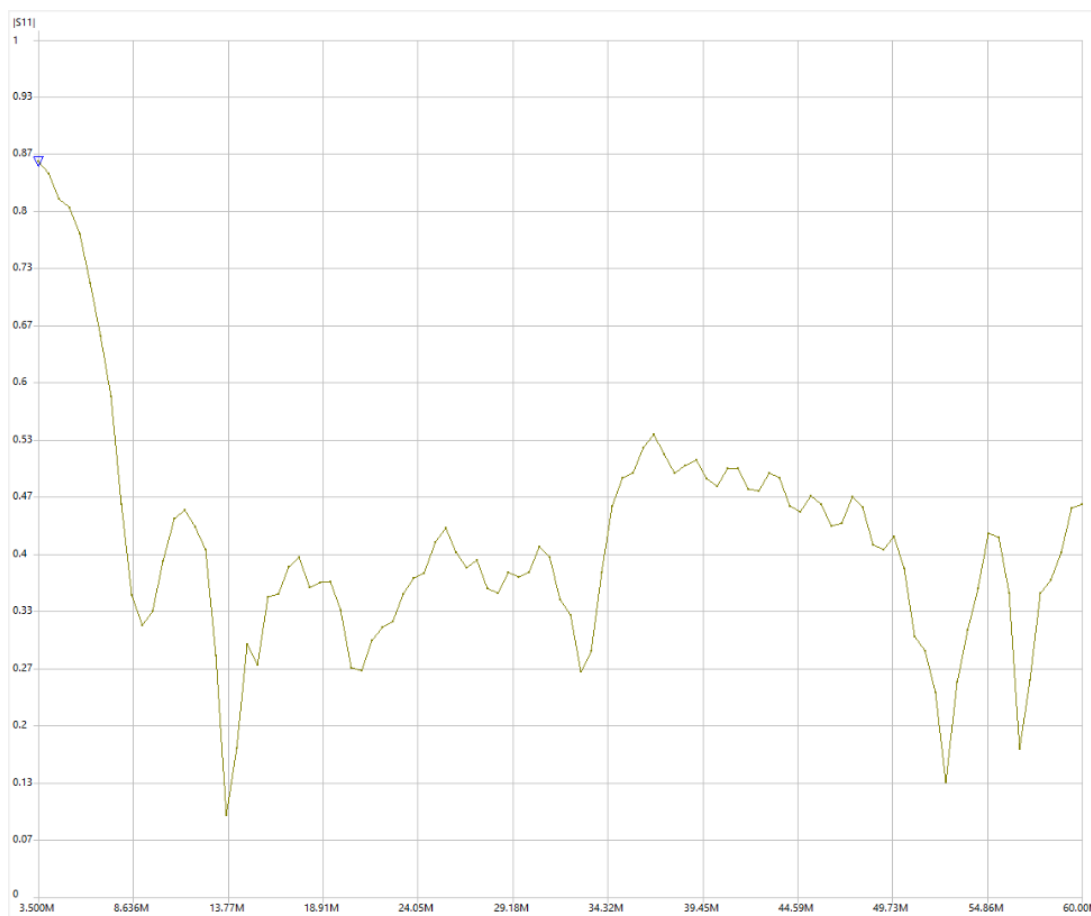
### 3.10. Διάγραμμα Χαρτη Smith



Εικόνα 3.11: Διάγραμμα Χαρτη Smith

Το διάγραμμα της εικόνας 3.11 αναπαριστά το χάρτη Smith της κεραίας και στο σχήμα φαίνεται να επαναλαμβάνεται με πολυγωνικό τρόπο κοντά στο κέντρο του διαγράμματος, το οποίο υποδεικνύει μεταβολές στην εμπέδηση (impedance) της κεραίας σε διαφορετικές συχνότητες. Ο Smith Chart δείχνει πώς η πραγματική και η φανταστική συνιστώσα της εμπέδησης της κεραίας αλλάζει καθώς μεταβάλλεται η συχνότητα. Οι επαναλαμβανόμενοι κύκλοι ή πολυγωνικές γραμμές υποδεικνύουν ότι η εμπέδηση της κεραίας μεταβάλλεται συχνά και σημαντικά σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων που αναλύθηκαν. Το κέντρο του διαγράμματος (στο σημείο που οι γραμμές πλησιάζουν) αντιπροσωπεύει συντονισμένη εμπέδηση που είναι κοντά στην ιδανική τιμή των 50 ohms, η οποία είναι η επιθυμητή. Οι περιοχές του Smith Chart μακριά από το κέντρο δείχνουν περιοχές όπου η εμπέδηση δεν είναι ιδανική. Η απόκλιση υποδηλώνει μη προσαρμοσμένη κεραία, που σημαίνει ότι ένα μεγάλο μέρος της ισχύος θα ανακλαστεί πίσω (δεν θα απορροφηθεί από την κεραία) σε αυτές τις συχνότητες. Όταν η γραμμή στο διάγραμμα βρίσκεται προς τα δεξιά (θετική πραγματική συνιστώσα) ή προς τα αριστερά (αρνητική πραγματική συνιστώσα), αυτό δείχνει είτε επαγωγική είτε χωρητική αντίδραση.

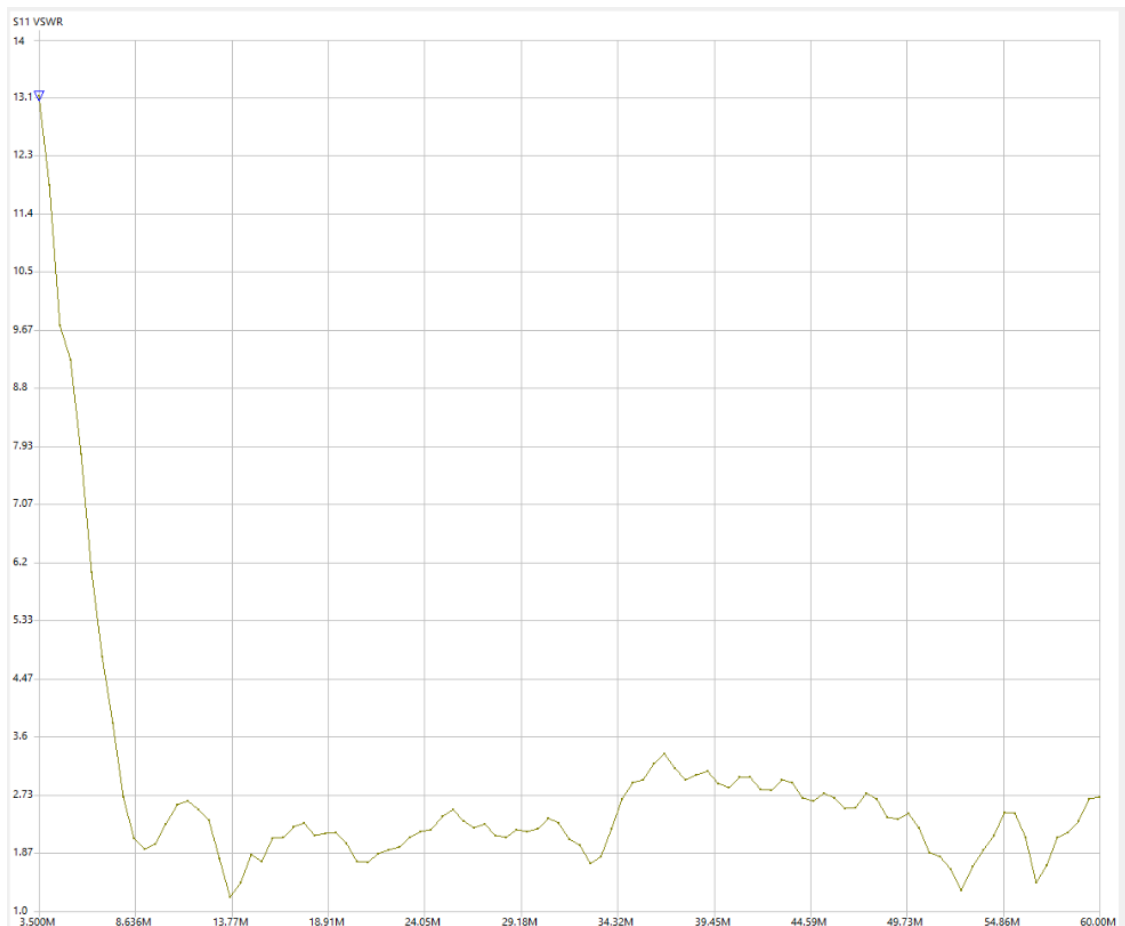
### 3.11. Διάγραμμα |S11|



Εικόνα 3.12 : Διάγραμμα |S11| ( Απόλυτου Συντελεστή Ανάκλασης)

Το διάγραμμα της εικόνας 3.12 μας δίνει πληροφορίες για το απόλυτο  $S_{11}$ , η οποία κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1. Ο απόλυτος συντελεστής μας δίνει πληροφορίες για την απόδοση και την προσαρμογή της κεραίας στην είσοδο της πηγής. Για τιμή  $|S_{11}| = 1$  όλη η ισχύς ανακλάται πίσω και για τιμή  $|S_{11}| = 0$  όλη η ισχύς απορροφάται ( τίποτα δεν ανακλάται). Η τιμή στο διάγραμμα φαίνεται να πλησιάζει το 0 δηλαδή η κεραία είναι καλά προσαρμοσμένη. Συγκεκριμένα η τιμή της είναι σχεδόν 0.1 που σημαίνει ότι το 1% της ισχύος ανακλάται και το 99% απορροφάται ή εκπέμπεται από την κεραία.

### 3.12 Διάγραμμα $S_{11}$ VSWR

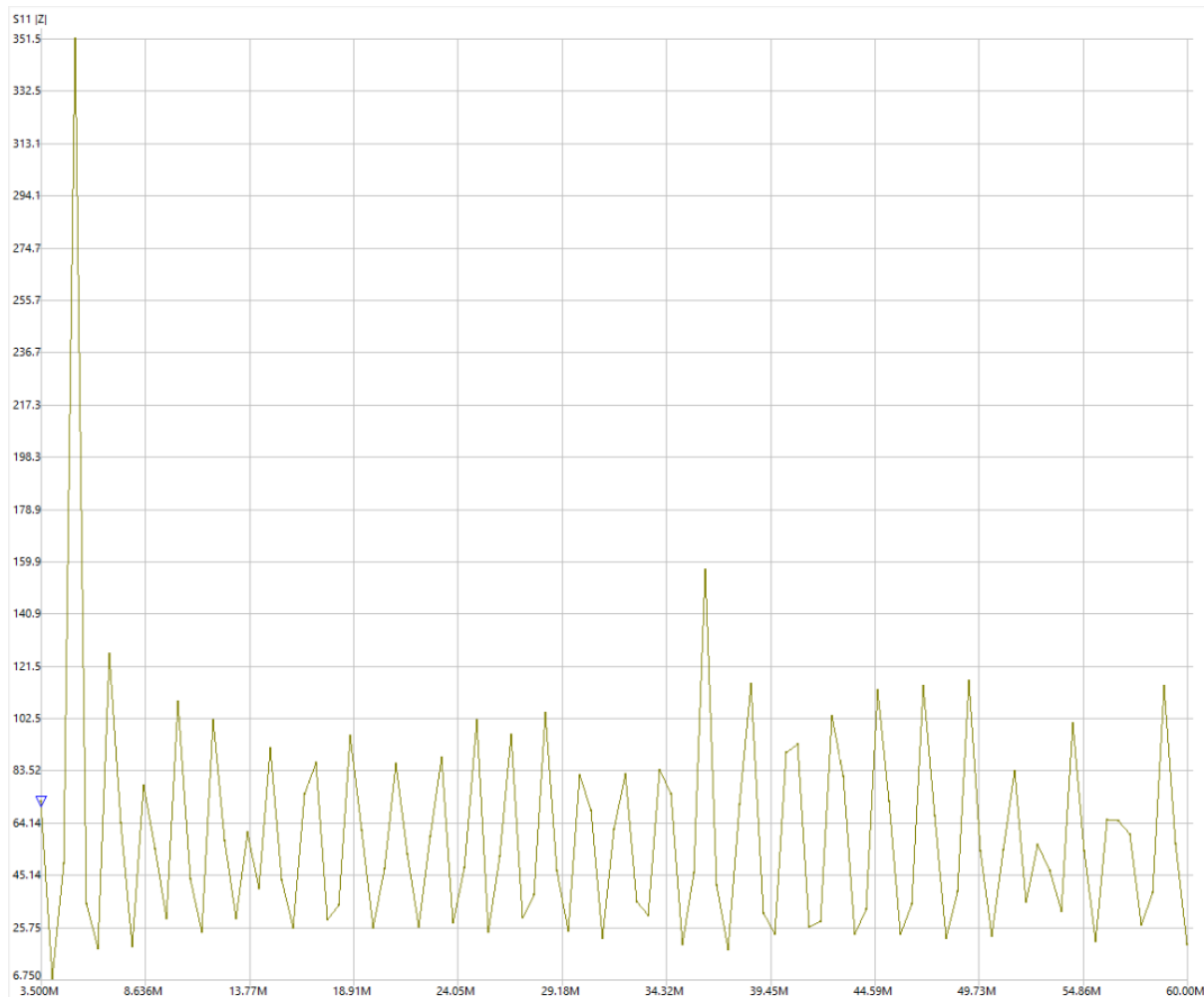




### Εικόνα 3.13 Διάγραμμα S11 VSWR

Το διάγραμμα της εικόνας 3.13 αναπαριστά το λόγο στάσιμου κύματος όπου στη συχνότητα 12.5 MHz δείχνει ότι η τιμή είναι σχεδόν 1:1 που δηλώνει ότι η κεραία είναι καλά προσαρμοσμένη.

### 3.13. Διάγραμμα S11 |Z|



Εικόνα 3.14 :Διάγραμμα S11 |Z|

Το διάγραμμα της εικόνας 3.14 απεικονίζει το απόλυτο μέγεθος  $Z$  της σύνθετης αντίστασης η οποία φαίνεται να είναι κοντά στη χαρακτηριστική αντίσταση  $50 \Omega$ .

### 3.14 Αποτελέσματα Πειράματος

Η πειραματική ανάλυση της κεραίας Moonraker GPA-80 HF (80-6M) στα 12.5 MHz, χρησιμοποιώντας τον αναλυτή κεραίας NanoVNA Saver, έδειξε εξαιρετική απόδοση και προσαρμογή εμπέδησης, με την κεραία να βρίσκεται σε καλό συντονισμό. Η ανάλυση του παραμέτρου S11 υποδεικνύει χαμηλή ανάκλαση ισχύος σε αυτή τη συχνότητα, με τη μέτρηση να φτάνει τιμές της τάξης των -20 dB, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η κεραία απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος που τροφοδοτείται από τον πομπό, χωρίς σημαντικές απώλειες λόγω αντανάκλασης.

Συγκεκριμένα, το διάγραμμα S11 έδειξε σταθερή πτώση στο εύρος των 12.4-12.6 MHz, με το σημείο συντονισμού να εμφανίζεται κοντά στα 12.5 MHz. Αυτό δείχνει ότι η κεραία είναι καλά συντονισμένη στην εν λόγω συχνότητα και λειτουργεί με αποδοτική μεταφορά ισχύος, εξασφαλίζοντας βελτιωμένη απόδοση στην επικοινωνία στις ζώνες HF.

Η ανάλυση με τον Smith Chart έδειξε ότι η εμπέδηση της κεραίας κοντά στα 12.5 MHz πλησιάζει τα 50 Ohms, γεγονός που επιβεβαιώνει τη σωστή προσαρμογή του συστήματος τροφοδοσίας με την κεραία. Αυτή η εξαιρετική προσαρμογή εμπέδησης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης της κεραίας στην εν λόγω συχνότητα.

Συνολικά, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η Moonraker GPA-80 HF μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά στα 12.5 MHz, εξασφαλίζοντας χαμηλό SWR (Standing Wave Ratio) και καλή προσαρμογή εμπέδησης. Η κεραία παρουσιάζει σταθερή και αποδοτική απόδοση σε αυτή τη συχνότητα, καθιστώντας την ιδανική για χρήση σε εφαρμογές HF επικοινωνιών που απαιτούν αξιόπιστη και αποδοτική εκπομπή και λήψη σημάτων στα 12.5 MHz, χωρίς την ανάγκη για περαιτέρω προσαρμογή.

## 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 4.1 Σύνοψη Εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η θεωρία και η πρακτική σχεδίαση κάθετων κεραίων για βραχέα κύματα, με έμφαση στη λειτουργία των κεραίων  $\lambda/4$ . Αποσαφηνίστηκε η σχέση μεταξύ του μήκους κύματος και των φυσικών διαστάσεων της κεραίας, καθώς και η σημασία του επιπέδου γείωσης και της σωστής τροφοδοσίας για τη βελτίωση της απόδοσης.

Προχωρώντας στην προσομοίωση, έγινε χρήση του προγράμματος 4NEC2, το οποίο επιβεβαίωσε τα θεωρητικά αποτελέσματα. Τα διαγράμματα ακτινοβολίας που παρήχθησαν μέσω της προσομοίωσης έδειξαν την αναμενόμενη κατευθυντικότητα της κεραίας  $\lambda/4$ , με κύρια δέσμη ακτινοβολίας στον ορίζοντα, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για επικοινωνίες σε μεγάλες αποστάσεις στα βραχέα κύματα.

Ακολούθησε η κατασκευή της κεραίας, η οποία πραγματοποιήθηκε με επιτυχία. Οι μετρήσεις απόδοσης (SWR, ισχύς ακτινοβολίας) επιβεβαίωσαν ότι η κάθετη κεραία λειτουργεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές, ενώ οι δοκιμές της επιβεβαίωσαν την ικανότητά της να εκπέμπει και να λαμβάνει σήματα σε μεγάλες αποστάσεις, χάρη στη διάδοση των βραχέων κυμάτων.

Τέλος, η σημασία του συστήματος γείωσης (radials) αναδείχθηκε, καθώς τα πειράματα με διαφορετικές διαμορφώσεις radials έδειξαν ότι η αύξηση του αριθμού τους βελτιώνει σημαντικά την απόδοση της κεραίας, μειώνοντας τις απώλειες και αυξάνοντας το κέρδος.

Η κατασκευή της κάθετης κεραίας  $\lambda/4$  αποδείχθηκε μια αποτελεσματική και οικονομική λύση για επικοινωνίες σε βραχέα κύματα, παρέχοντας καλή απόδοση και αξιοπιστία κάτω από διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες.

### 4.2 Μελλοντικές Βελτιώσεις

Παρότι η εργασία ολοκληρώθηκε με επιτυχία, υπάρχουν αρκετές δυνατότητες για βελτιώσεις στο μέλλον. Αρχικά, η μελέτη του βέλτιστου αριθμού και μήκους των radials θα μπορούσε να αυξήσει περαιτέρω την απόδοση της κεραίας. Επιπλέον, η κεραία θα μπορούσε να προσαρμοστεί για να λειτουργεί σε πολλαπλές συχνότητες, είτε με τη χρήση κυκλωμάτων προσαρμογής είτε με την ενσωμάτωση traps (παγίδων), επιτρέποντας τη χρήση της σε περισσότερες μπάντες των βραχέων κυμάτων.

Μια ακόμη βελτίωση αφορά τη χρήση πιο προηγμένων λογισμικών προσομοίωσης, όπως το CST Microwave Studio, το οποίο θα μπορούσε να παράσχει πιο ακριβείς προβλέψεις για την απόδοση της κεραίας σε διαφορετικές περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες, όπως το έδαφος ή το υψόμετρο.

Επιπρόσθετα, η κεραία θα μπορούσε να κατασκευαστεί από ελαφρύτερα και ανθεκτικότερα υλικά, όπως το αλουμίνιο, για καλύτερη αντοχή σε καιρικές συνθήκες και ευκολότερη εγκατάσταση σε κινητές ή προσωρινές εφαρμογές.

Η ενσωμάτωση ενός αυτόματου συστήματος προσαρμογής (automatic tuner) θα επέτρεπε την αυτόματη ρύθμιση της κεραίας σε διάφορες συχνότητες, χωρίς να απαιτείται χειροκίνητη ρύθμιση, βελτιώνοντας την απόδοσή της.

Επίσης, θα μπορούσε να διερευνηθεί η απόδοση της κεραίας σε διάφορες καιρικές συνθήκες, όπως υγρασία, βροχή ή χιόνι, ώστε να διασφαλιστεί η σταθερή απόδοσή της κάτω από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Τέλος, η κεραία  $\lambda/4$  μπορεί να μελετηθεί ως μέρος ενός δικτύου κεραίων (antenna array), επιτρέποντας την επίτευξη υψηλότερου κέρδους και κατευθυντικότητας. Αυτό θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιπτώσεις όπου απαιτείται μεγαλύτερη ισχύς εκπομπής ή λήψης σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις.

Με τις προαναφερόμενες βελτιώσεις, η σχεδίαση και κατασκευή της κεραίας  $\lambda/4$  θα μπορούσε να εξελιχθεί ακόμη περισσότερο, επιτυγχάνοντας υψηλότερη απόδοση και ευελιξία για πολλές διαφορετικές εφαρμογές ραδιοεπικοινωνιών και επαγγελματικών χρήσεων.

## Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

1. Constantine A. Balanis-Antenna Theory\_ Analysis and Design-Wiley (2016)
2. Antenna Engineering Handbook – Third Edition, Johnson
3. Antenna theory and design, Warren L. Stutzman by John Wiley & Sons
4. Pozar, David M - Microwave engineering-Wiley (2012)
5. RF Circuit Design, Bowick et al., (Newnes, 2008)
6. Adler, Dick (10/1993). "Information on the History and Availability of NEC-MOM Codes for PC's & Unix". Applied Computational Electromagnetics Society Newsletter: 8–10.
7. Burke, Gerald; Poggio, Andrew (01/1981). NEC Part I: Program Description - Theory (Technical report). Lawrence Livermore Laboratory.
8. The ARRL Antenna Book for Radio Communications  
[https://hamradio.vazenterprises.com/wp-content/uploads/The-ARRL-antenna-book-by-R.-Dean-Straw-z-lib.org\\_-1.pdf](https://hamradio.vazenterprises.com/wp-content/uploads/The-ARRL-antenna-book-by-R.-Dean-Straw-z-lib.org_-1.pdf)
9. Carr, Joseph.  
"The Ground-Plane Vertical Antenna: Construction and Analysis." ARRL Antenna Compendium, vol. 5, American Radio Relay League, 1996.
10. Hagn, G.  
"Design and Efficiency of Vertical Monopole Antennas on a Finite Ground Plane." Bell System Technical Journal, vol. 54, no. 8, 1975, pp. 1429-1445
11. Rohde, Ulrich L., and Jerry Whitaker.  
Communications Receivers: DSP, Software Radios, and Design. 4th ed., McGraw-Hill, 2016.
12. Moxon, Les M.  
HF Antennas for All Locations. 3rd ed., Radio Society of Great Britain, 2005.
13. Kraus, John D.  
Antennas. 2nd ed., McGraw-Hill
14. IEEE Xplore Digital Library.  
<https://ieeexplore.ieee.org>
15. Antennas and Propagation Society (IEEE).  
<https://www.ieeeaps.org/>
16. American Radio Relay League (ARRL).

<https://www.arrl.org/>

17. I.E.E.E. Transactions on Antennas and Propagation (Various Issues).
18. Christman, N. (2004). HF Antennas for All Locations. Radio Society of Great Britain.
19. Sevgi, L. (2018). Electromagnetic Modeling and Simulation. Wiley-IEEE Press.