

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Τομέας Τηλεπικοινωνιών

## **ΕΙΔΙΚΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ - ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΕΡΑΙΩΝ**

Σειρά Ασκήσεων 1: Υπολογιστική ανάλυση γραμμικών κεραιών με το NEC

**Φωτεινή Σαββίδου**

AEM: 9657

[sfoteini@ece.auth.gr](mailto:sfoteini@ece.auth.gr)

Ακαδημαϊκό Έτος 2021-2022

8<sup>ο</sup> Εξάμηνο

## Πίνακας περιεχομένων

1	Μελέτη της δισκοκωνικής κεραίας .....	3
1.1	Γεωμετρία της κεραίας.....	3
1.2	Αντίσταση εισόδου και συντελεστής ανάκλασης .....	5
1.3	Διαγράμματα ακτινοβολίας.....	6
1.4	Τελείως επίπεδη δισκοκωνική κεραία.....	9
2	Μελέτη της ελικοειδούς κεραίας.....	13
2.1	Γεωμετρία της κεραίας.....	13
2.2	Αντίσταση εισόδου .....	14
2.3	Συντελεστής Ανάκλασης.....	14
2.4	Διαγράμματα ακτινοβολίας.....	15

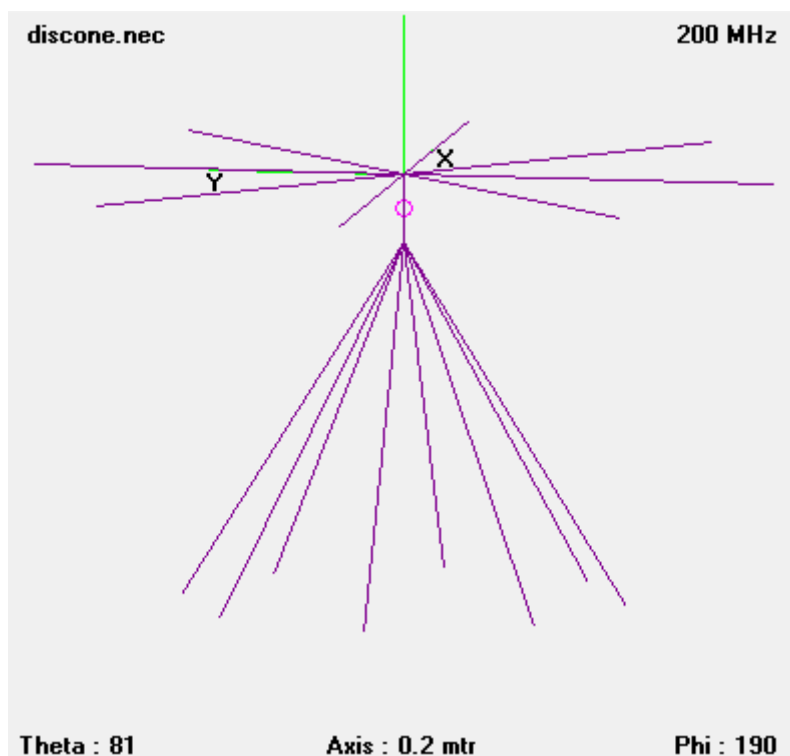
# 1 Μελέτη της δισκοκωνικής κεραίας

## 1.1 Γεωμετρία της κεραίας

Η δισκοκωνική κεραία είναι μία κεραία ευρείας ζώνης συχνοτήτων που αποτελείται από έναν κώνο και έναν δίσκο (ground), οι οποίοι υλοποιούνται με ένα πλέγμα αγωγών και η τροφοδοσία γίνεται με ομοαξονικό καλώδιο. Στην κεραία που μελετήθηκε ο δίσκος και ο κώνος υλοποιήθηκαν με 8 σύρματα. Το μήκος κύματος είναι  $\lambda = 1.5m$  και η αντίστοιχη συχνότητα είναι  $f_0 = 200MHz$ . Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δισκοκωνικής κεραίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Γεωμετρία της δισκοκωνικής κεραίας	
Ακτίνα δίσκου	$r = 0.25\lambda = 0.375m$
Μήκος συρμάτων του κώνου	$l = 0.3\lambda = 0.45m$
Γωνία ανοίγματος (από τον άξονα)	$\theta_0 = 30^\circ$
Διάμετρος συρμάτων	$D = \frac{\lambda}{150} = 0.01m$
Μήκος σύρματος τροφοδοσίας	$d = \frac{\lambda}{20} = 0.075m$

Πίνακας 1.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δισκοκωνικής κεραίας.



Εικόνα 1.1: Μοντελοποίηση της δισκοκωνικής κεραίας στο NEC.

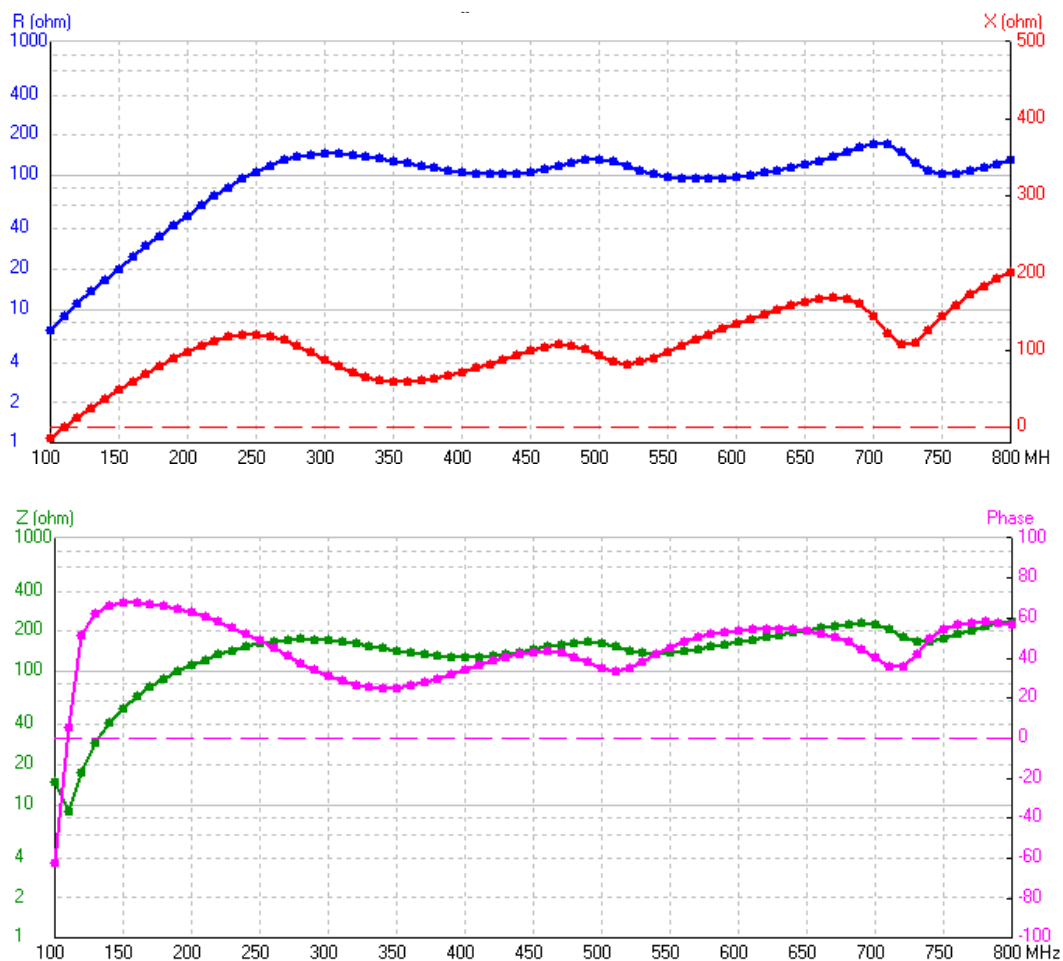
Για τη δημιουργία της κεραίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MATLAB. Δημιουργήθηκε η συνάρτηση *generate\_discone\_antenna()*, η οποία δέχεται ως είσοδο την ακτίνα του δίσκου, το μήκος των συρμάτων του κώνου, τη γωνία ανοίγματος  $\theta_0$ , την ακτίνα των συρμάτων και το μήκος του σύρματος τροφοδοσίας, υπολογίζει τις συντεταγμένες των δύο άκρων κάθε σύρματος και κατασκευάζει τις γραμμές GW του αρχείου NEC. Για τα σύρματα του δίσκου και του κώνου χρησιμοποιήθηκαν 9 segments, ενώ για το σύρμα τροφοδοσίας χρησιμοποιήθηκε ένα μόνο segment τροφοδοσίας. Για την τροφοδοσία επιλέχθηκε πηγή τάσης με μέτρο  $1 + j0$ .

#### Πρόγραμμα MATLAB 1: Υλοποίηση της γεωμετρίας της δισκοκωνικής κεραίας

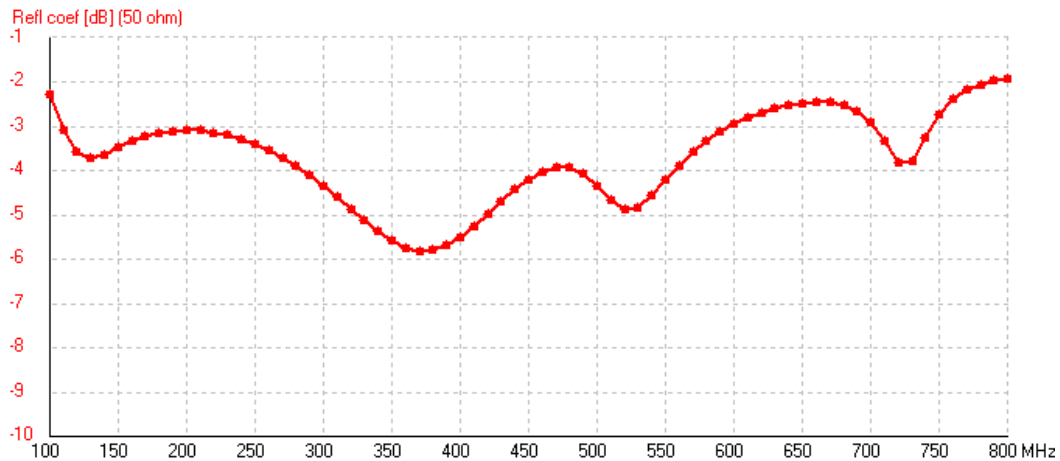
```
function generate_discone_antenna(r,l,theta,d,wire_r)
% Number of segments
nSegments = 9;
% Calculate the coordinates of the disk
disk_start = zeros(8,3);
disk_end = zeros(8,3);
phi = 0;
for i = 1:8
    disk_end(i,1) = r*cos(phi);
    disk_end(i,2) = r*sin(phi);
    phi = phi + pi/4;
end
% Calculate the coordinates of the cone
cone_start = zeros(8,3);
cone_end = zeros(8,3);
cone_start(:,3) = -d;
cone_end(:,3) = -d-l*cos(theta);
phi = 0;
for i = 1:8
    cone_end(i,1) = l*sin(theta)*cos(phi);
    cone_end(i,2) = l*sin(theta)*sin(phi);
    phi = phi + pi/4;
end
% Discone antenna data (disk, cone, source wire)
data = [(1:8)', nSegments*ones(8,1), disk_start, ...
        disk_end, wire_r*ones(8,1);
        (9:16)', nSegments*ones(8,1), cone_start, ...
        cone_end, wire_r*ones(8,1);
        17, 1, 0, 0, 0, 0, 0, -d, wire_r];
% Generate nec file
fileID = fopen('discone.nec','w');
fprintf(fileID,'%s\n',"CE");
format_spec = 'GW %d %d %.4f %.4f %.4f %.4f %.4f %.4f\n';
fprintf(fileID,format_spec,data);
fprintf(fileID,'%s\n',"GE 0");
fprintf(fileID,'%s\n',"EN");
fclose(fileID);
end
```

## 1.2 Αντίσταση εισόδου και συντελεστή ανάκλασης

Πραγματοποιήθηκε μελέτη *Frequency Sweep* σε ένα εύρος συχνοτήτων από  $f_1 = 0.5f_0 = 100\text{MHz}$  έως  $f_2 = 4f_0 = 800\text{MHz}$ . Η μεταβολή του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της αντίστασης εισόδου  $Z_{in}$  της κεραίας και του μέτρου του συντελεστή ανάκλασης για γραμμή τροφοδοσίας  $Z_0 = 50\Omega$  παρουσιάζεται στην *Εικόνα 1.2* και *1.3*, αντίστοιχα. Το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης λαμβάνει υψηλές τιμές (αρκετά μεγαλύτερες από τα  $-10\text{ dB}$ ) σε όλη την περιοχή συχνοτήτων που μελετήθηκε. Για τη βελτίωση του συντελεστή ανάκλασης επιλέχθηκε τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης της γραμμής τροφοδοσίας περίπου ίση με τη μέση τιμή του μέτρου της αντίστασης εισόδου  $Z_{in}$ .

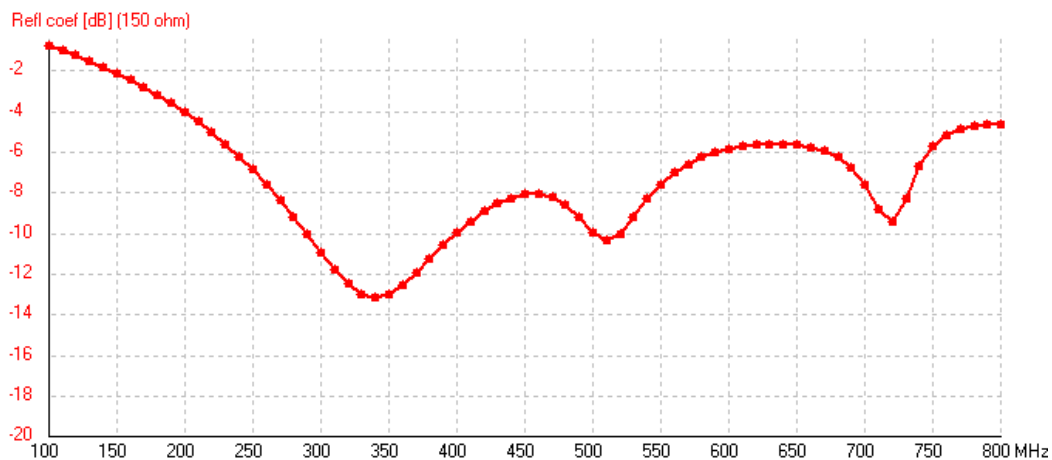


Εικόνα 1.2: Μεταβολή του πραγματικού και του φανταστικού μέρους (επάνω εικόνα) ή του μέτρου και της φάσης (κάτω εικόνα) της αντίστασης εισόδου της κεραίας στο εύρος συχνοτήτων 100-800MHz.



Εικόνα 1.3: Μεταβολή του μέτρου του συντελεστή ανάκλασης της κεραίας στο εύρος συχνοτήτων 100-800MHz για χαρακτηριστική αντίσταση 50Ω.

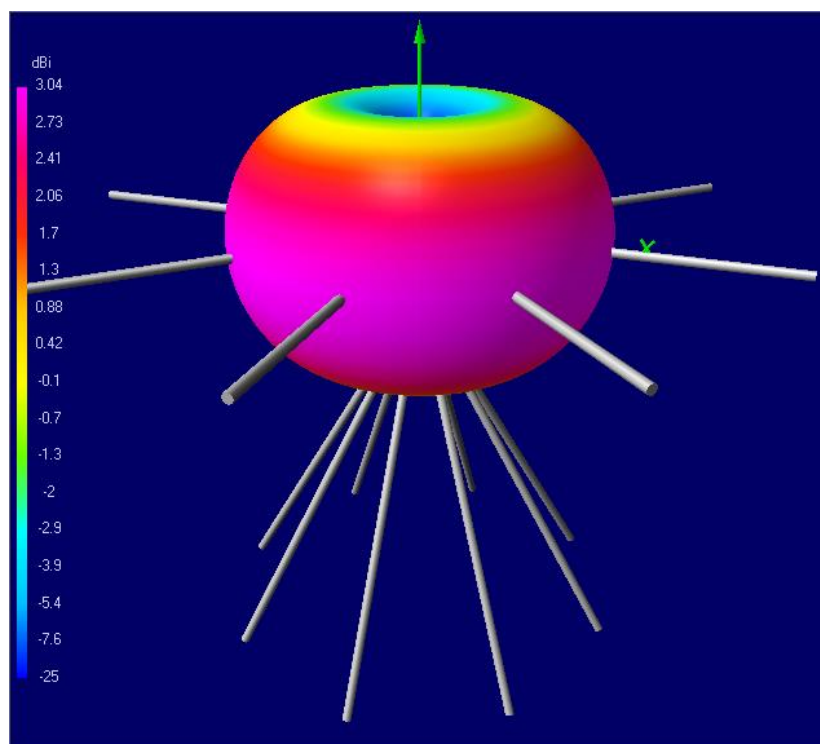
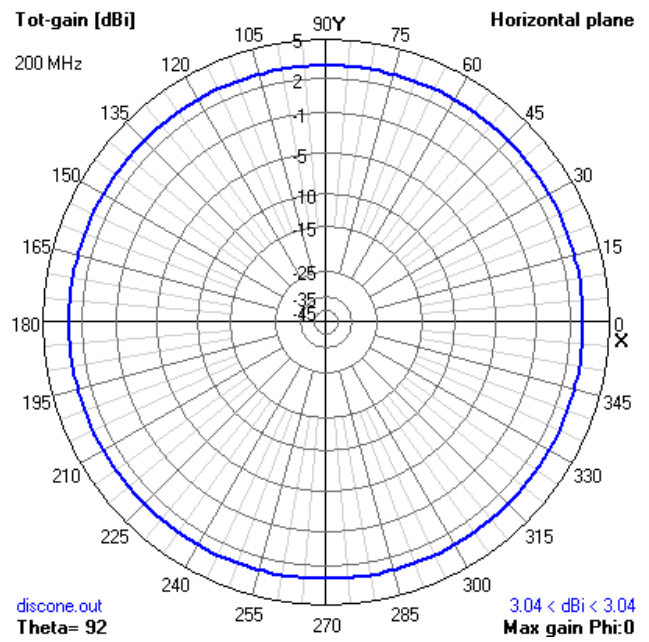
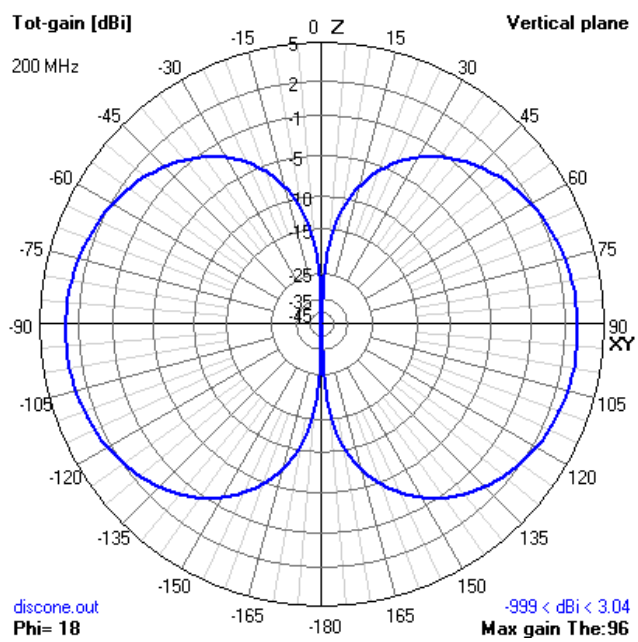
Η μέση τιμή του μέτρου της αντίστασης εισόδου είναι περίπου 150Ω στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής συχνοτήτων που μελετήθηκε. Άρα, για να εξασφαλιστεί τιμή του συντελεστή ανάκλασης μικρότερη από  $-10\text{dB}$  σε ένα ικανοποιητικό εύρος συχνοτήτων, η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής τροφοδοσίας επιλέγεται ίση με  $Z_0 = 150\Omega$ . Στην Εικόνα 1.4, φαίνεται πως το εύρος ζώνης συχνοτήτων λειτουργίας της κεραίας βελτιώθηκε· παραμένει όμως ακόμη στενό.



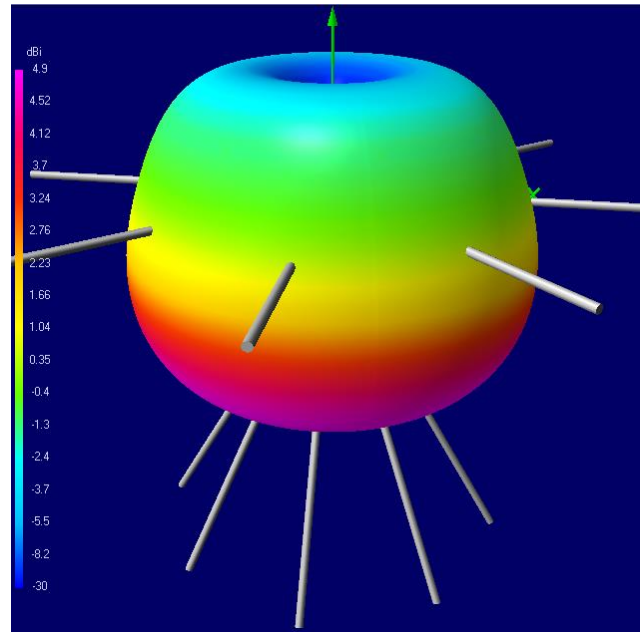
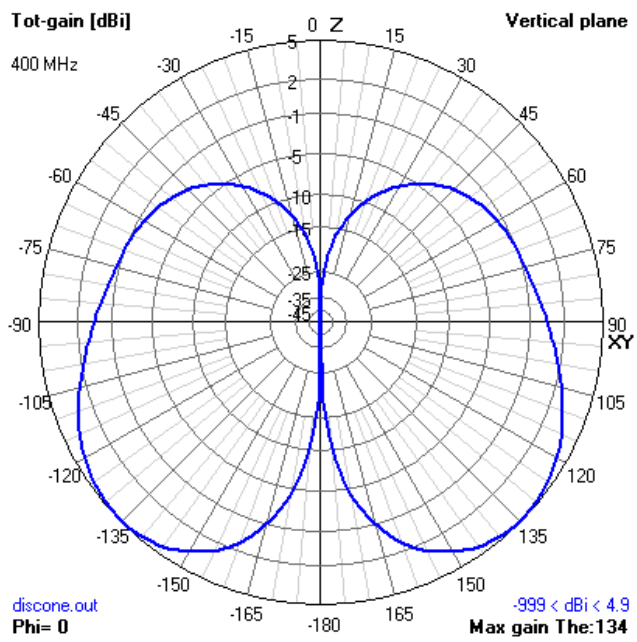
Εικόνα 1.4: Μεταβολή του μέτρου του συντελεστή ανάκλασης της κεραίας στο εύρος συχνοτήτων 100-800MHz για χαρακτηριστική αντίσταση 150Ω.

### 1.3 Διαγράμματα ακτινοβολίας

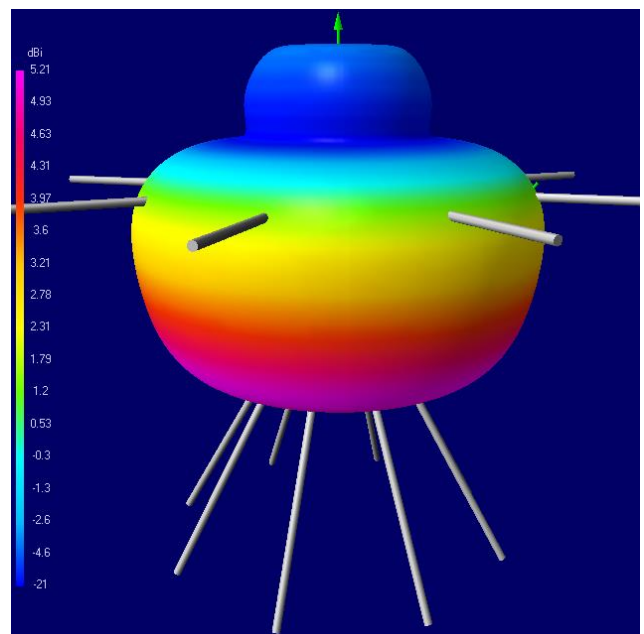
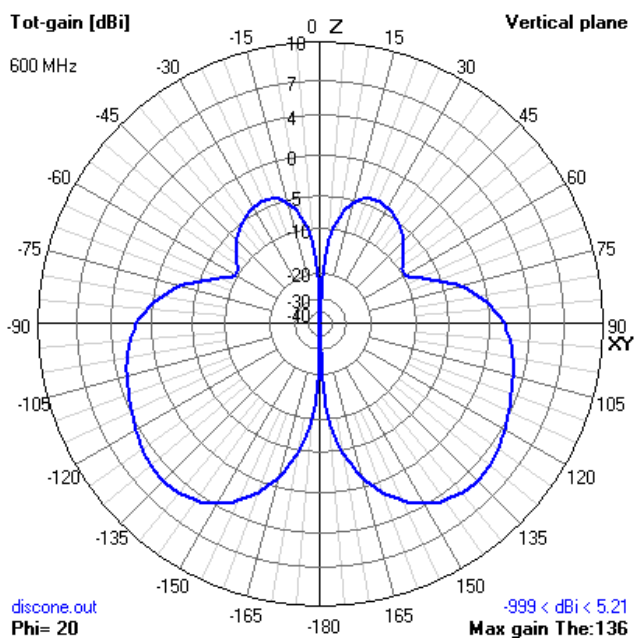
Μελετήθηκε το διάγραμμα ακτινοβολίας της δισκοκωνικής κεραίας στις συχνότητες:  $f_0 = 200\text{MHz}$ ,  $2f_0 = 400\text{MHz}$ ,  $3f_0 = 600\text{MHz}$  και  $4f_0 = 800\text{MHz}$ .



Εικόνα 1.5: Κατακόρυφο, οριζόντιο και 3D διάγραμμα ακτινοβολίας της δισκοκωνικής κεραίας σε συχνότητα  $f_0 = 200\text{MHz}$ .

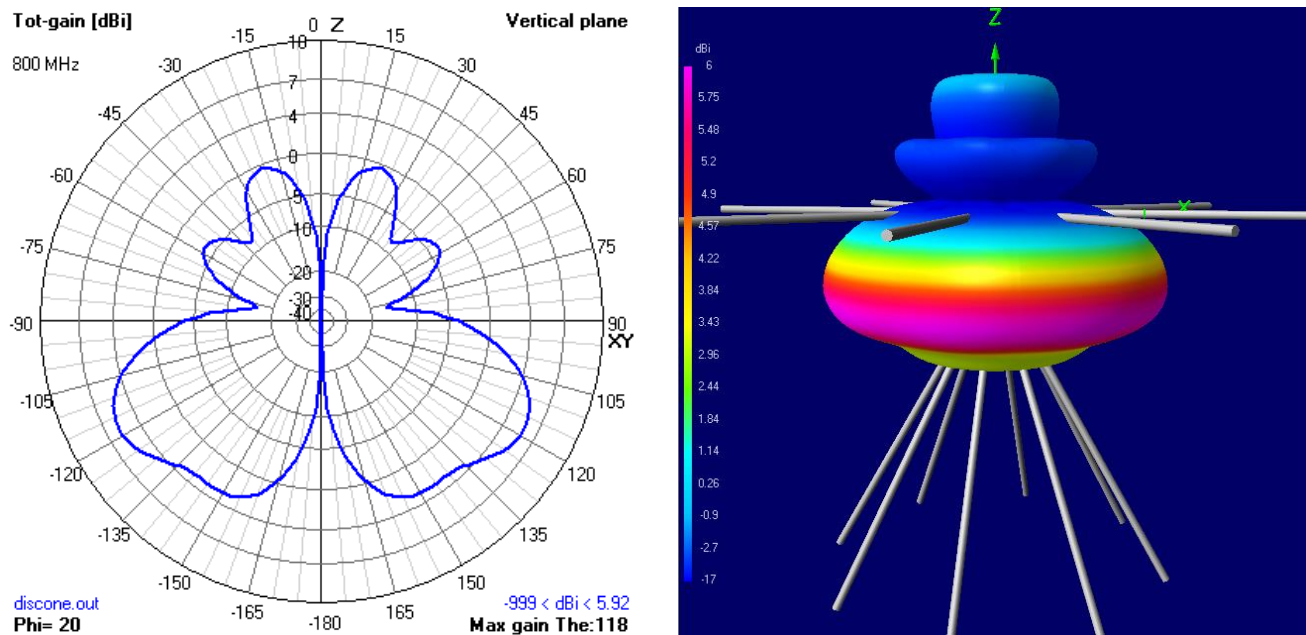


Εικόνα 1.6: Κατακόρυφο και 3D διάγραμμα ακτινοβολίας σε συχνότητα  $2f_0 = 400\text{MHz}$ .



Εικόνα 1.7: Κατακόρυφο και 3D διάγραμμα ακτινοβολίας σε συχνότητα  $3f_0 = 600\text{MHz}$ .



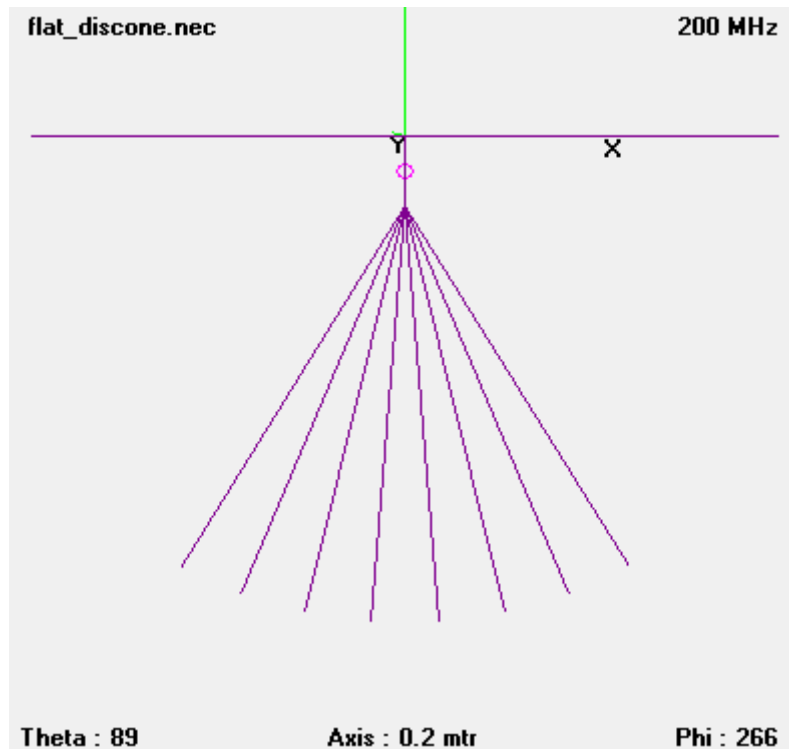


Εικόνα 1.8: Κατακόρυφο και 3D διάγραμμα ακτινοβολίας σε συχνότητα  $4f_0 = 800\text{MHz}$ .

Παρατηρούμε πως το διάγραμμα ακτινοβολίας της δισκοκωνικής κεραίας παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές με την αύξηση της συχνότητας. Συγκεκριμένα, στη συχνότητα  $f_0 = 200\text{MHz}$ , το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας μοιάζει με το διάγραμμα ενός διπόλου  $\frac{\lambda}{2}$  (το μέγιστο της ακτινοβολίας παρουσιάζεται σε διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο του κώνου). Στις υψηλότερες συχνότητες, οι δύο κύριοι λοβοί της κεραίας μετατοπίζονται προς τα κάτω και το μέγιστο της ακτινοβολίας είναι σε διεύθυνση σχεδόν παράλληλη προς την επιφάνεια του κώνου. Στο οριζόντιο επίπεδο, παρατηρείται ισοτροπική συμπεριφορά της κεραίας σε όλες τις συχνότητες.

#### 1.4 Τελείως επίπεδη δισκοκωνική κεραία

Η γεωμετρία της τελείως επίπεδης παραλλαγής της δισκοκωνικής κεραίας υλοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος MATLAB. Η κεραία αυτή προκύπτει από τη συμπίεση του κώνου σε κυκλικό τομέα ανοίγματος  $2\theta_0 = 60^\circ$  και από την αντικατάσταση του κυκλικού δίσκου (ground plane) με δύο σύρματα μήκους  $r = 0.25\lambda = 0.375\text{m}$  στο ίδιο επίπεδο με αυτό που σχηματίζεται από τα σύρματα του κώνου. Δημιουργήθηκε η συνάρτηση *generate\_flat\_discone\_antenna()*, η οποία δέχεται ως είσοδο την ακτίνα του δίσκου, το μήκος των συρμάτων του κώνου, τη γωνία ανοίγματος  $\theta_0$ , την ακτίνα των συρμάτων και το μήκος του σύρματος τροφοδοσίας, υπολογίζει τις συντεταγμένες των δύο άκρων κάθε σύρματος και κατασκευάζει τις γραμμές GW του αρχείου NEC. Για τα σύρματα του δίσκου και του κώνου χρησιμοποιήθηκαν 7 segments, ενώ για το σύρμα τροφοδοσίας χρησιμοποιήθηκε ένα μόνο segment τροφοδοσίας. Για την τροφοδοσία επιλέχθηκε πηγή τάσης με μέτρο  $1 + j0$ .



Εικόνα 1.9: Μοντελοποίηση της τελείως επίπεδης δισκοκωνικής κεραίας στο NEC.

Πρόγραμμα MATLAB 2: Υλοποίηση της γεωμετρίας της τελείως επίπεδης παραλλαγής της δισκοκωνικής κεραίας

```
function generate_flat_discone_antenna(r,l,theta,d,wire_r)
% Number of segments
nSegments = 7;

% Calculate the coordinates of the ground (flat disk)
disk = zeros(2,6);
disk(1,4) = r;      % the x coordinate of the end of the 1st wire
disk(2,4) = -r;     % the x coordinate of the end of the 2nd wire

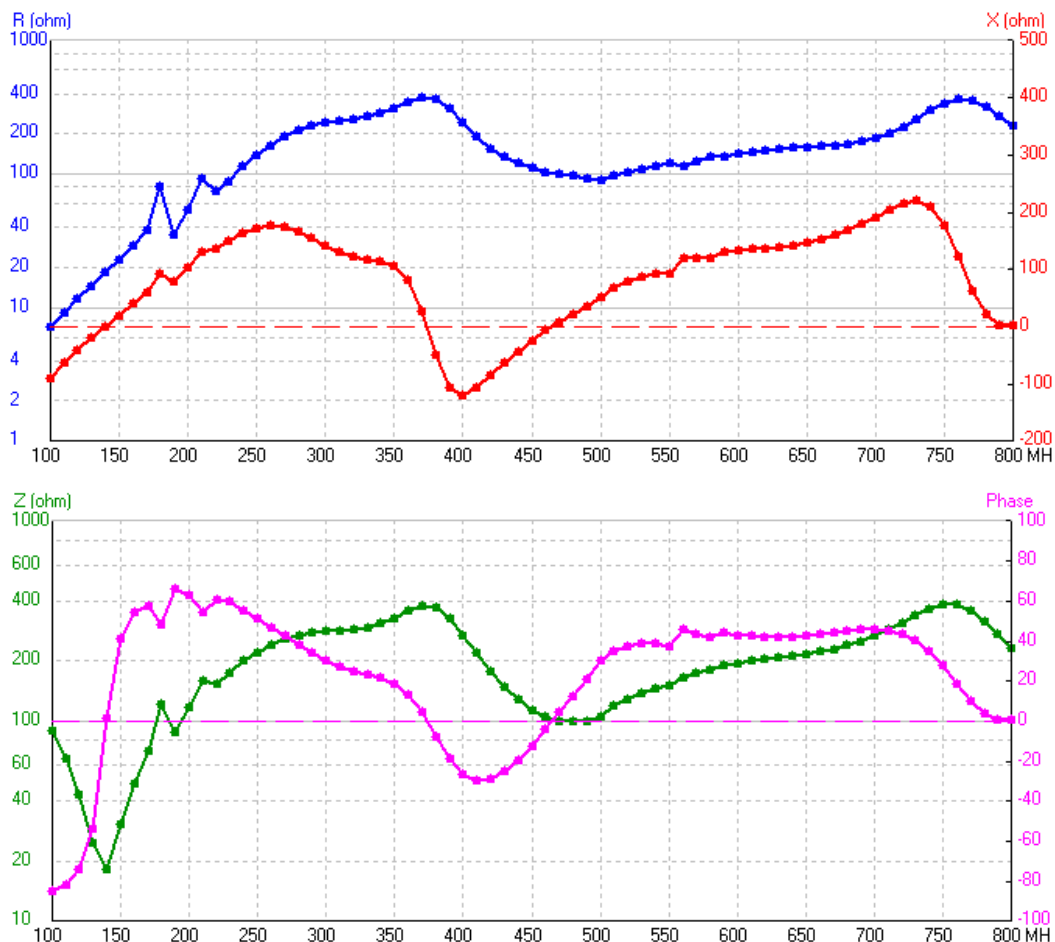
% Calculate the coordinates of the flat cone (circular sector)
cone_start = zeros(8,3);
cone_end = zeros(8,3);
cone_start(:,3) = -d;
phi = theta;
for i = 1:4
    cone_end(i,1) = -l*sin(phi);
    cone_end(9-i,1) = -cone_end(i,1);
    cone_end([i, 9-i],3) = -d-l*cos(phi);
    phi = phi - 2*theta/7;
end
```

```

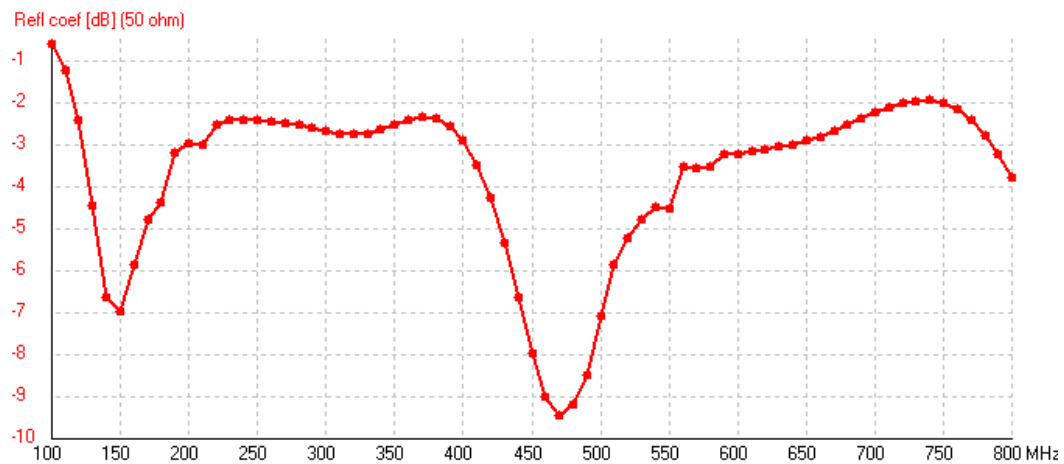
% Discone antenna data (disk, cone, source wire)
data = [(1:2)', nSegments*ones(2,1), disk, wire_r*ones(2,1);
        (3:10)', nSegments*ones(8,1), cone_start, ...
        cone_end, wire_r*ones(8,1);
        11, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -d, wire_r];
% Generate nec file
fileID = fopen('flat_discone.nec','w');
fprintf(fileID,'%s\n',"CE");
format_spec = 'GW %d %d %.4f %.4f %.4f %.4f %.4f %.4f\n';
fprintf(fileID,format_spec,data');
fprintf(fileID,'%s\n',"GE 0");
fprintf(fileID,'%s\n',"EN");
fclose(fileID);
end

```

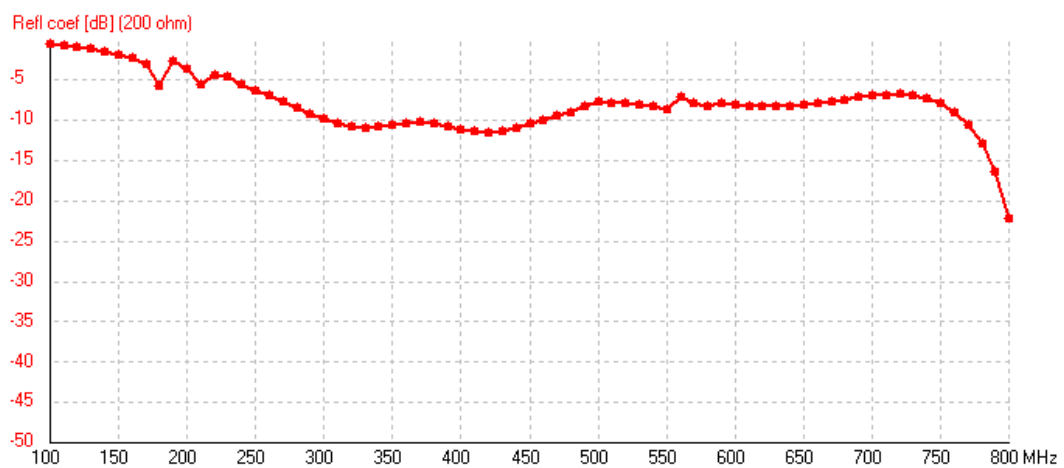
Πραγματοποιήθηκε ανάλυση *Frequency Sweep* σε ένα εύρος συχνοτήτων από  $f_1 = 100\text{MHz}$  έως  $f_2 = 800\text{MHz}$ . Το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης για γραμμή τροφοδοσίας χαρακτηριστικής αντίστασης  $Z_0 = 50\Omega$  λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από τα  $-10\text{ dB}$  σε όλη την περιοχή συχνοτήτων που μελετήθηκε. Για τη βελτίωση του συντελεστή ανάκλασης επιλέχθηκε τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης της γραμμής τροφοδοσίας  $Z_0 = 200\Omega$ , δηλαδή περίπου ίση με τη μέση τιμή του μέτρου της αντίστασης εισόδου  $Z_{in}$ . Έτσι, το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης μειώθηκε κάτω από τα  $-10\text{ dB}$  σε ένα τμήμα της περιοχής συχνοτήτων.



Εικόνα 1.10: Μεταβολή του πραγματικού και του φανταστικού μέρους (επάνω εικόνα) ή του μέτρου και της φάσης (κάτω εικόνα) της αντίστασης εισόδου της κεραίας στο εύρος συχνοτήτων 100-800MHz.



Εικόνα 1.11: Μεταβολή του μέτρου του συντελεστή ανάκλασης της κεραίας στο εύρος συχνοτήτων 100-800MHz για χαρακτηριστική αντίσταση 50Ω.



Εικόνα 1.12: Μεταβολή του μέτρου του συντελεστή ανάκλασης της κεραίας στο εύρος συχνοτήτων 100-800MHz για χαρακτηριστική αντίσταση 200Ω.

## 2 Μελέτη της ελικοειδούς κεραίας

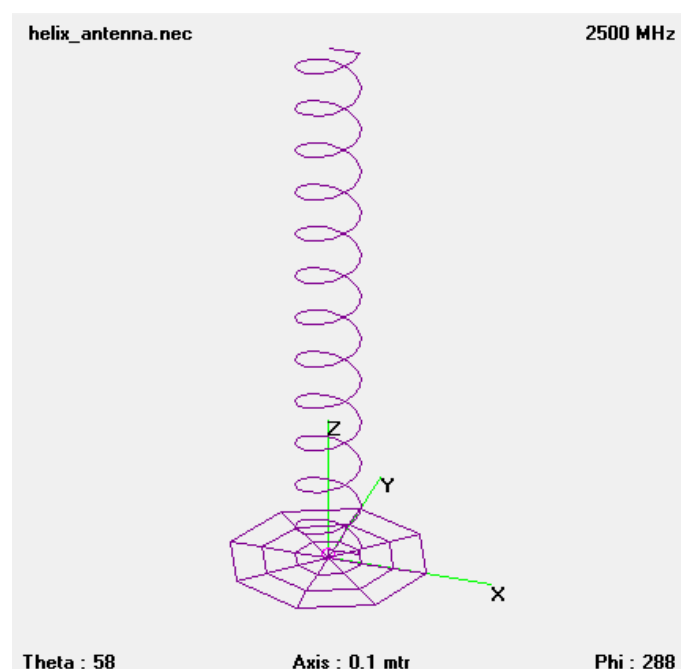
### 2.1 Γεωμετρία της κεραίας

Η ελικοειδής κεραία είναι μία ευρυζωνική κεραία που αποτελείται από έναν συρμάτινο αγωγό σε ελικοειδή μορφή και έναν δίσκο (ground). Η υπό μελέτη κεραία λειτουργεί στον αξονικό ρυθμό και σε κεντρική συχνότητα  $f_0 = 2.5GHz$ , οπότε το μήκος κύματος προκύπτει  $\lambda = 0.12m$ . Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της έλικας και του δίσκου παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

Γεωμετρία της έλικας		Γεωμετρία του δίσκου	
Περιφέρεια	$C = \lambda = 0.12m$	Ακτίνα	$r = \frac{\lambda}{2} = 0.06m$
Βήμα της έλικας	$S \cong \frac{\lambda}{4} = 0.03m$	Ακτινικά wires	8
Πλήθος σπειρών	$N = 12$	Κυκλικά wires	3
Διάμετρος	$C = \pi D \Leftrightarrow D = \frac{C}{\pi} = 3.82cm$	Γενικά χαρακτηριστικά της κεραίας	
Αξονικό μήκος	$L = NS = 0.36m$	Διάμετρος σύρματος	$d = \frac{\lambda}{50} = 2.4mm$
Μήκος σπείρας	$l = \sqrt{C^2 + S^2} = 0.124m$	Wire τροφοδοσίας	$l = \frac{\lambda}{20} = 6mm$

Πίνακας 2.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ελικοειδούς κεραίας.

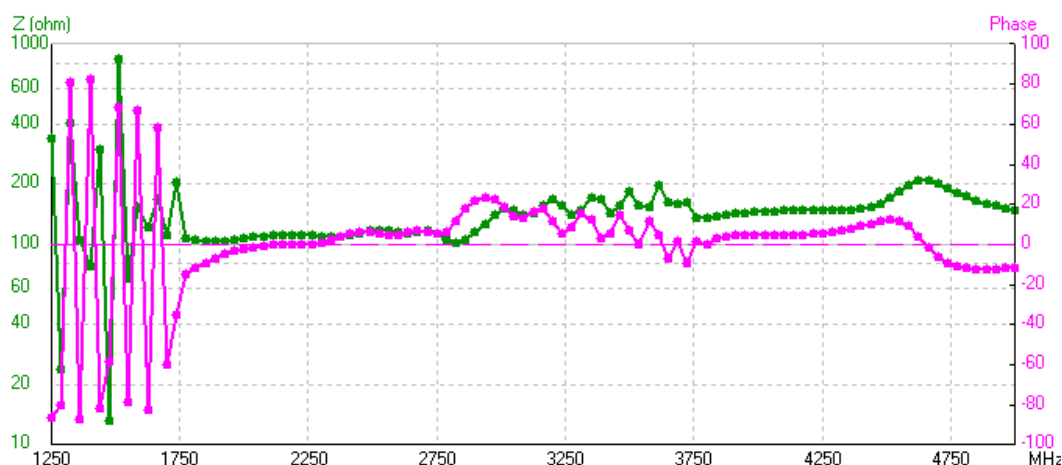
Η μοντελοποίηση της ελικοειδούς κεραίας έγινε με το πρόγραμμα Builder του NEC. Στην έλικα χρησιμοποιήθηκαν 16 segments ανά σπείρα και στον δίσκο χρησιμοποιήθηκαν 7 segments ανά τμήμα για τα δύο εξωτερικά κυκλικά wires και 3 segments ανά τμήμα για τα ακτινικά wires και το εσωτερικό κυκλικό wire. Ακόμη, τοποθετήθηκε ένα wire με ένα segment τροφοδοσίας και μικρό μήκος  $l = \frac{\lambda}{20}$  μεταξύ του ενός άκρου της έλικας και του κέντρου του κυκλικού δίσκου.



Εικόνα 2.1: Μοντελοποίηση της ελικοειδούς κεραίας στο NEC.

## 2.2 Αντίσταση εισόδου

Πραγματοποιήθηκε μελέτη *Frequency Sweep* σε ένα εύρος συχνοτήτων από  $f_1 = 0.5f_0 = 1250\text{MHz}$  έως  $f_2 = 2f_0 = 5000\text{MHz}$ . Η μεταβολή του μέτρου και της φάσης της αντίστασης εισόδου  $Z_{in}$  της κεραίας παρουσιάζεται στην *Εικόνα 2.2*. Η μέση τιμή του μέτρου της αντίστασης εισόδου είναι περίπου  $130\Omega$  στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής συχνοτήτων που μελετήθηκε. Άρα, για να εξασφαλιστεί τιμή του συντελεστή ανάκλασης μικρότερη από  $-10\text{dB}$  σε ένα ικανοποιητικό εύρος συχνοτήτων, η χαρακτηριστική αντίσταση επιλέγεται ίση με  $Z_0 = 130\Omega$ .



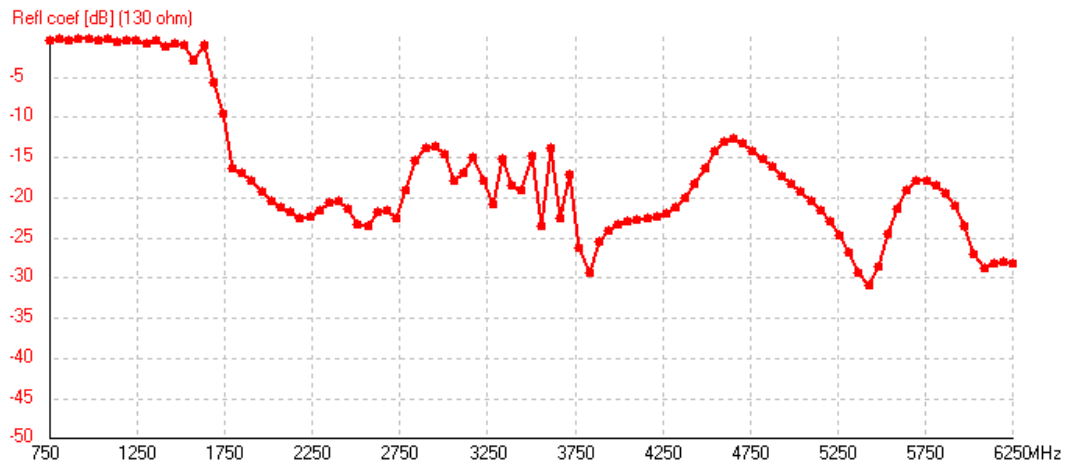
*Εικόνα 2.2: Μεταβολή του μέτρου και της φάσης της αντίστασης εισόδου της κεραίας στο εύρος συχνοτήτων 1250-5000MHz.*

## 2.3 Συντελεστής Ανάκλασης

Πραγματοποιήθηκε μελέτη *Frequency Sweep* στο εύρος συχνοτήτων από  $f_1 = 0.3f_0 = 750\text{MHz}$  έως  $f_2 = 2.5f_0 = 6250\text{MHz}$  και με χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής τροφοδοσίας  $Z_0 = 130\Omega$ . Η μεταβολή του μέτρου του συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει της συχνότητας παρουσιάζεται στην *Εικόνα 2.3*. Το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης παραμένει μικρότερο από το όριο των  $-10\text{dB}$  στην περιοχή συχνοτήτων  $1750 - 6250\text{MHz}$ , δηλαδή η κεραία παρουσιάζει καλό εύρος ζώνης:

$$\frac{f_{max}}{f_{min}} = \frac{6250}{1750} = 3.57$$

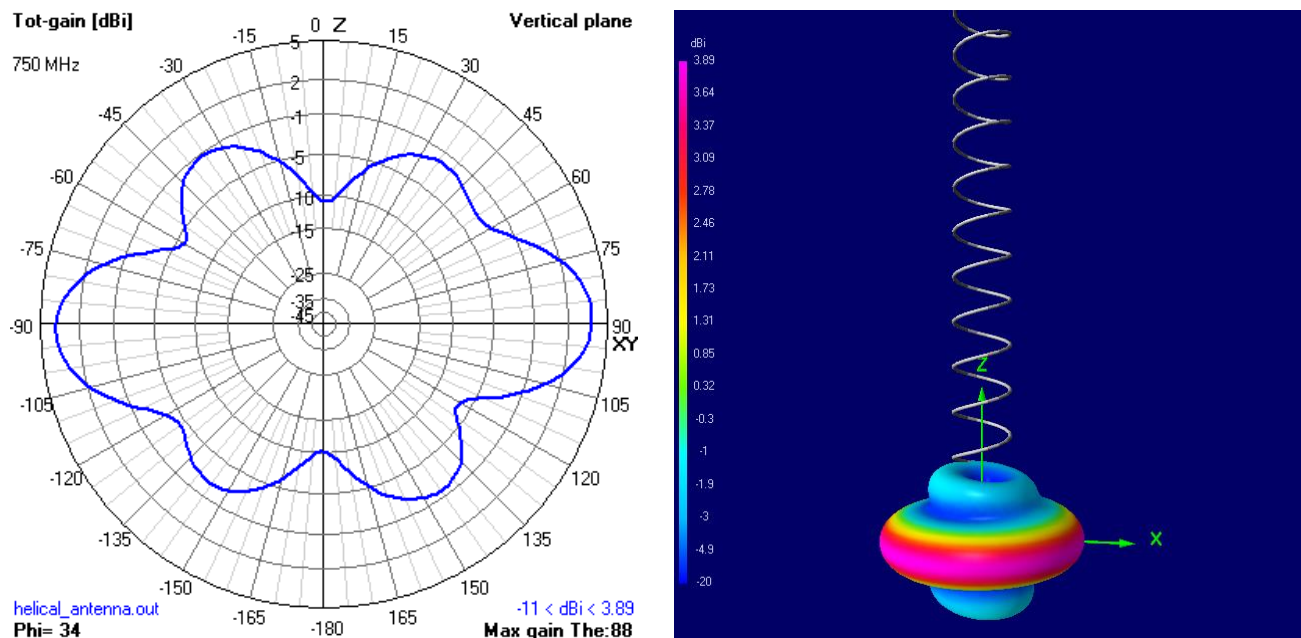
Άρα, η ελικοειδής κεραία που μελετήθηκε είναι ευρυζωνική.



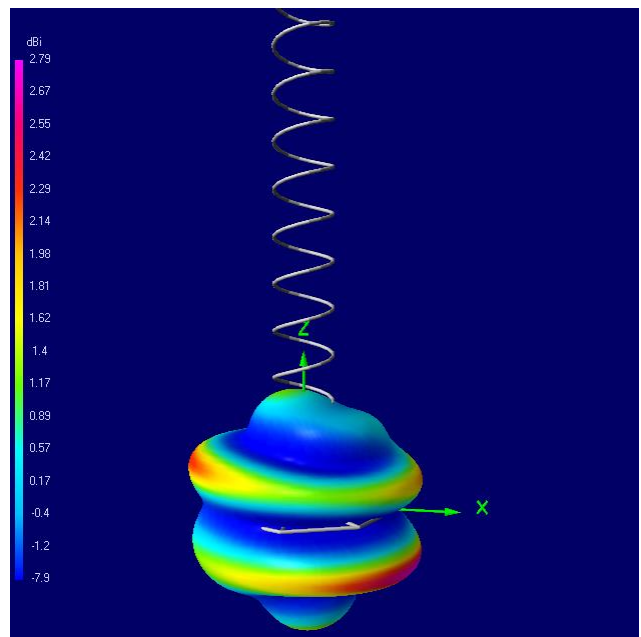
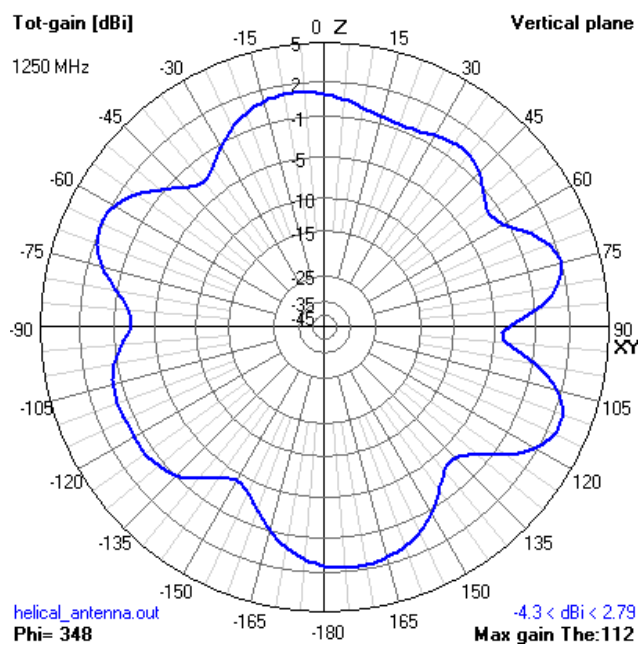
Εικόνα 2.3: Μεταβολή του μέτρου του συντελεστή ανάκλασης της κεραίας στο εύρος συχνοτήτων 750-6250MHz.

## 2.4 Διαγράμματα ακτινοβολίας

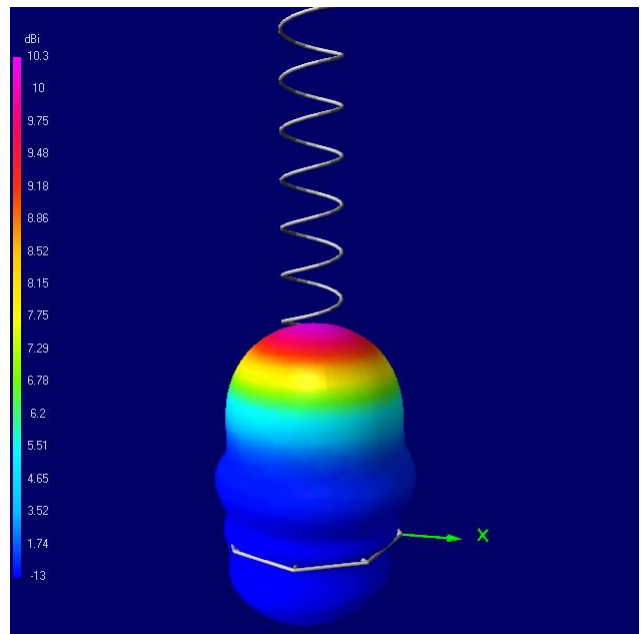
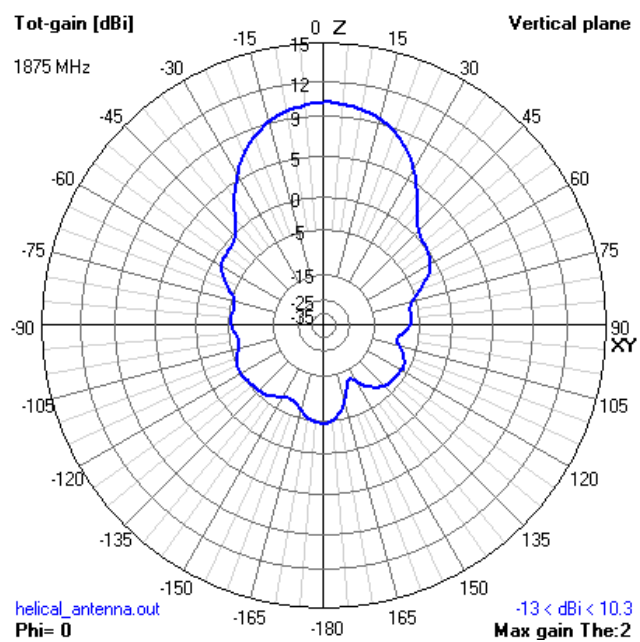
Μελετήθηκε το διάγραμμα ακτινοβολίας της ελικοειδούς κεραίας στις συχνότητες:  $0.3f_0 = 750\text{MHz}$ ,  $0.5f_0 = 1250\text{MHz}$ ,  $0.75f_0 = 1875\text{MHz}$ ,  $f_0 = 2500\text{MHz}$ ,  $1.33f_0 = 3325\text{MHz}$ ,  $2f_0 = 5000\text{MHz}$  και  $3f_0 = 7500\text{MHz}$ .



Εικόνα 2.4: Κατακόρυφο και 3D διάγραμμα ακτινοβολίας σε συχνότητα  $0.3f_0 = 750\text{MHz}$ .

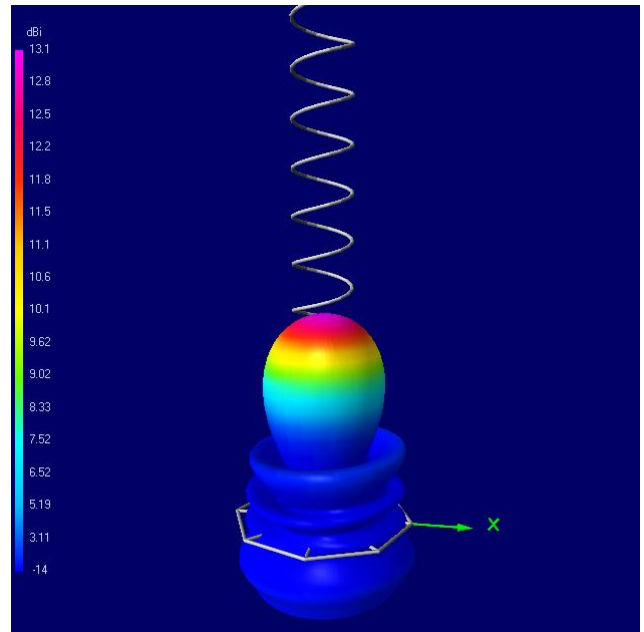
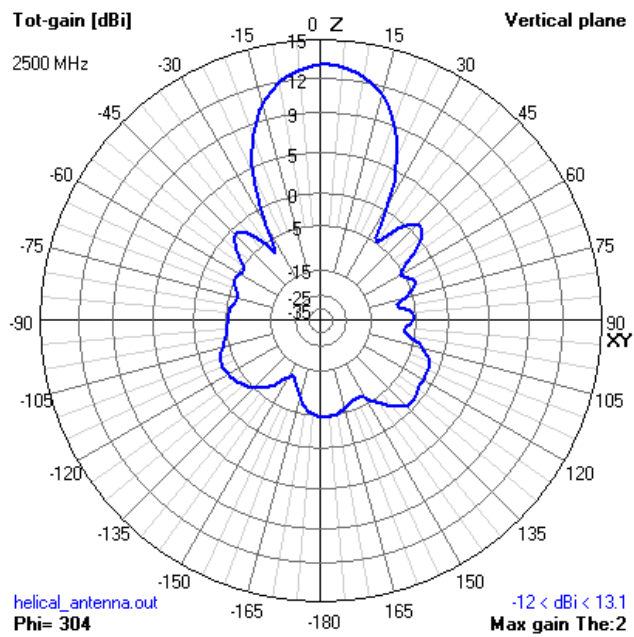


Εικόνα 2.5: Κατακόρυφο και 3D διάγραμμα ακτινοβολίας σε συχνότητα  $0.5f_0 = 1250\text{MHz}$ .

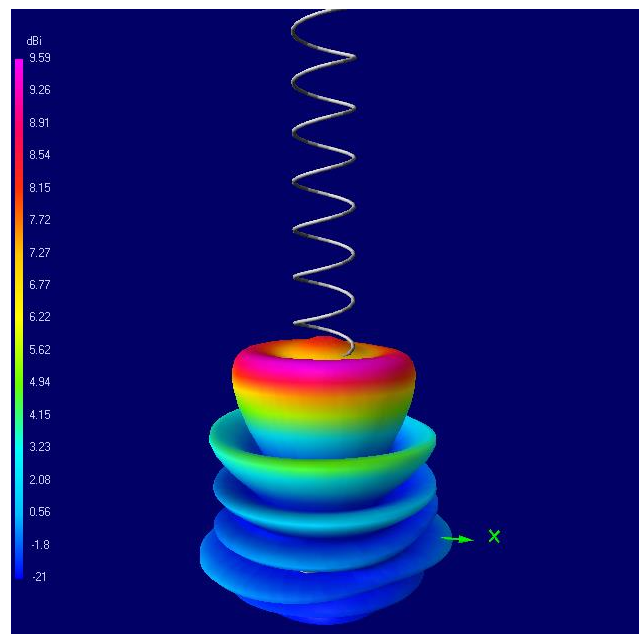
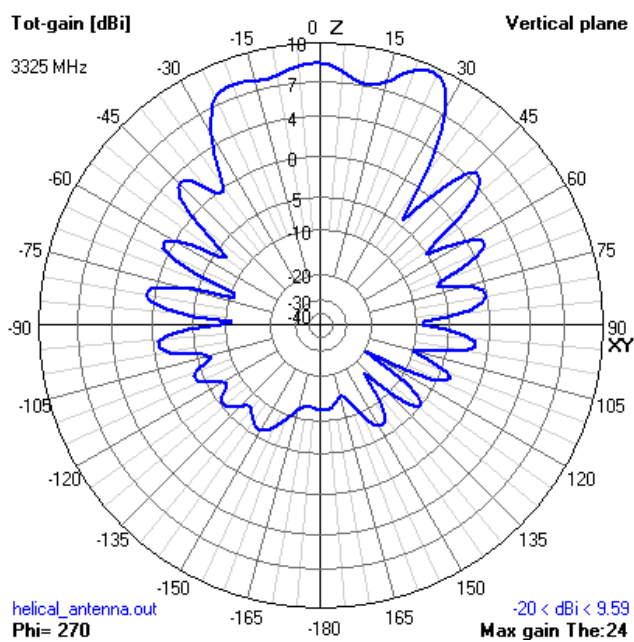


Εικόνα 2.6: Κατακόρυφο και 3D διάγραμμα ακτινοβολίας σε συχνότητα  $0.75f_0 = 1875\text{MHz}$ .

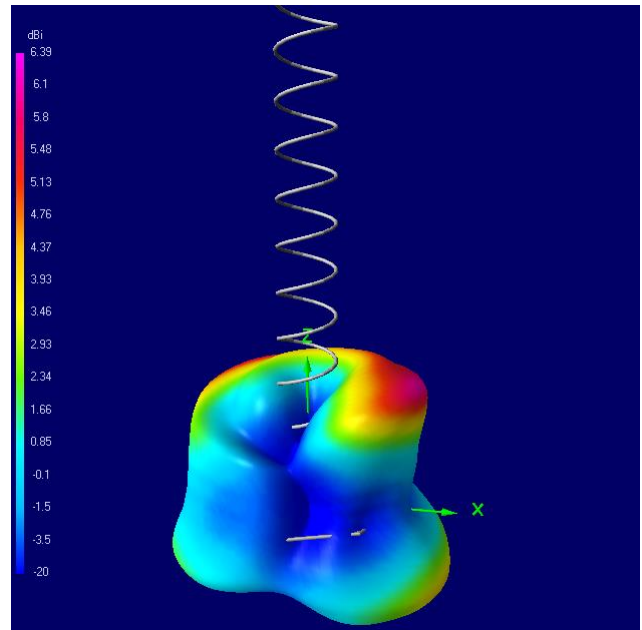
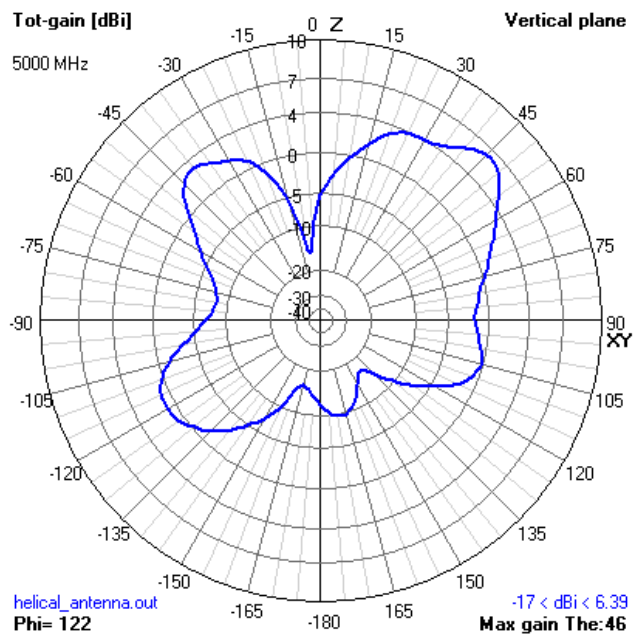




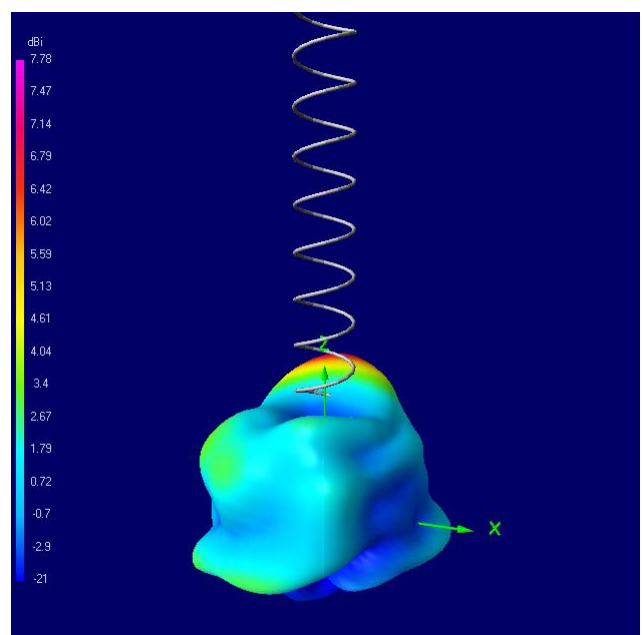
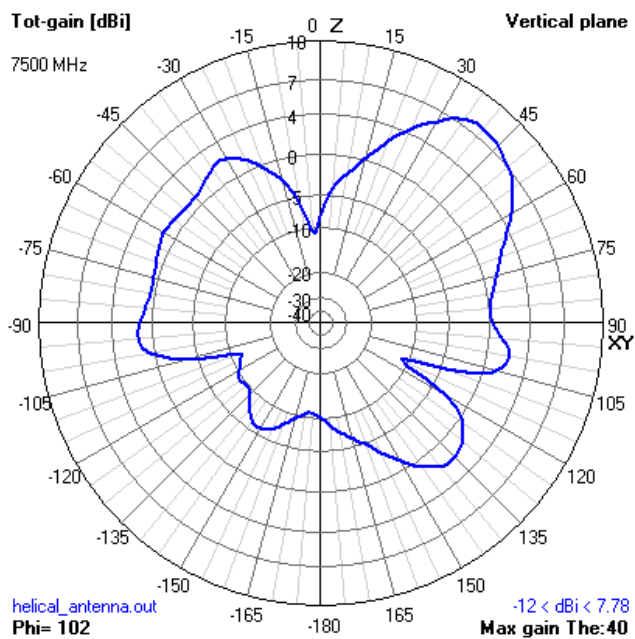
Εικόνα 2.7: Κατακόρυφο και 3D διάγραμμα ακτινοβολίας σε συχνότητα  $f_0 = 2500\text{MHz}$ .



Εικόνα 2.8: Κατακόρυφο και 3D διάγραμμα ακτινοβολίας σε συχνότητα  $1.33f_0 = 3325\text{MHz}$ .



Εικόνα 2.9: Κατακόρυφο και 3D διάγραμμα ακτινοβολίας σε συχνότητα  $2f_0 = 5000\text{MHz}$ .



Εικόνα 2.10: Κατακόρυφο και 3D διάγραμμα ακτινοβολίας σε συχνότητα  $3f_0 = 7500\text{MHz}$ .

Το διάγραμμα ακτινοβολίας της ελικοειδούς κεραίας παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές με την αύξηση της συχνότητας. Παρατηρούμε, πως στη συχνότητα  $f = f_0 = 2500MHz$ , δηλαδή στη συχνότητα στην οποία πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός της ελικοειδούς κεραίας, η κεραία λειτουργεί πράγματι στον αξονικό ρυθμό. Ακροπυροδοτική λειτουργία παρατηρείται επίσης στο εύρος συχνοτήτων από περίπου  $f = 0.75f_0 = 1875MHz$  έως  $f = 1.33f_0 = 3325MHz$ . Στη συχνότητα  $0.3f_0 = 750MHz$  το μέγιστο της ακτινοβολίας παρατηρείται σε διεύθυνση κάθετη στον άξονα της κεραίας, ενώ σε υψηλότερες συχνότητες το διάγραμμα ακτινοβολίας είναι ακανόνιστου σχήματος. Γενικά, σε συχνότητες εκτός του εύρους  $[1875, 3325] MHz$  τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας (όπως, η κατευθυντικότητα, το κέρδος, το ύψος των πλευρικών λοβών σε σχέση με τον κύριο λοβό) δεν είναι ικανοποιητικά.