



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

# Κεραίες και Διάδοση Αναφορά

## Εργασία 2

Διακολουκάς Δημήτριος  
ΑΕΜ 10642

*Email: [ddiakolou@ece.auth.gr](mailto:ddiakolou@ece.auth.gr)*

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή στην Εργασία</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Ανάλυση Δισκοκωνικής Κεραίας</b>	<b>3</b>
2.1	Παρουσίαση Προβλήματος και Δεδομένα Κεραίας . . . . .	3
2.1.1	Γεωμετρικές Διαστάσεις Κεραίας . . . . .	4
2.1.2	Ερώτημα (α): Ανάλυση Σύνθετης Αντίστασης Εισόδου $Z_{in}$ και Συντελεστή Ανάκλασης . . . . .	4
2.1.3	Αποτελέσματα Ερωτήματος (α) και Σχολιασμός . . . . .	6
2.1.4	Ερώτημα (β): Διαγράμματα Ακτινοβολίας και Μελέτη Κατανομής Ισχύος . . . . .	10
2.1.5	Αποτελέσματα Ερωτήματος (β) και Σχολιασμός . . . . .	12
2.1.6	Συμπεράσματα Ερωτήματος (β) . . . . .	14
2.1.7	Παράθεση και Ανάλυση 3D Διαγραμμάτων Ακτινοβολίας . . . . .	15

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή στην Εργασία

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του μαθήματος Κεραίες και Διάδοση και έχει ως κύριο αντικείμενο τη μελέτη και την υπολογιστική ανάλυση βασικών τύπων γραμμικών κεραιών. Σκοπός της εργασίας είναι η κατανόηση της λειτουργίας των κεραιών, η εξαγωγή των βασικών ηλεκτρικών και ακτινοβολιακών χαρακτηριστικών τους, καθώς και η αξιολόγηση της συμπεριφοράς τους σε διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας.

Στο πλαίσιο της εργασίας εξετάζονται διαφορετικές κατηγορίες κεραιών με ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε εφαρμογές τηλεπικοινωνιών. Αρχικά μελετάται η δισκοκωνική κεραία, η οποία χαρακτηρίζεται από ευρεία ζώνη λειτουργίας και χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές ευρυζωνικής λήψης και εκπομπής. Στη συνέχεια αναλύεται η ελικοειδής κεραία σε αξονικό ρυθμό λειτουργίας, με έμφαση στον προσδιορισμό των γεωμετρικών της διαστάσεων και στη μελέτη της κατευθυντικότητας και της ευρυζωνικότητάς της. Τέλος, εξετάζονται απλές γραμμικές κεραίες, όπως το αναδιπλωμένο δίπολο και η κεραία οδεύοντος κύματος, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση της γεωμετρίας, του εδάφους και της τροφοδοσίας στα χαρακτηριστικά τους.

Για κάθε κεραία πραγματοποιείται υπολογιστική ανάλυση της σύνθετης αντίστασης εισόδου, του συντελεστή ανάκλασης και των διαγραμμάτων ακτινοβολίας σε επιλεγμένα εύρη συχνοτήτων. Μέσω των αποτελεσμάτων αυτών αξιολογείται η προσαρμογή της κεραίας στη γραμμή τροφοδοσίας, η κατευθυντικότητα και η μεταβολή της ακτινοβολίας με τη συχνότητα, ενώ παράλληλα σχολιάζονται τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί κάθε τύπου κεραίας.

Για την υλοποίηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό 4nec2, το οποίο βασίζεται στη μέθοδο των ροπών και στο υπολογιστικό πακέτο NEC. Το εργαλείο αυτό επιτρέπει τη λεπτομερή μοντελοποίηση των κεραιών με σύρματα, τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών και την απεικόνιση τόσο διδιάστατων όσο και τρισδιάστατων διαγραμμάτων ακτινοβολίας. Η χρήση του 4nec2 διευκολύνει την κατανόηση της φυσικής συμπεριφοράς των κεραιών και συνδέει τη θεωρητική γνώση με πρακτικά αποτελέσματα προσομοίωσης.

## Κεφάλαιο 2

### Ανάλυση Δισκοκωνικής Κεραίας

#### 2.1 Παρουσίαση Προβλήματος και Δεδομένα Κεραίας

Στο πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας εξετάζεται η ανάλυση μίας δισκοκωνικής κεραίας, η οποία αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα κεραίας ευρείας ζώνης συχνοτήτων. Η συγκεκριμένη κεραία χρησιμοποιείται εκτενώς σε εφαρμογές τηλεπικοινωνιών και μετρήσεων, λόγω της ικανότητάς της να λειτουργεί αποδοτικά σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων.

Η δισκοκωνική κεραία μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μονόπολος με μεταβαλλόμενη διάμετρο και παρουσία γείωσης, γεγονός που συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση της ευρυζωνικότητάς της. Στην παρούσα εργασία, τόσο ο δίσκος όσο και ο κώνος της κεραίας υλοποιούνται με σύρματα, προκειμένου να είναι εφικτή η μοντελοποίησή τους μέσω του υπολογιστικού εργαλείου NEC.

Σκοπός του συγκεκριμένου προβλήματος είναι η ακριβής μοντελοποίηση της δισκοκωνικής κεραίας στο περιβάλλον του λογισμικού 4nec2, η μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς της σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων και η εξαγωγή βασικών μεγεθών, όπως η σύνθετη αντίσταση εισόδου, ο συντελεστής ανάκλασης και τα διαγράμματα ακτινοβολίας.

Οι γεωμετρικές διαστάσεις της κεραίας ορίζονται συναρτήσει του μήκους κύματος λειτουργίας. Η ακτίνα του δίσκου λαμβάνεται ίση με  $0.34\lambda$ , το μήκος των συρμάτων του κώνου ίσο με  $0.5\lambda$ , ενώ η συνολική γωνία ανοίγματος του κώνου είναι  $2\theta_0 = 60^\circ$ . Η διάμετρος των συρμάτων θεωρείται ίση με  $\lambda/200$ , ώστε να ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις της μεθόδου των ροπών. Επιπλέον θεωρούμε ότι τα σύρματα του κώνου ενώνονται σε ένα κοινό σημείο που βρίσκεται σε μικρή απόσταση που ορίσαμε στα  $\lambda/20$  κάτω από το σημείο όπου ενώνονται τα σύρματα του δίσκου. Μεταξύ των δύο σημείων αυτών θα τοποθετηθεί ένα σύρμα με ένα μόνο σεγμεντ τροφοδοσίας.

Η επιλογή του μήκους κύματος πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το επώνυμο του κάθε φοιτητή. Για το επώνυμο μου, Διακολουκάς, το οποίο ανήκει στο εύρος Δ-Λ, επιλέχθηκε μήκος κύματος  $\lambda = 0.6 \text{ m}$ . Με βάση την τιμή αυτή υπολογίζεται η κεντρική συχνότητα λειτουργίας της κεραίας από τη σχέση  $f_0 = c_0/\lambda$ .

Επιπρόσθετα, για τη διευκόλυνση της διαδικασίας μοντελοποίησης και για να εξασφαλιστεί η συνέπεια στις γεωμετρικές παραμέτρους, αξιοποιήθηκε η δυνατότητα παραγωγής του αρχείου εισόδου της προσομοίωσης μέσω αυτοματοποιημένου υπολογισμού. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε σύντομος κώδικας σε MATLAB, ο οποίος δέχεται ως μεταβλητές τις βασικές

διαστάσεις της κεραίας (όπως  $r$ ,  $l$ ,  $\theta_0$  και  $d$ ) και δημιουργεί τη γεωμετρία της υπό μελέτη διάταξης. Ο κώδικας παράγει τις αντίστοιχες εντολές GW που απαιτεί η σύνταξη του NEC και, στη συνέχεια, εξάγει το αρχείο εισόδου .nec, το οποίο χρησιμοποιήθηκε απευθείας στο 4nec2. Η δημιουργία των γραμμών GW πραγματοποιήθηκε προγραμματιστικά (π. χ. με χρήση fprintf), επιτρέποντας γρήγορη τροποποίηση των παραμέτρων και άμεση επαναληψιμότητα της προσομοίωσης.

Τέλος σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι αντίστοιχη λογική ακολουθήθηκε και για τις υπόλοιπες κεραίες της εργασίας σε όλα τα παρακάτω κεφάλαια (θέματα της εργασίας), δηλαδή αναπτύχθηκαν σύντομοι κώδικες σε MATLAB, οι οποίοι παράγουν τα αρχεία εισόδου .nec για κάθε γεωμετρία κεραίας με βάση τα ζητούμενα ξεχωριστά.

### 2.1.1 Γεωμετρικές Διαστάσεις Κεραίας

Οι γεωμετρικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του μοντέλου της δισκοκωνικής κεραίας στο 4nec2 συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1. Οι τιμές προκύπτουν από τον κώδικα παραγωγής των αρχείων .nec και είναι συνεπείς με τον ορισμό της κεραίας της εκφώνησης (λόγος διαστάσεων ως προς  $\lambda$  και  $2\theta_0 = 60^\circ$ ).

Παράμετρος	Σύμβολο	Σχέση (ως προς $\lambda$ )	Τιμή για $\lambda = 0.6 m$
Μήκος κύματος (περίπτωση $\Delta$ - $\Lambda$ )	$\lambda$	–	$0.6 m$
Ακτίνα δίσκου	$R_d$	$0.34\lambda$	$0.204 m$
Μήκος συρμάτων κώνου	$L_c$	$0.5\lambda$	$0.300 m$
Συνολική γωνία ανοίγματος κώνου	$2\theta_0$	$60^\circ$	$60^\circ$
Ημιγωνία κώνου	$\theta_0$	$30^\circ$	$30^\circ$
Διάμετρος συρμάτων	$d$	$\lambda/200$	$0.003 m$
Ακτίνα σύρματος (για NEC)	$a$	$d/2$	$0.0015 m$
Απόσταση σημείων τροφοδοσίας	$Gap$	$\lambda/20$	$0.030 m$
Ύψος κώνου (κατακόρυφη προβολή)	$h$	$L_c \cos \theta_0$	$0.260 m$
Οριζόντια προβολή κώνου	$R_{cove}$	$L_c \sin \theta_0$	$0.150 m$

Πίνακας 2.1: Γεωμετρικές παράμετροι δισκοκωνικής κεραίας που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο.

### 2.1.2 Ερώτημα (α): Ανάλυση Σύνθετης Αντίστασης Εισόδου $Z_{in}$ και Συντελεστή Ανάκλασης

Για την απάντηση του ερωτήματος (α) απαιτείται σάρωση συχνοτήτων (frequency sweep) στο εύρος από  $0.5f_0$  έως  $4f_0$ , ώστε να μελετηθεί η μεταβολή της σύνθετης αντίστασης εισόδου  $Z_{in}$  και κατόπιν, του συντελεστή ανάκλασης  $|\Gamma|$  για επιλεγμένη χαρακτηριστική αντίσταση γραμμής τροφοδοσίας.

Η παραπάνω διαδικασία υλοποιήθηκε με αυτοματοποιημένη παραγωγή αρχείων .nec μέσω κώδικα MATLAB με όνομα `discone_nec_generator.m`. Ο κώδικας ακολουθεί τη λογική της εκφώνησης, καθώς: (α) ορίζει τις διαστάσεις της κεραίας ως συναρτήσεις του  $\lambda$ , (β) τοποθετεί το σημείο ένωσης του κώνου σε απόσταση  $Gap = \lambda/20$  κάτω από το σημείο

ένωσης του δίσκου, και (γ) εισάγει σύρμα τροφοδοσίας μεταξύ των δύο σημείων με one segment (δηλαδή 1-seg feed).

**Κριτήριο διακριτοποίησης (segmentation):** επιλέχθηκαν segments  $seg_c = 19$  για τα σύρματα του κώνου και  $seg_d = 14$  για τα ακτινικά σύρματα του δίσκου. Με  $L_c = 0.30\text{ m}$  προκύπτει μήκος τμήματος στον κώνο  $\Delta L \approx L_c/seg_c = 0.015789\text{ m} \approx 1.58\text{ cm}$ . Στη μέγιστη συχνότητα της σάρωσης,  $4f_0 = 2\text{ GHz}$ , το μήκος κύματος είναι  $\lambda_{\min} \approx 0.15\text{ m}$ , άρα  $\Delta L \approx \lambda_{\min}/9.5$ , τιμή μικρότερη από  $\lambda_{\min}/10$ . Με τον τρόπο αυτό ικανοποιείται το πρακτικό κριτήριο ακρίβειας της MoM (μέθοδος των ροπών) (και αποφεύγονται προβλήματα αριθμητικής αστάθειας που μπορεί να εμφανιστούν με υπερβολικά μικρά τμήματα σε σχέση με την ακτίνα του σύρματος).

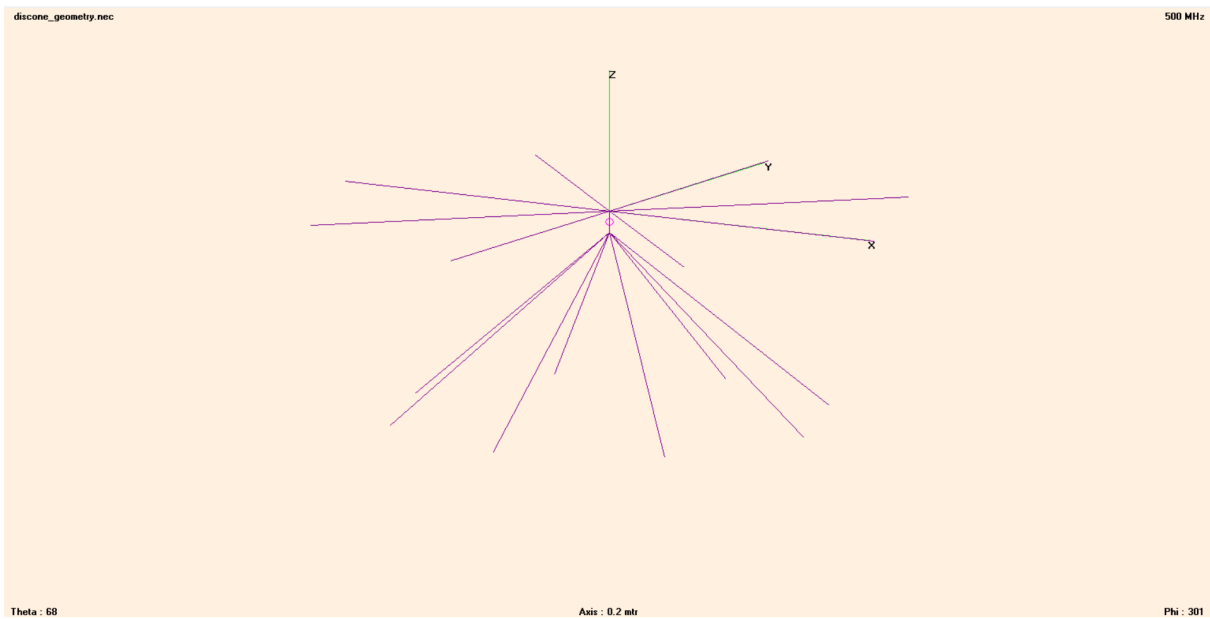
## Παραγόμενα αρχεία .nec και ρόλος τους

Ο κώδικας `discone_nec_generator.m` παράγει δύο αρχεία εισόδου:

- **discone\_geometry.nec:** αρχείο γεωμετρίας για μία **μοναδική** συχνότητα (ορίζεται στα  $500\text{ MHz}$ ), το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως για έλεγχο/απεικόνιση της γεωμετρίας στο 4nec2 (π.χ. μέσω geometry viewer και F3 screenshot). Εδώ η κάρτα FR τίθεται ως single frequency μόνο για να εμφανίζεται καθαρά η κεντρική συχνότητα στο περιβάλλον.
- **discone\_sweep.nec:** αρχείο για το **ερώτημα (α)**, το οποίο περιλαμβάνει την ίδια γεωμετρία αλλά με frequency sweep από  $250\text{ MHz}$  έως  $2000\text{ MHz}$  με βήμα  $10\text{ MHz}$ . Ο αριθμός σημείων σάρωσης είναι  $N = \frac{2000-250}{10} + 1 = 176$ , ώστε να εξαχθούν τα  $Z_{\text{in}}(f)$  και  $|\Gamma(f)|$  σε όλο το ζητούμενο φάσμα ( $0.5f_0$  έως  $4f_0$ ). Η διέγερση εφαρμόζεται στο σύρμα τροφοδοσίας, το οποίο έχει tag 17 και segment 1 (μοναδικό τμήμα), ώστε η τροφοδοσία να τοποθετείται ακριβώς στο feed gap. Επιπλέον αξίζει να σχολιάσουμε και τον ορισμό αγωγίμου σύρματος (wire geometry). Στη συγκεκριμένη υλοποίηση δημιουργούνται:
  - (i) 8 ακτινικά σύρματα δίσκου από το σημείο  $(0, 0, 0)$  προς ακτίνα  $R_d$ ,
  - (ii) 8 σύρματα κώνου που ξεκινούν από το κοινό σημείο  $(0, 0, -\text{Gap})$  και καταλήγουν στο επίπεδο της βάσης του κώνου,
  - (iii) ένα σύρμα τροφοδοσίας κατά τον άξονα  $z$ , από  $(0, 0, 0)$  έως  $(0, 0, -\text{Gap})$ , με 1 segment.

Με βάση το `discone_sweep.nec` πραγματοποιείται η εξαγωγή της  $Z_{\text{in}}(f)$  στο εύρος  $0.5f_0$  έως  $4f_0$ , και στη συνέχεια υπολογίζεται και απεικονίζεται ο συντελεστής ανάκλασης  $|\Gamma(f)|$  για επιλεγμένη  $Z_0$ , ώστε να αξιολογηθεί η προσαρμογή της κεραίας και η ευρυζωνική της συμπεριφορά και όλα τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην επόμενη υποενότητα.

Παρακάτω παρουσιάζεται και η γεωμετρία της δισκοκωνικής κεραίας στο λογισμικό 4nec2.

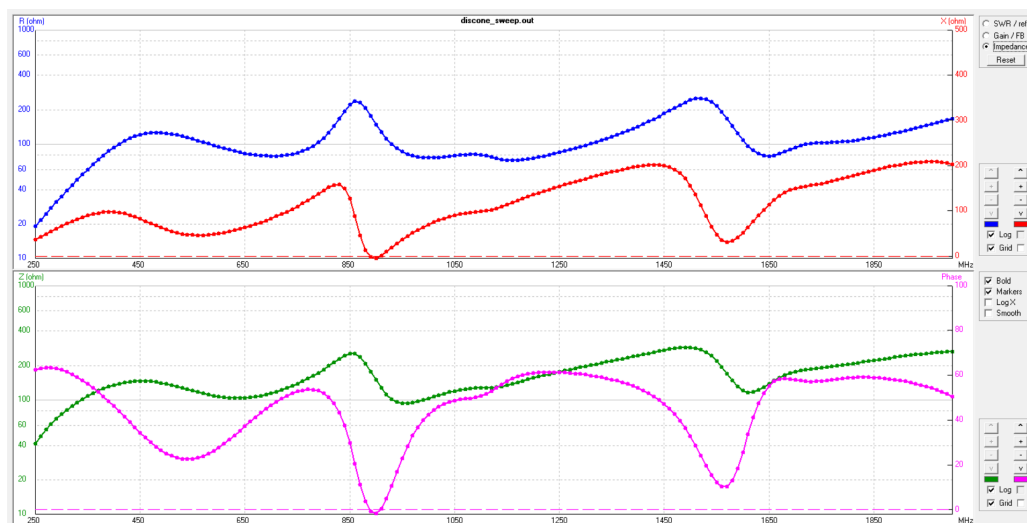


Σχήμα 2.1: Γεωμετρία δισκοκωνικής κεραίας.

### 2.1.3 Αποτελέσματα Ερωτήματος (α) και Σχολιασμός

#### Διαγράμματα Οπτικοποίησης Σύνθετης Αντίστασης Εισόδου $Z_{in}$

Για την σύνθετη αντίσταση εισόδου της δισκοκωνικής κεραίας γνωρίζουμε από την θεωρία ότι ορίζεται ως  $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$  και υπολογίστηκε μέσω του λογισμικού 4nec2 για το εύρος συχνοτήτων από 0.25 έως 2 GHz, σύμφωνα με τη σάρωση που περιγράφεται στο ερώτημα (α). Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η μεταβολή τόσο του πραγματικού μέρους  $R_{in}$  όσο και του φανταστικού μέρους  $X_{in}$  της αντίστασης εισόδου ως συνάρτηση της συχνότητας.



Σχήμα 2.2: Μεταβολή του πραγματικού μέρους  $R_{in}$  και του φανταστικού μέρους  $X_{in}$  της σύνθετης αντίστασης εισόδου της δισκοκωνικής κεραίας στο εύρος 0.25–2 GHz.

Από το διάγραμμα του πραγματικού μέρους παρατηρείται ότι η  $R_{in}$  μεταβάλλεται ομαλά στο μεγαλύτερο τμήμα του εξεταζόμενου φάσματος, με τιμές που κυμαίνονται κυρίως μεταξύ περίπου 60  $\Omega$  και 250  $\Omega$ . Εμφανίζονται ωστόσο τοπικά μέγιστα και ελάχιστα, τα οποία σχετίζονται με επιμέρους συντονισμούς της κεραίας, φαινόμενο αναμενόμενο για δομή ευρείας ζώνης που λειτουργεί ως μονόπολος μεταβαλλόμενης διαμέτρου.

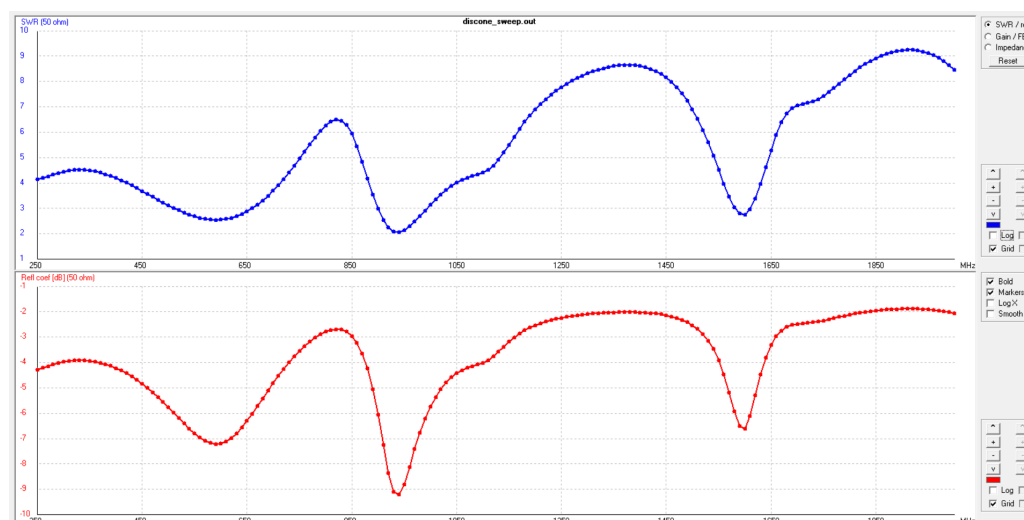
Το φανταστικό μέρος  $X_{in}$  παρουσιάζει εναλλαγή μεταξύ θετικών και αρνητικών τιμών, υποδεικνύοντας μεταβάσεις μεταξύ επαγωγικής και χωρητικής συμπεριφοράς. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι συχνότητες στις οποίες το  $X_{in}$  προσεγγίζει το μηδέν, καθώς σε αυτές η κεραία βρίσκεται κοντά σε συνθήκες συντονισμού. Στο εξεταζόμενο εύρος παρατηρούνται περισσότεροι του ενός τέτοιοι συντονισμοί, γεγονός που επιβεβαιώνει τον ευρυζωνικό χαρακτήρα της δισκοκωνικής κεραίας.

Συνολικά, η μορφή των καμπυλών της  $Z_{in}$  καταδεικνύει ότι η κεραία δεν παρουσιάζει έναν μοναδικό, έντονο συντονισμό, αλλά μια σειρά από ηπιότερες μεταβολές της αντίστασης εισόδου σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Η συμπεριφορά αυτή είναι σύμφωνη με τη θεωρητική λειτουργία της δισκοκωνικής κεραίας και προετοιμάζει το έδαφος για την αξιολόγηση της προσαρμογής της μέσω του συντελεστή ανάκλασης, η οποία εξετάζεται στην επόμενη υποενότητα.

### Διαγράμματα Οπτικοποίησης Συντελεστή Ανάκλασης $|\Gamma|$

Ο συντελεστής ανάκλασης  $|\Gamma|$  αποτελεί βασικό μέγεθος για την αξιολόγηση της προσαρμογής μιας κεραίας στη γραμμή τροφοδοσίας και συνδέεται άμεσα με τη σύνθετη αντίσταση εισόδου  $Z_{in}$  και τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής  $Z_0$ . Στην παρούσα ανάλυση θεωρήθηκε γραμμή τροφοδοσίας με  $Z_0 = 50 \Omega$ , όπως ζητείται στην εκφώνηση.

Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου στάσιμων κυμάτων (Standing Wave Ratio, SWR) και του συντελεστή ανάκλασης σε λογαριθμική κλίμακα (return loss σε dB), στο εύρος συχνοτήτων από 0.25 έως 2 GHz.



Σχήμα 2.3: Μεταβολή του SWR και του συντελεστή ανάκλασης (return loss σε dB) της δισκοκωνικής κεραίας για γραμμή τροφοδοσίας  $Z_0 = 50 \Omega$ , στο εύρος 0.25–2 GHz.

Από το διάγραμμα του SWR παρατηρείται ότι η κεραία δεν παρουσιάζει ιδανική προσαρμογή σε ολόκληρο το εξεταζόμενο φάσμα, καθώς οι τιμές του SWR κυμαίνονται γενικά πάνω από



την τιμή 2. Ωστόσο, εμφανίζονται διακριτές περιοχές συχνοτήτων όπου το SWR παρουσιάζει τοπικά ελάχιστα, γεγονός που υποδηλώνει βελτιωμένη προσαρμογή της κεραίας στη γραμμή τροφοδοσίας.

Οι συχνότητες στις οποίες παρατηρούνται ελάχιστα του SWR αντιστοιχούν σε περιοχές όπου το φανταστικό μέρος της  $Z_{in}$  προσεγγίζει το μηδέν, όπως φάνηκε στο προηγούμενο υποτήμα. Η συσχέτιση αυτή επιβεβαιώνει ότι η συμπεριφορά του συντελεστή ανάκλασης καθορίζεται άμεσα από τη σύνθετη αντίσταση εισόδου της κεραίας.

Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, αν και η δισκοκωνική κεραία παρουσιάζει ευρυζωνική λειτουργία από πλευράς γεωμετρίας και ακτινοβολίας, η προσαρμογή σε γραμμή 50 Ω δεν είναι βέλτιστη σε όλο το εξεταζόμενο εύρος. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η επιλογή διαφορετικής χαρακτηριστικής αντίστασης γραμμής τροφοδοσίας θα μπορούσε να οδηγήσει σε βελτιωμένη συμπεριφορά του SWR, θέμα που μπορεί να διερευνηθεί περαιτέρω.

### Σχολιασμός και Προτάσεις Ιδανικότερης Προσαρμογής

Με βάση την ανάλυση της σύνθετης αντίστασης εισόδου  $Z_{in}$  και του συντελεστή ανάκλασης  $|\Gamma|$ , προκύπτει ότι η προσαρμογή της δισκοκωνικής κεραίας στη γραμμή τροφοδοσίας με  $Z_0 = 50 \Omega$  δεν είναι βέλτιστη σε ολόκληρο το εξεταζόμενο εύρος συχνοτήτων.

Συγκεκριμένα, από τη μεταβολή του πραγματικού μέρους της  $Z_{in}$  παρατηρείται ότι οι τιμές της αντίστασης εισόδου κινούνται για μεγάλο μέρος του φάσματος σε επίπεδα σημαντικά υψηλότερα από τα 50 Ω, συχνά στην περιοχή 80–200 Ω. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η χρήση γραμμής μεταφοράς με υψηλότερη χαρακτηριστική αντίσταση θα μπορούσε να οδηγήσει σε βελτιωμένη προσαρμογή.

Ενδεικτικά, η επιλογή γραμμής τροφοδοσίας με  $Z_0 = 75 \Omega$  ή  $Z_0 = 120 \Omega$  αναμένεται να μειώσει σημαντικά το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης σε μεγάλο μέρος του εύρους 0.5 $f_0$  έως 4 $f_0$ . Τότε, το return loss θα μπορούσε να διατηρείται σε επίπεδα χαμηλότερα από –10 dB για σημαντικό τμήμα της ζώνης, υποδεικνύοντας σαφώς βελτιωμένη προσαρμογή.

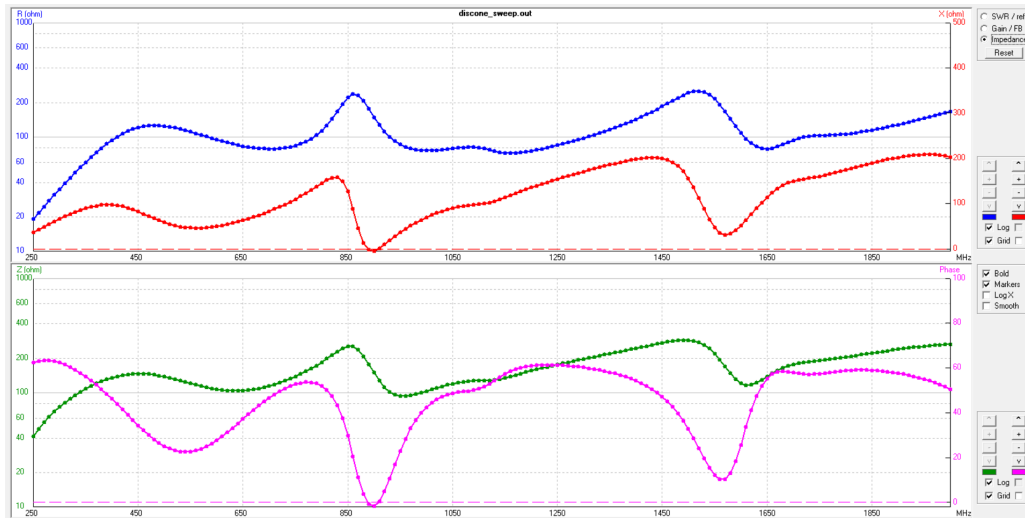
Η παραπάνω παρατήρηση αναδεικνύει ότι η δισκοκωνική κεραία διαθέτει πράγματι ευρυζωνικό χαρακτήρα από πλευράς γεωμετρίας και ηλεκτρικής συμπεριφοράς, ωστόσο η τελική απόδοση του συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σωστή επιλογή της χαρακτηριστικής αντίστασης της γραμμής τροφοδοσίας. Η διερεύνηση διαφορετικών τιμών  $Z_0$  αποτελεί επομένως αποτελεσματικό τρόπο βελτιστοποίησης της συνολικής λειτουργίας της κεραίας.

### Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Οπτικοποίησης Βελτιωμένης Προσαρμογής

Για την επαλήθευση των παραπάνω σχολίων σχετικά με την ιδανικότερη προσαρμογή της δισκοκωνικής κεραίας, πραγματοποιήθηκε επαναξιολόγηση της συμπεριφοράς της θεωρώντας γραμμή τροφοδοσίας με χαρακτηριστική αντίσταση  $Z_0 = 110 \Omega$ . Η τιμή αυτή επιλέχθηκε με βάση τη μέση στάθμη της πραγματικής συνιστώσας της  $Z_{in}$  στο εξεταζόμενο φάσμα συχνοτήτων.

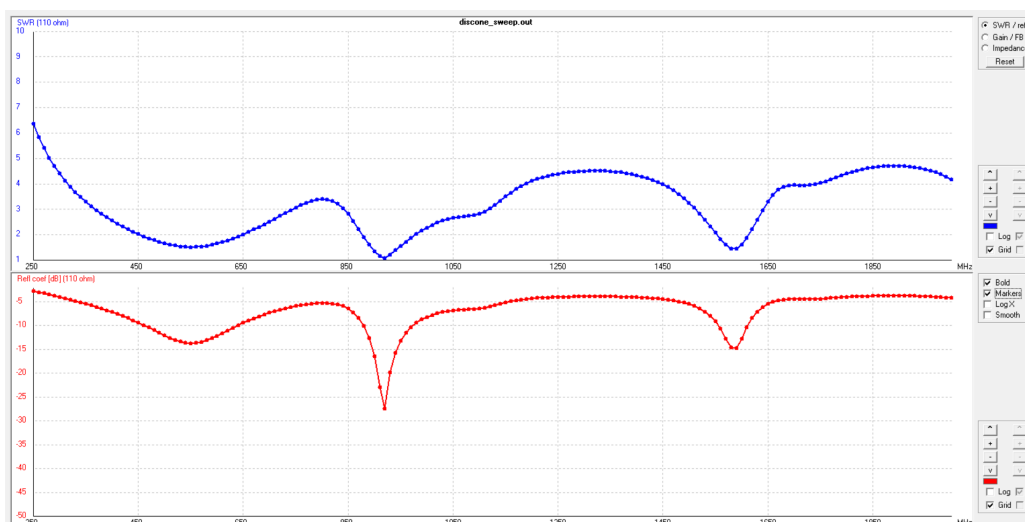
Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η μεταβολή της σύνθετης αντίστασης εισόδου στο εύρος 0.25–2 GHz. Παρατηρείται ότι το πραγματικό μέρος της  $Z_{in}$  κινείται για μεγάλο τμήμα του φάσματος γύρω από τιμές συγκρίσιμες με τα 110 Ω, γεγονός που υποδηλώνει καταλληλότερη

αντιστοίχιση με τη νέα γραμμή τροφοδοσίας. Παράλληλα, το φανταστικό μέρος μηδενίζεται σε περισσότερα σημεία, ενισχύοντας τη συνολική ποιότητα προσαρμογής.



Σχήμα 2.4: Σύνθετη αντίσταση εισόδου της δισκοκωνικής κεραίας για  $Z_0 = 110 \Omega$  στο εύρος 0.25–2 GHz.

Η επίδραση της αλλαγής της χαρακτηριστικής αντίστασης αποτυπώνεται σαφέστερα στη συμπεριφορά του συντελεστή ανάκλασης και του SWR, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Σε σύγκριση με την περίπτωση  $50 \Omega$ , οι τιμές του SWR εμφανίζονται σημαντικά μειωμένες σε μεγάλο μέρος του φάσματος, με εκτεταμένες περιοχές όπου το SWR προσεγγίζει ή υποχωρεί κάτω από την τιμή 2. Τα αντίστοιχα βάρη στο return loss υποδεικνύουν σαφώς μειωμένη ανακλώμενη ισχύ και αποτελεσματικότερη μεταφορά ενέργειας προς την κεραία.



Σχήμα 2.5: Μεταβολή του SWR και του συντελεστή ανάκλασης για γραμμή τροφοδοσίας  $Z_0 = 110 \Omega$ , στο εύρος 0.25–2 GHz.

## Συμπεράσματα Βελτιωμένης Προσαρμογής

Η διερεύνηση της συμπεριφοράς της δισκοκωνικής κεραίας με εναλλακτική χαρακτηριστική αντίσταση γραμμής τροφοδοσίας ανέδειξε τον καθοριστικό ρόλο της προσαρμογής στην συνολική απόδοση του συστήματος. Η επιλογή  $Z_0 = 110 \Omega$  αποδείχθηκε σαφώς καταλληλότερη από την τυπική τιμή των  $50 \Omega$ , χωρίς να απαιτηθεί οποιαδήποτε μεταβολή στη γεωμετρία της κεραίας.

Η διαφοροποίηση αυτή αποτυπώνεται αρχικά στη συμπεριφορά του λόγου στάσιμων κυμάτων. Ενώ στην περίπτωση των  $50 \Omega$  το SWR διατηρείται σε υψηλά επίπεδα για μεγάλο μέρος του φάσματος, με τιμές που υπερβαίνουν το 4, η χρήση γραμμής  $110 \Omega$  οδηγεί σε αισθητή μείωση. Σε ευρείες περιοχές συχνοτήτων το SWR περιορίζεται κάτω από το 2.5, ενώ σε συγκεκριμένα διαστήματα προσεγγίζει το αποδεκτό όριο του 2, γεγονός που καθιστά τη λειτουργία της κεραίας πρακτικά αξιοποιήσιμη σε ευρυζωνικές εφαρμογές.

Αντίστοιχη βελτίωση παρατηρείται και στον συντελεστή ανάκλασης. Η απόκριση σε όρους return loss παρουσιάζει εκτεταμένες ζώνες με τιμές χαμηλότερες από  $-10$  dB, γεγονός που υποδηλώνει περιορισμό της ανακλώμενης ισχύος. Ιδιαίτερα έντονη προσαρμογή εμφανίζεται κοντά στη συχνότητα των  $900$  MHz, όπου το return loss φθάνει περίπου τα  $-30$  dB, ενώ επιπλέον βελτιωμένες περιοχές καταγράφονται γύρω από τα  $1.6$  GHz και τα  $550$  MHz.

Η παραπάνω συμπεριφορά μπορεί να ερμηνευθεί από την κατανομή της σύνθετης αντίστασης εισόδου. Η πραγματική συνιστώσα της  $Z_{in}$  παραμένει για μεγάλο μέρος του εξεταζόμενου φάσματος κοντά στα  $110 \Omega$ , ενώ το φανταστικό μέρος μηδενίζεται συχνότερα σε σχέση με την αρχική περίπτωση. Ο συνδυασμός αυτός οδηγεί σε αποτελεσματικότερη μεταφορά ισχύος από τη γραμμή τροφοδοσίας προς την κεραία.

Συμπερασματικά, η συγκεκριμένη δισκοκωνική κεραία παρουσιάζει ευρυζωνική ηλεκτρική συμπεριφορά, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί πλήρως μόνο με την κατάλληλη επιλογή της γραμμής τροφοδοσίας. Η τιμή των  $110 \Omega$  συνιστά μια πρακτικά αποδοτική και τεχνικά ισορροπημένη λύση, επιτρέποντας ικανοποιητική προσαρμογή σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων και αναδεικνύοντας τον πραγματικό ευρυζωνικό χαρακτήρα της κεραίας.

### 2.1.4 Ερώτημα (β): Διαγράμματα Ακτινοβολίας και Μελέτη Κατανομής Ισχύος

Στο ερώτημα (β) αναλύεται η ακτινοβολούμενη συμπεριφορά της δισκοκωνικής κεραίας σε διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας, με στόχο να αποτυπωθούν οι μεταβολές του προτύπου ακτινοβολίας (radiation pattern) καθώς η συχνότητα αυξάνεται. Η ανάλυση πραγματοποιείται για την κεντρική συχνότητα  $f_0 = 500$  MHz, καθώς και για τις αρμονικές  $2f_0 = 1$  GHz,  $3f_0 = 1.5$  GHz και  $4f_0 = 2$  GHz.

Για τη συχνότητα  $f_0$  ζητείται η παρουσίαση τόσο του οριζόντιου (στο επίπεδο XY) όσο και του κατακόρυφου διαγράμματος, ενώ για τις υψηλότερες συχνότητες  $2f_0$ ,  $3f_0$  και  $4f_0$  ζητείται το κατακόρυφο διάγραμμα. Επιπλέον, για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται και τα τρισδιάστατα διαγράμματα (3D patterns), ώστε να υπάρχει πλήρης εποπτεία της χωρικής κατανομής.

## Προσέγγιση Υπολογισμού Διαγραμμάτων Far Field

Η εξαγωγή των διαγραμμάτων ακτινοβολίας πραγματοποιήθηκε στο 4nec2 με υπολογισμό Far Field για κάθε μία από τις παραπάνω συχνότητες. Η δισκοκωνική κεραία, λόγω κυλινδρικής συμμετρίας, αναμένεται να εμφανίζει σε χαμηλότερες συχνότητες πιο ομαλή κατανομή, ενώ με την αύξηση της συχνότητας είναι πιθανό να εμφανιστούν επιπρόσθετες δομές στο διάγραμμα (π.χ. στενότερος κύριος λοβός και/ή δευτερεύοντες λοβοί).

Η φυσική αιτία αυτών των μεταβολών συνδέεται με το γεγονός ότι, όσο η συχνότητα αυξάνεται, η ίδια γεωμετρία αντιστοιχεί σε ηλεκτρικά μεγαλύτερη διάταξη (σε όρους  $\lambda$ ). Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε εντονότερη κατευθυντικότητα και σε πιο σύνθετη γωνιακή κατανομή της ακτινοβολούμενης ισχύος. Παράλληλα, σε υψηλότερες συχνότητες είναι πιθανό ο μέγιστος της ακτινοβολίας να μετατοπίζεται ως προς το οριζόντιο επίπεδο, μεταβάλλοντας την κλίση της δέσμης (beam direction).

## Παραγωγή αρχείων .nec για υπολογισμό ακτινοβολίας

Για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας δημιουργίας αρχείων εισόδου, αναπτύχθηκε κώδικας MATLAB στο αρχείο `discone_ff.m` ο οποίος παράγει ξεχωριστό αρχείο .nec για κάθε συχνότητα ενδιαφέροντος. Ο κώδικας διατηρεί **σταθερή** τη γεωμετρία (ίδιες διαστάσεις και segmentation) και μεταβάλλει μόνο τη συχνότητα υπολογισμού, ώστε τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων ακτινοβολίας να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους.

Συγκεκριμένα, ο κώδικας:

- ορίζει τις γεωμετρικές παραμέτρους ως συνάρτηση του  $\lambda = 0.6 \text{ m}$  (περίπτωση  $\Delta$ - $\Lambda$ ),
- κατασκευάζει τη γεωμετρία με 8 ακτινικά σύρματα για τον δίσκο, 8 σύρματα για τον κώνο και ένα σύρμα τροφοδοσίας 1-seg,
- εφαρμόζει διέγερση στο σύρμα τροφοδοσίας μέσω της κάρτας EX,
- δημιουργεί single-frequency αρχείο με κάρτα FR για κάθε συχνότητα της λίστας [500, 1000, 1500, 2000] σε MHz.

Ως αποτέλεσμα, παράγονται τέσσερα αρχεία εισόδου της μορφής:

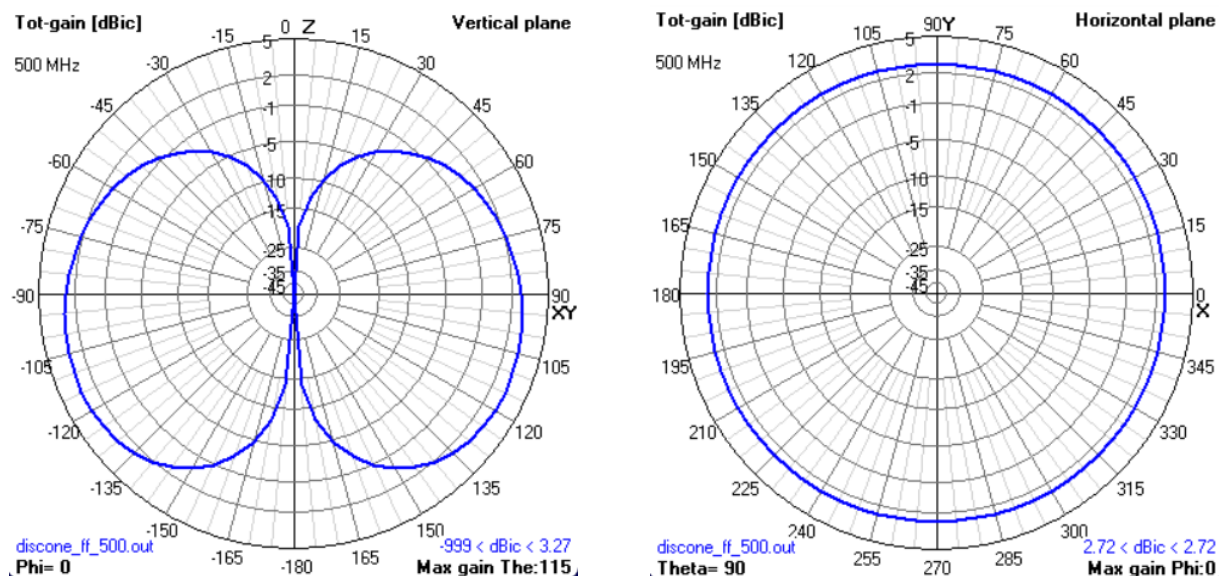
- `discone_ff_500.nec` (για  $f_0$ ),
- `discone_ff_1000.nec` (για  $2f_0$ ),
- `discone_ff_1500.nec` (για  $3f_0$ ),
- `discone_ff_2000.nec` (για  $4f_0$ ).

Με τα αρχεία αυτά πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις στο 4nec2 και εξήχθησαν τα ζητούμενα 2D και 3D διαγράμματα ακτινοβολίας.

### 2.1.5 Αποτελέσματα Ερωτήματος (β) και Σχολιασμός

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης των διαγραμμάτων ακτινοβολίας της δισκοκωνικής κεραίας. Για κάθε συχνότητα λειτουργίας, παρατίθενται ανά ζεύγη το κατακόρυφο και το οριζόντιο διάγραμμα ακτινοβολίας, ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση της κατανομής της ακτινοβολούμενης ισχύος στον χώρο.

Συχνότητα  $f_0 = 500$  MHz



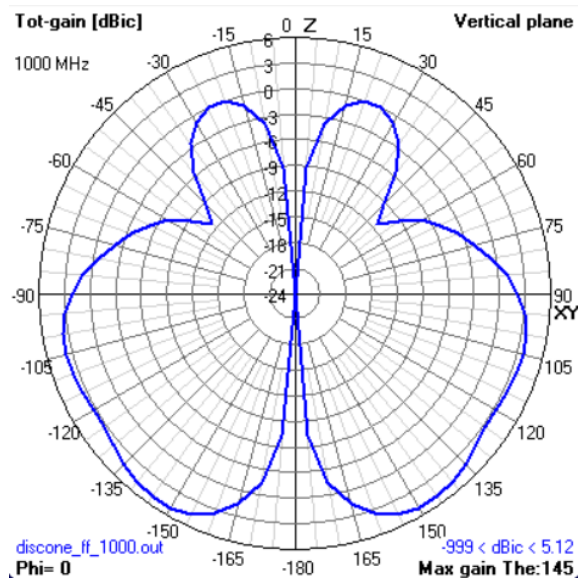
(α') Κατακόρυφο διάγραμμα ακτινοβολίας

(β') Οριζόντιο διάγραμμα ακτινοβολίας

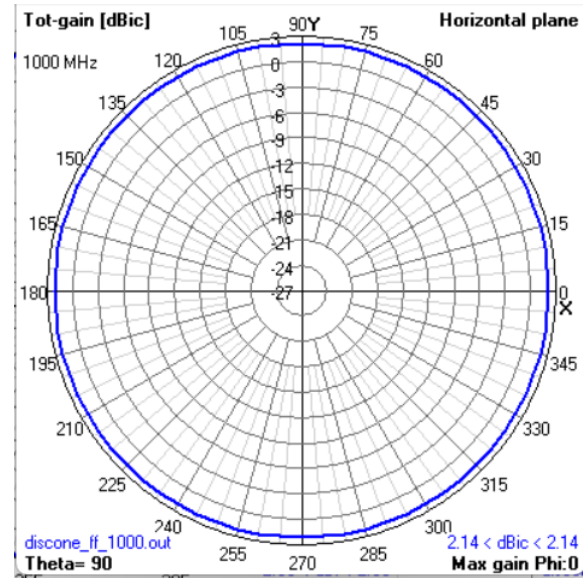
Σχήμα 2.6: Διαγράμματα ακτινοβολίας δισκοκωνικής κεραίας στη συχνότητα 500 MHz.

Στη συχνότητα των 500 MHz, η κεραία παρουσιάζει ιδιαίτερα ομαλή ακτινοβολούμενη συμπεριφορά. Το κατακόρυφο διάγραμμα χαρακτηρίζεται από έναν ευρύ κύριο λοβό με μέγιστη ακτινοβολία κοντά στο οριζόντιο επίπεδο, ενώ δεν εμφανίζονται έντονοι δευτερεύοντες λοβοί. Αντίστοιχα, το οριζόντιο διάγραμμα είναι σχεδόν κυκλικό, επιβεβαιώνοντας την σχεδόν ομοκατευθυντική λειτουργία της κεραίας στο επίπεδο XY για χαμηλές συχνότητες.

Συχνότητα  $2f_0 = 1000 \text{ MHz}$



(α') Κατακόρυφο διάγραμμα ακτινοβολίας

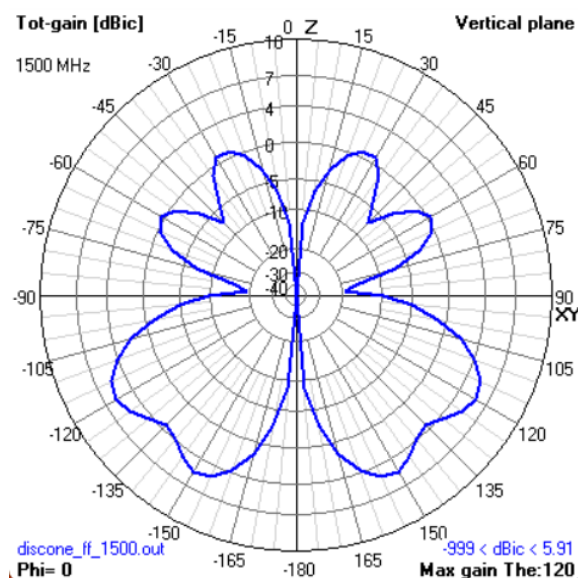


(β') Οριζόντιο διάγραμμα ακτινοβολίας

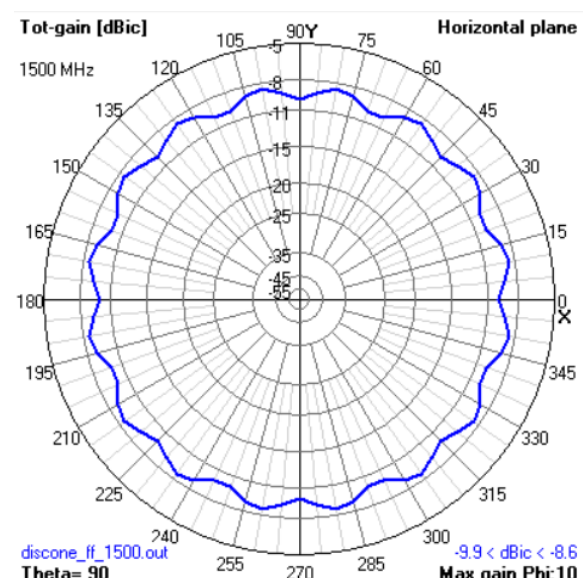
Σχήμα 2.7: Διαγράμματα ακτινοβολίας δισκοκωνικής κεραίας στη συχνότητα 1000 MHz.

Στη συχνότητα των 1000 MHz παρατηρείται σαφής μεταβολή της μορφής των διαγραμμάτων. Στο κατακόρυφο επίπεδο αρχίζει να διακρίνεται η ανάπτυξη επιπλέον τοπικών μεγίστων, γεγονός που υποδηλώνει ότι η κεραία λειτουργεί πλέον ως ηλεκτρικά μεγαλύτερη διάταξη. Το οριζόντιο διάγραμμα διατηρεί σε γενικές γραμμές την κυκλική συμμετρία, εμφανίζοντας όμως ήπιες διακυμάνσεις στην απολαβή.

Συχνότητα  $3f_0 = 1500 \text{ MHz}$



(α') Κατακόρυφο διάγραμμα ακτινοβολίας



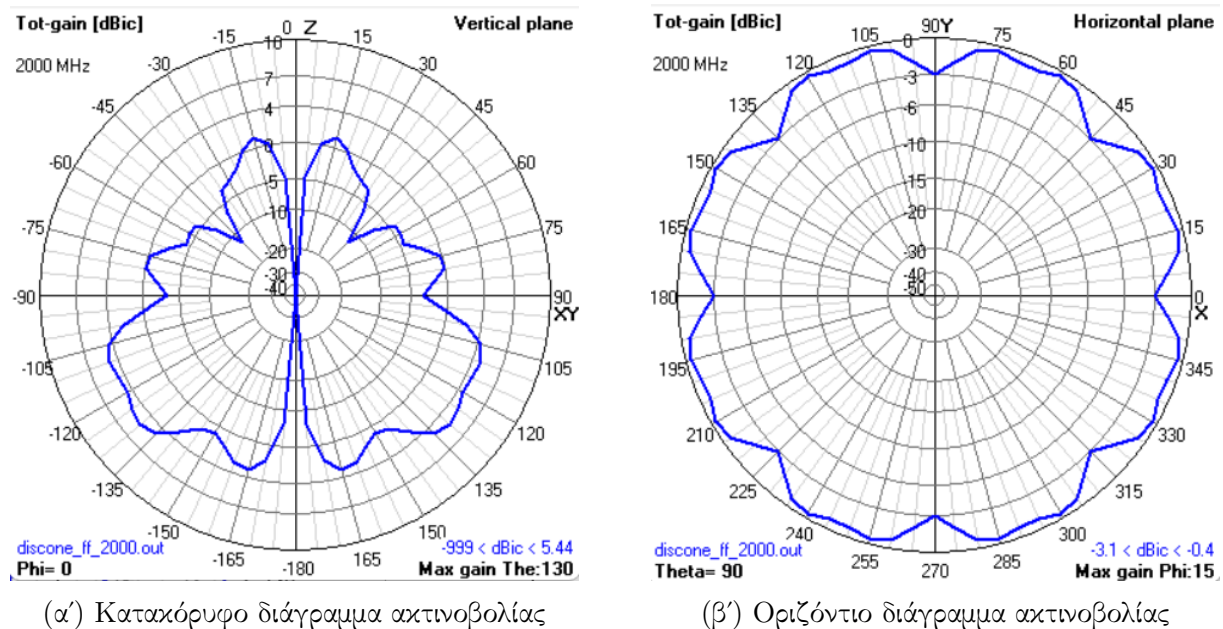
(β') Οριζόντιο διάγραμμα ακτινοβολίας

Σχήμα 2.8: Διαγράμματα ακτινοβολίας δισκοκωνικής κεραίας στη συχνότητα 1500 MHz.



Στα 1500 MHz, η κατανομή της ακτινοβολίας γίνεται σημαντικά πιο σύνθετη. Το κατακόρυφο διάγραμμα εμφανίζει πολλαπλούς λοβούς, με τον κύριο λοβό να περιορίζεται γωνιακά και να συνοδεύεται από δευτερεύουσες δομές. Στο οριζόντιο επίπεδο, οι κυματώσεις της απολαβής είναι πλέον εμφανείς, αν και η γενική συμμετρία της κεραίας εξακολουθεί να διατηρείται.

Συχνότητα  $4f_0 = 2000$  MHz



Σχήμα 2.9: Διαγράμματα ακτινοβολίας δισκοκωνικής κεραίας στη συχνότητα 2000 MHz.

Στη μέγιστη εξεταζόμενη συχνότητα των 2000 MHz, η κεραία παρουσιάζει έντονα δομημένη ακτινοβολία. Το κατακόρυφο διάγραμμα χαρακτηρίζεται από πλήθος λοβών και αισθητή μετατόπιση της μέγιστης ακτινοβολίας εκτός του οριζόντιου επιπέδου. Παράλληλα, στο οριζόντιο διάγραμμα οι διακυμάνσεις της απολαβής είναι πλέον σαφείς, αντανακλώντας τον περιορισμένο βαθμό ομοκατευθυντικότητας σε υψηλές συχνότητες.

## 2.1.6 Συμπεράσματα Ερωτήματος (β)

Η συστηματική εξέταση των οριζόντιων και κατακόρυφων διαγραμμάτων ακτινοβολίας της δισκοκωνικής κεραίας καταδεικνύει ότι η χωρική κατανομή της εκπεμπόμενης ισχύος εξαρτάται έντονα από τη συχνότητα λειτουργίας. Η συμπεριφορά αυτή είναι απολύτως αναμενόμενη για μια ευρυζωνική κεραία σταθερής γεωμετρίας, της οποίας οι ηλεκτρικές διαστάσεις μεταβάλλονται σημαντικά σε συνάρτηση με το μήκος κύματος.

Στη θεμελιώδη συχνότητα  $f_0 = 500$  MHz, το οριζόντιο διάγραμμα ακτινοβολίας ( $\theta = 90^\circ$ ) χαρακτηρίζεται από σχεδόν ιδανική κυκλική συμμετρία. Η μέγιστη απολαβή, ίση με περίπου 2.72 dBic, παραμένει πρακτικά σταθερή σε όλο το εύρος των 360°, γεγονός που επιβεβαιώνει τον παγκαντευθυντικό χαρακτήρα της κεραίας στο οριζόντιο επίπεδο. Η ιδιότητα αυτή καθιστά τη διάταξη ιδιαίτερα κατάλληλη για εφαρμογές γενικής κάλυψης και λήψης ανεξάρτητης κατεύθυνσης.

Στο κατακόρυφο επίπεδο ( $\phi = 0^\circ$ ) για την ίδια συχνότητα, το διάγραμμα παρουσιάζει τη χαρακτηριστική διλοβική μορφή που αναμένεται για δομές αξονικής συμμετρίας. Η μέγιστη απολαβή ανέρχεται στα 3.27 dBic, με τη γωνία μέγιστης ακτινοβολίας να εντοπίζεται κοντά στις  $\theta \approx 115^\circ$ . Παράλληλα, παρατηρείται έντονη εξασθένηση της ακτινοβολίας κατά μήκος του άξονα της κεραίας ( $\theta = 0^\circ$  και  $180^\circ$ ), στοιχείο που επιβεβαιώνει τη σωστή λειτουργία της κεραίας ως ακτινοβολούσας δομής εγκάρσιας εκπομπής.

Αυξάνοντας τη συχνότητα στα  $2f_0 = 1000$  MHz, το οριζόντιο διάγραμμα διατηρεί σε μεγάλο βαθμό την κυκλική του μορφή, αν και παρατηρείται μια μικρή μείωση της μέγιστης απολαβής σε περίπου 2.14 dBic. Η συμπεριφορά αυτή δείχνει ότι η κεραία εξακολουθεί να προσφέρει σχετικά ομοιόμορφη κάλυψη στο οριζόντιο επίπεδο. Στο κατακόρυφο διάγραμμα, όμως, η μέγιστη απολαβή αυξάνεται αισθητά στα 5.12 dBic, ενώ η κύρια δέσμη μετατοπίζεται προς  $\theta \approx 145^\circ$ . Η μεταβολή αυτή υποδηλώνει αυξημένη κατευθυντικότητα και σηματοδοτεί την έναρξη του φαινομένου κλίσης της κύριας δέσμης (beam tilting).

Στις υψηλότερες συχνότητες, και ειδικότερα στα  $3f_0 = 1500$  MHz, το οριζόντιο διάγραμμα παύει να είναι ομοιόμορφο και εμφανίζει έντονες διακυμάνσεις της απολαβής. Η μέγιστη τιμή μειώνεται σημαντικά, φθάνοντας περίπου τα  $-8.6$  dBic, γεγονός που υποδηλώνει την ανάπτυξη πολλαπλών δευτερευόντων λοβών. Η συμπεριφορά αυτή σχετίζεται άμεσα με το ότι η κεραία καθίσταται πλέον ηλεκτρικά μεγάλη σε σχέση με το μήκος κύματος.

Στο κατακόρυφο επίπεδο για τα 1500 MHz, το φαινόμενο της λοβοποίησης (lobbing) γίνεται ιδιαίτερα εμφανές. Η μέγιστη απολαβή φθάνει τα 5.91 dBic σε γωνία  $\theta \approx 120^\circ$ , ενώ παρατηρούνται και βαθιοί μηδενισμοί σε ενδιάμεσες κατευθύνσεις. Τα χαρακτηριστικά αυτά αποτελούν σαφή ένδειξη σύνθετης κατανομής ρεύματος και ακτινοβολίας.

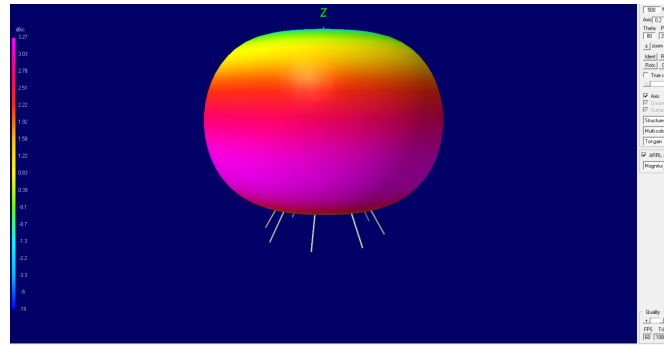
Τέλος, στη συχνότητα  $4f_0 = 2000$  MHz, το οριζόντιο διάγραμμα εμφανίζει έντονη ανομοιομορφία, με τη μέγιστη απολαβή να περιορίζεται σε μόλις  $-0.4$  dBic. Αντίθετα, στο κατακόρυφο επίπεδο η μέγιστη απολαβή ανέρχεται στα 5.44 dBic και εμφανίζεται σε γωνία  $\theta \approx 130^\circ$ . Η παρουσία πολλών δευτερευόντων λοβών και η περαιτέρω μετατόπιση της κύριας δέσμης επιβεβαιώνουν ότι η κεραία λειτουργεί πλέον ως έντονα ηλεκτρικά εκτεταμένη δομή.

Συμπερασματικά, η δισκοκωνική κεραία παρουσιάζει εξαιρετικά ομοιόμορφη και παγκαντευθυντική συμπεριφορά στο οριζόντιο επίπεδο για χαμηλές και μεσαίες συχνότητες. Με την αύξηση της συχνότητας, εμφανίζονται αναμενόμενα φαινόμενα κατευθυντικότητας, λοβοποίησης και κλίσης της κύριας δέσμης στο κατακόρυφο επίπεδο. Η συμπεριφορά αυτή δεν αποτελεί μειονέκτημα, αλλά φυσική συνέπεια της ευρυζωνικής λειτουργίας και καθορίζει με σαφήνεια τα όρια και τα χαρακτηριστικά απόδοσης της κεραίας σε πρακτικές εφαρμογές.

### 2.1.7 Παράθεση και Ανάλυση 3D Διαγραμμάτων Ακτινοβολίας

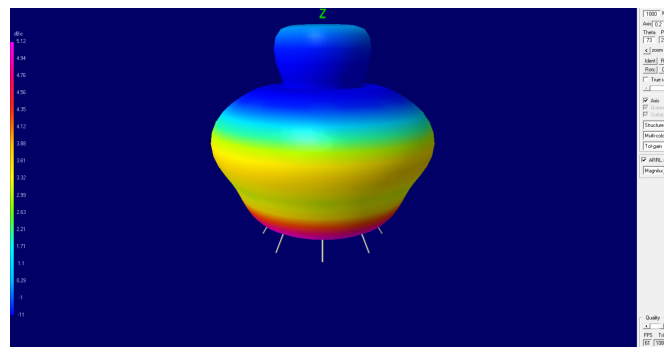
Η τρισδιάστατη απεικόνιση της ακτινοβολίας της δισκοκωνικής κεραίας προσφέρει μια ολοκληρωμένη εικόνα της χωρικής κατανομής της εκπεμπόμενης ισχύος, επιτρέποντας τη συνδυαστική ερμηνεία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα οριζόντια και κατακόρυφα διαγράμματα ακτινοβολίας. Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα 3D διαγράμματα ολικής απολαβής (Total Gain) για τις συχνότητες 500, 1000, 1500 και 2000 MHz.





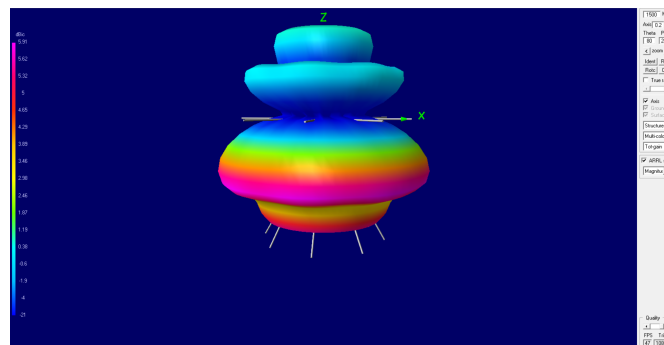
Σχήμα 2.10: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας για  $f_0 = 500$  MHz.

Στη θεμελιώδη συχνότητα των 500 MHz, το 3D διάγραμμα παρουσιάζει μια ομαλή και συμμετρική μορφή, προσεγγίζοντας έναν πεπλατυσμένο τοροειδή όγκο. Η μέγιστη απολαβή ανέρχεται σε περίπου 3.27 dBic, ενώ η κατανομή της ακτινοβολίας είναι συνεχής χωρίς έντονες τοπικές μεταβολές. Η μορφή αυτή επιβεβαιώνει ότι η κεραία λειτουργεί ως ηλεκτρικά μικρή διάταξη στη συγκεκριμένη συχνότητα, με την ισχύ να κατανέμεται κυρίως γύρω από τον ορίζοντα και με σαφή εξασθένηση κατά μήκος του άξονα  $\theta = 0^\circ$  και  $\theta = 180^\circ$ .



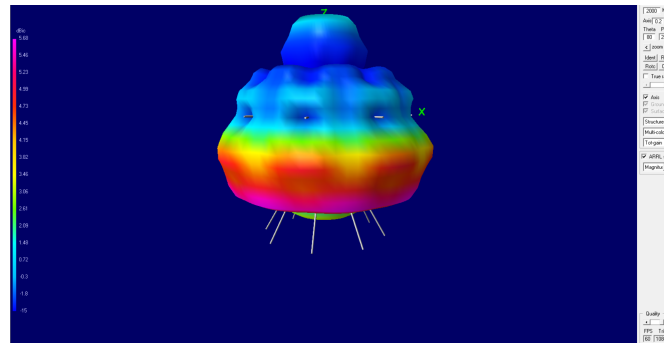
Σχήμα 2.11: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας για  $2f_0 = 1000$  MHz.

Στη συχνότητα των 1000 MHz, η συνολική κατανομή παραμένει σχετικά ομαλή, ωστόσο παρατηρείται σαφέστερη συγκέντρωση της ακτινοβολίας σε συγκεκριμένες γωνιακές περιοχές. Η μέγιστη απολαβή αυξάνεται στα 5.12 dBic, γεγονός που υποδηλώνει βελτίωση της κατευθυντικότητας. Η κύρια ζώνη ακτινοβολίας μετατοπίζεται ελαφρώς προς χαμηλότερες γωνίες  $\theta$ , στοιχείο που συνάδει με την εμφάνιση του φαινομένου κλίσης της δέσμης (beam tilting) που καταγράφηκε και στα κατακόρυφα διαγράμματα.



Σχήμα 2.12: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας για  $3f_0 = 1500$  MHz.

Στα 1500 MHz, το 3D διάγραμμα αποκτά σαφώς πιο σύνθετη δομή. Η μέγιστη απολαβή φθάνει τα 5.91 dBic, ωστόσο η ακτινοβολία δεν κατανέμεται πλέον ομοιόμορφα. Παρατηρείται διάσπαση της κύριας δέσμης σε πολλαπλούς λοβούς, καθώς και έντονες τοπικές μεταβολές της απολαβής. Η συμπεριφορά αυτή αποτελεί άμεση συνέπεια του γεγονότος ότι η κεραία καθίσταται ηλεκτρικά μεγάλη, με αποτέλεσμα την ενίσχυση φαινομένων παρεμβολής μεταξύ των ρευμάτων που αναπτύσσονται στη γεωμετρία της.



Σχήμα 2.13: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας για  $4f_0 = 2000$  MHz.

Τέλος, στη συχνότητα των 2000 MHz, η ακτινοβολία παρουσιάζει ιδιαίτερα πολύπλοκη χωρική κατανομή. Η μέγιστη απολαβή ανέρχεται σε 5.44 dBic, ωστόσο η ύπαρξη πολλών δευτερευόντων λοβών και ανομοιομορφιών καταδεικνύει ότι η κεραία λειτουργεί πλέον ως ηλεκτρικά εκτεταμένη δομή. Οι ανωμαλίες αυτές σχετίζονται τόσο με τη γεωμετρία της δισκοκωνικής διάταξης όσο και με την προσεγγιστική αναπαράστασή της μέσω περιορισμένου αριθμού ακτινικών συρμάτων.

Συνοψίζοντας, η τρισδιάστατη απεικόνιση επιβεβαιώνει ότι η δισκοκωνική κεραία παρουσιάζει ομαλή και προβλέψιμη συμπεριφορά σε χαμηλές συχνότητες, με σχεδόν ιδανική κατανομή ισχύος γύρω από τον ορίζοντα. Με την αύξηση της συχνότητας, εμφανίζονται σταδιακά φαινόμενα κατευθυντικότητας, λοβοποίησης και μετατόπισης της κύριας δέσμης, τα οποία είναι πλήρως αναμενόμενα για μια ευρυζωνική κεραία σταθερής γεωμετρίας. Η 3D ανάλυση λειτουργεί έτσι συμπληρωματικά προς τα δισδιάστατα διαγράμματα, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη κατανόηση της χωρικής απόδοσης της κεραίας στο σύνολο του εξεταζόμενου φάσματος.

## Βιβλιογραφία

- [1] Elearning Ασκήσεις και Θεωρία 058 Κεραίες και Διάδοση
- [2] Λογισμικά 4NEC2 <http://www.qsl.net/4nec2/> και MATLAB R2025b