



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Κεραίες και Διάδοση Αναφορά
Εργασία 2

Διακολουχάς Δημήτριος
ΑΕΜ 10642

Email: ddiakolou@ece.auth.gr

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή στην Εργασία	3
2 Ανάλυση Δισκοκωνικής Κεραίας	4
2.1 Παρουσίαση Προβλήματος και Δεδομένα Κεραίας	4
2.1.1 Γεωμετρικές Διαστάσεις Κεραίας	5
2.2 Ανάλυση Σύνθετης Αντίστασης Εισόδου Z_{in} και Συντελεστή Ανάχλασης [Ερώτημα (α)]	5
2.2.1 Παραγόμενα αρχεία .nec και ρόλος τους	6
2.3 Αποτελέσματα Ερωτήματος (α) και Σχολιασμός	8
2.3.1 Διαγράμματα Οπτικοποίησης Σύνθετης Αντίστασης Εισόδου Z_{in}	8
2.3.2 Διαγράμματα Οπτικοποίησης Συντελεστή Ανάχλασης $ \Gamma $	9
2.3.3 Σχολιασμός και Προτάσεις Ιδανικότερης Προσαρμογής	10
2.3.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Οπτικοποίησης Βελτιωμένης Προσαρμογής	10
2.3.5 Συμπεράσματα Βελτιωμένης Προσαρμογής	11
2.4 Διαγράμματα Ακτινοβολίας και Μελέτη Κατανομής Ισχύος [Ερώτημα (β)]	12
2.4.1 Προσέγγιση Υπολογισμού Διαγραμμάτων Far Field	12
2.4.2 Παραγωγή αρχείων .nec για υπολογισμό ακτινοβολίας	13
2.5 Αποτελέσματα Ερωτήματος (β) και Σχολιασμός	14
2.5.1 Συχνότητα $f_0 = 500$ MHz	14
2.5.2 Συχνότητα $2f_0 = 1000$ MHz	15
2.6 Συμπεράσματα Ερωτήματος (β)	16
2.7 Παράθεση και Ανάλυση 3D Διαγραμμάτων Ακτινοβολίας	18
3 Ανάλυση Ελικοειδούς Κεραίας	20
3.1 Παρουσίαση Προβλήματος και Βασικά Χαρακτηριστικά	20
3.2 Γεωμετρικός Σχεδιασμός και Παράμετροι Μοντέλου	21
3.2.1 Συνοπτικός Πίνακας Διαστάσεων	21
3.3 Μεταβολή του $ Z_{in} $ και επιλογή Z_0 [Ερώτημα (α)]	22
3.3.1 Μοντελοποίηση στο NEC και παραγόμενα αρχεία	22
3.3.2 Αποτελέσματα και Ανάλυση Ερωτήματος (α)	24
3.3.3 Σχολιασμός και Προτάσεις Ιδανικότερης Προσαρμογής	25
3.4 Ευρυζωνικότητα στην τιμή χαρακτηριστικής αντίστασης $Z_0 = 210 \Omega$	26
3.4.1 Αποτελέσματα και Ανάλυση Ερωτήματος (β)	26
3.5 Ακτινοβολούμενη Συμπεριφορά και Εξέλιξη Κέρδους της Ελικοειδούς Κεραίας [Ερώτημα (γ)]	28
3.5.1 Λειτουργία σε Χαμηλές Συχνότητες: Κανονικός Ρυθμός Ακτινοβολίας	28
3.5.2 Μεταβατική Περιοχή και Προσέγγιση Αξονικού Ρυθμού	28
3.5.3 Μέγιστη Απόδοση και Συμπεριφορά σε Ύψηλές Συχνότητες	30

3.5.4 Συνολική Αξιολόγηση	31
4 Ανάλυση Αναδιπλωμένου Διπόλου	32
4.1 Παρουσίαση Προβλήματος και Δεδομένα Κεραίας	32
4.2 Γεωμετρικός Σχεδιασμός και Παράμετροι Μοντέλου	32
4.2.1 Συνοπτικός Πίνακας Διαστάσεων	33
4.3 Ανάλυση $ Z_{in} $ και Επιλογή Z_0 [Ερώτημα (α)]	33
4.3.1 Μοντελοποίηση στο NEC και Παραγόμενα Αρχεία	33
4.3.2 Αποτελέσματα και Ερμηνεία της Σύνθετης Αντίστασης	36
4.3.3 Αξιολόγηση Προσαρμογής (SWR / $ \Gamma $) και Επιλογές Z_0	38
4.3.4 Συνολικός Σχολιασμός	41
4.4 Καθορισμός Παραμέτρων για την Ανάλυση Ακτινοβολίας [Ερώτημα (β)]	42
4.4.1 Επιλεγμένα Σημεία Λειτουργίας ανά Περίπτωση	42
4.4.2 Διαγράμματα Ακτινοβολίας στο Μακρινό Πεδίο	43
4.4.3 Συνολική Αποτίμηση	45
5 Ανάλυση Κεραίας Οδεύοντος Κύματος (Beverage)	46
5.1 Παρουσίαση Προβλήματος και Δεδομένα Κεραίας	46
5.2 Γεωμετρικός Σχεδιασμός και Παράμετροι Μοντέλου	46
5.2.1 Συνοπτικός Πίνακας Διαστάσεων και Ρυθμίσεων	47
5.3 Ανάλυση $ Z_{in} $ και Επιλογή Z_0 [Ερώτημα (α)]	47
5.3.1 Μοντελοποίηση στο NEC και Παραγόμενα Αρχεία	47
5.3.2 Αρχική Εκτίμηση Z_0 και Εκκίνηση Επιλογής Τερματισμού	49
5.3.3 Μελέτη Τερματισμού σε Perfect Ground	49
5.3.4 Μελέτη Τερματισμού σε Good/Fast Ground	52
5.3.5 Σύντομη Σύνοψη Επιλογών R_L	54
5.4 Ανάλυση Διαγραμμάτων Ακτινοβολίας και Κατευθυντικότητας [Ερώτημα (β)]	55
5.4.1 Περίπτωση I: Τέλειο Έδαφος (Perfect Ground)	55
5.4.2 Περίπτωση II: Πραγματικό Έδαφος (Good Ground)	56
5.4.3 Σύντομα συμπεράσματα από τα διαγράμματα ακτινοβολίας (12 MHz) .	58

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 0.34λ , το μήκος των συρμάτων του κώνου ίσο με 0.5λ , 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 segment 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 , θ_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 λ και $2\theta_0 = 60^\circ$).

Παράμετρος	Σύμβολο	Σχέση (ως προς λ)	Τιμή για $\lambda = 0.6 \text{ m}$
Μήκος κύματος (περίπτωση $\Delta-\Lambda$)	λ	—	0.6 m
Ακτίνα δίσκου	R_d	0.34λ	0.204 m
Μήκος συρμάτων κώνου	L_c	0.5λ	0.300 m
Συνολική γωνία ανοίγματος κώνου	$2\theta_0$	60°	60°
Ημιγωνία κώνου	θ_0	30°	30°
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
Τύπος κώνου (κατακόρυφη προβολή)	h	$L_c \cos \theta_0$	0.260 m
Οριζόντια προβολή κώνου	R_{cone}	$L_c \sin \theta_0$	0.150 m

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

2.2 Ανάλυση Σύνθετης Αντίστασης Εισόδου Z_{in} και Συντελεστή Ανάκλασης [Ερώτημα (α)]

Για την απόντηση 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 $|G|$ 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 λ , (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 τμήματος είναι $\lambda_{\min} \approx 0.15\text{ m}$, όρα $\Delta L \approx \lambda_{\min}/9.5$, 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).

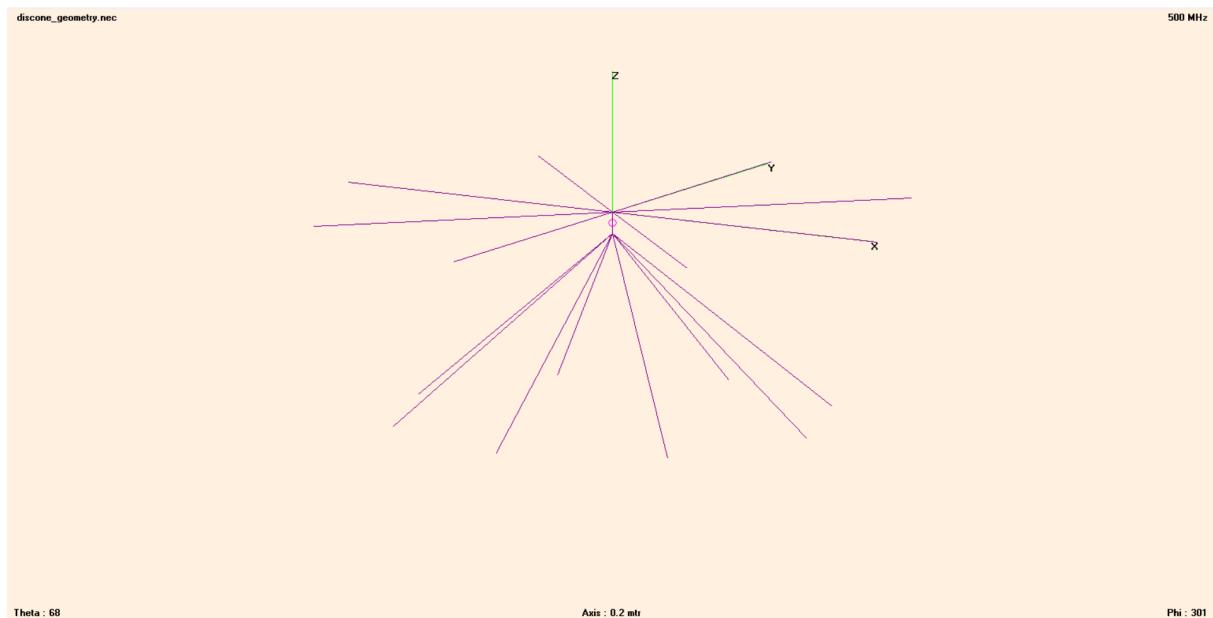
2.2.1 Παραγόμενα αρχεία .nec και ρόλος τους

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

- `discone_geometry.nec`: αρχείο γεωμετρίας για μία **μοναδική** συχνότητα (ορίζεται στα 500 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 MHz έως 2000 MHz με βήμα 10 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 αγώγιμου 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.

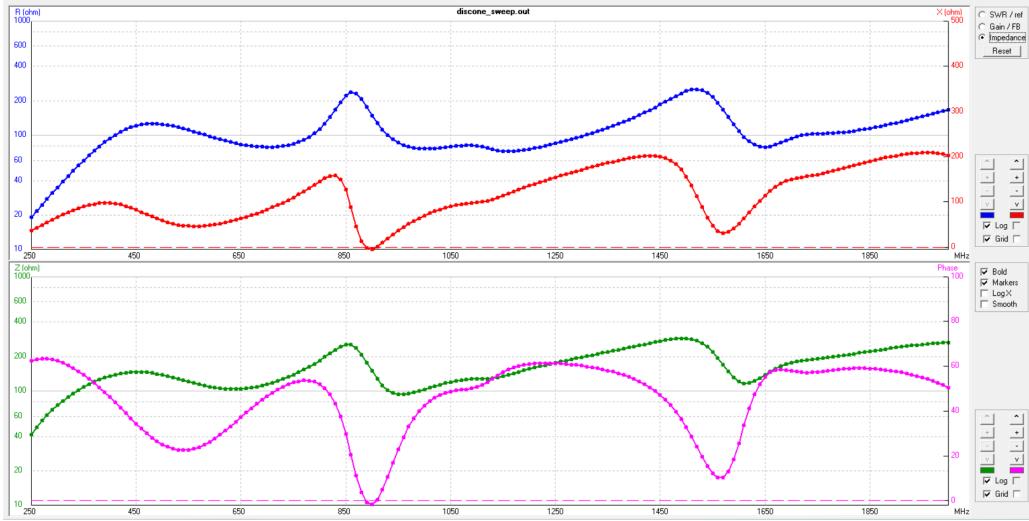


Σχήμα 2.1: Γεωμετρία δισκοκωνικής κεραίας.

2.3 Αποτελέσματα Ερωτήματος (α) και Σχολιασμός

2.3.1 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 υπολογίζεται 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 Ω και 250 Ω. Εμφανίζονται ωστόσο τοπικά μέγιστα και ελάχιστα, τα οποία σχετίζονται με επιψέρους συντονισμούς της κεραίας, φαινόμενο αναμενόμενο για δομή ευρείας ζώνης που λειτουργεί ως μονόπολος μεταβαλλόμενης διαμέτρου.

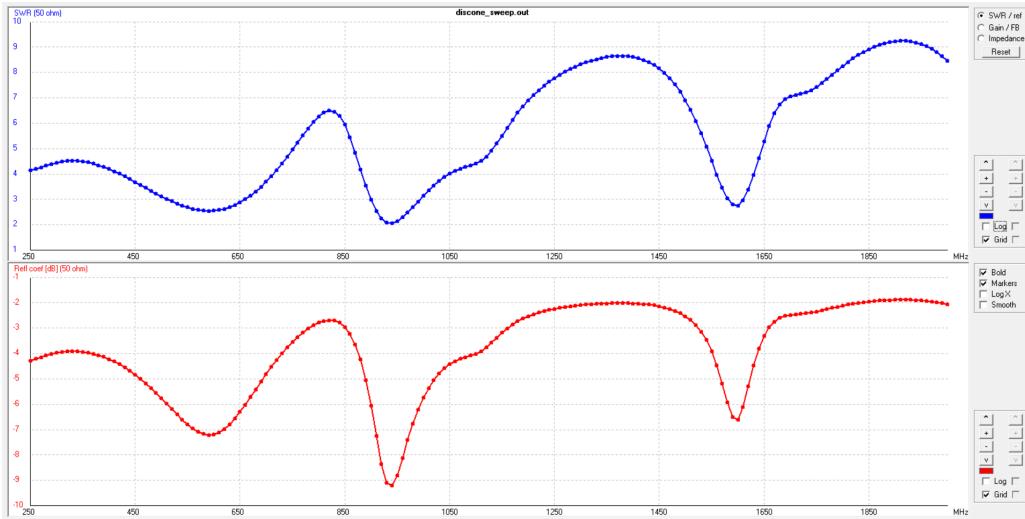
Το φανταστικό μέρος X_{in} παρουσιάζει εναλλαγή μεταξύ θετικών και αρνητικών τιμών, υποδεικνύοντας μεταβάσεις μεταξύ επαγωγικής και χωρητικής συμπεριφοράς. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι συχνότητες στις οποίες το X_{in} προσεγγίζει το μηδέν, καθώς σε αυτές η κεραία βρίσκεται κοντά σε συνθήκες συντονισμού. 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.

2.3.2 Διαγράμματα Οπτικοποίησης Συντελεστή Ανάχλασης $|\Gamma|$

Ο συντελεστής ανάχλασης $|\Gamma|$ 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 ανάχλασης 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 ανάχλασης (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 διαχριτές 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 υποτμήμα. Η συσχέτιση αυτή επιβεβαιώνει ότι η συμπεριφορά του συντελεστή ανάχλασης 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 50Ω 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, ύμενα που μπορεί να διερευνηθεί περαιτέρω.

2.3.3 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 50Ω , συχνά στην περιοχή $80\text{--}200 \Omega$. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η χρήση γραμμής μεταφοράς με υψηλότερη χαρακτηριστική αντίσταση θα μπορούσε να οδηγήσει σε βελτιωμένη προσαρμογή.

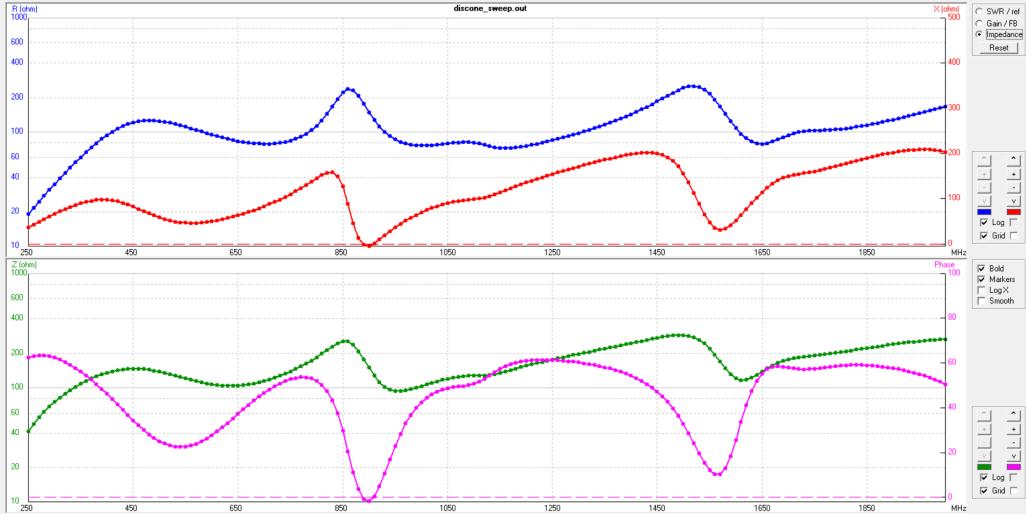
Ενδεικτικά, η επιλογή γραμμής τροφοδοσίας με $Z_0 = 75 \Omega$ ή $Z_0 = 120 \Omega$ αναμένεται να μειώσει σημαντικά το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης σε μεγάλο μέρος του εύρους $0.5f_0$ έως $4f_0$. Τότε, το return loss θα μπορούσε να διατηρείται σε επίπεδα χαμηλότερα από -10 dB για σημαντικό τμήμα της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

2.3.4 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Οπτικοποίησης Βελτιωμένης Προσαρμογής

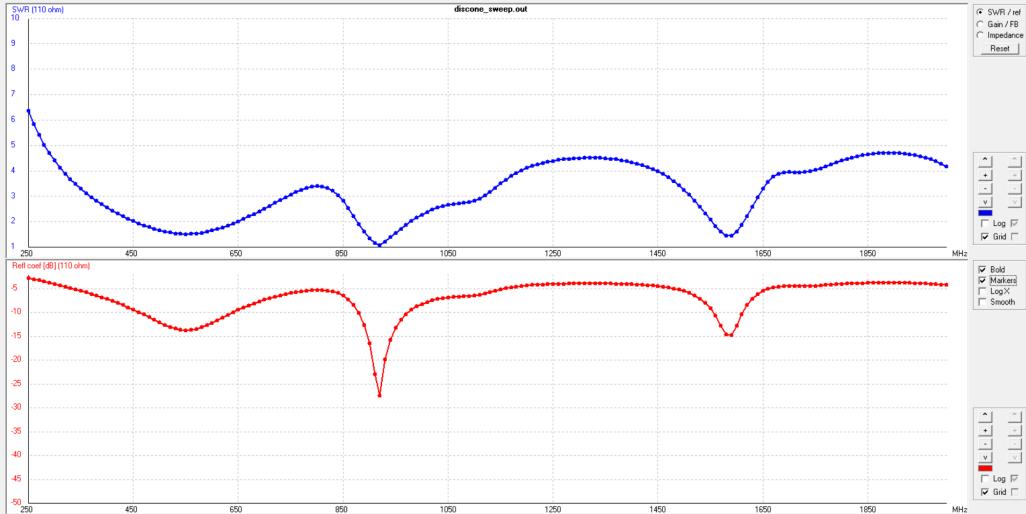
Για την επαλήθευση των παραπάνω σχολίων σχετικά με την ιδανικότερη προσαρμογή της δισκοκωνικής κεραίας, πραγματοποιήθηκε επαναξιολόγηση της συμπεριφοράς της θεωρώντας γραμμή τροφοδοσίας με χαρακτηριστική αντίσταση $Z_0 = 110 \Omega$. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε με βάση τη μέση στάθμη της πραγματικής συνιστώσας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

Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η μεταβολή της σύνθετης αντίστασης εισόδου στο εύρος $0.25\text{--}2 \text{ GHz}$. Παρατηρείται ότι το πραγματικό μέρος της Z_{in} κινείται για μεγάλο τμήμα του φάσματος γύρω από τιμές συγκρίσιμες με τα 110Ω , 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 50Ω , 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 βάθη 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.

2.3.5 Συμπεράσματα Βελτιωμένης Προσαρμογής

Η διερεύνηση της συμπεριφοράς της δισκοκωνικής κεραίας με εναλλακτική χαρακτηριστική αντίσταση γραμμής τροφοδοσίας ανέδειξε τον καυτοριστικό 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 απόχριση 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 φθίνει 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.

2.4 Διαγράμματα Ακτινοβολίας και Μελέτη Κατανομής Ισχύος [Ερώτημα (β)]

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.

2.4.1 Προσέγγιση Υπολογισμού Διαγραμμάτων Far Field

Η εξαγωγή των διαγραμμάτων ακτινοβολίας πραγματοποιήθηκε στο 4ne2 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 λ). Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε εντονότερη κατευθυντικότητα και σε πιο σύνθετη γωνιακή κατανομή της ακτινοβολίας 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).

2.4.2 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 $\lambda = 0.6$ m (περίπτωση Δ-Λ),
- 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:

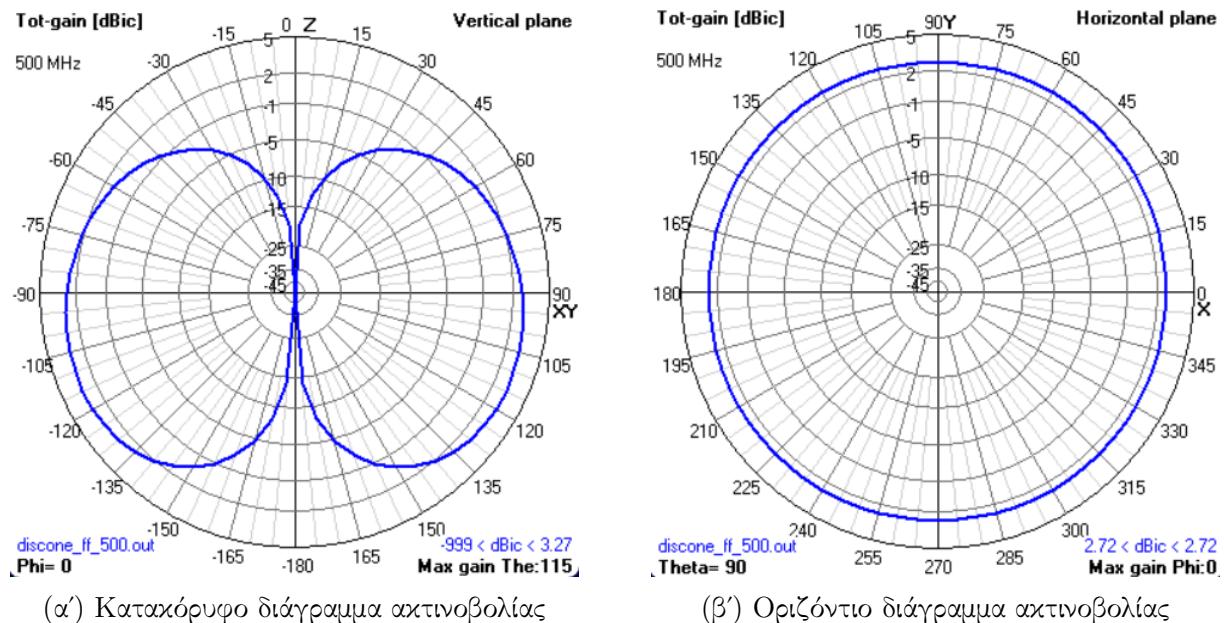
- `discone_ff_500.nec` (για f_0),
- `discone_ff_1000.nec` (για $2f_0$),
- `discone_ff_1500.nec` (για $3f_0$),
- `discone_ff_2000.nec` (για $4f_0$).

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

2.5 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.

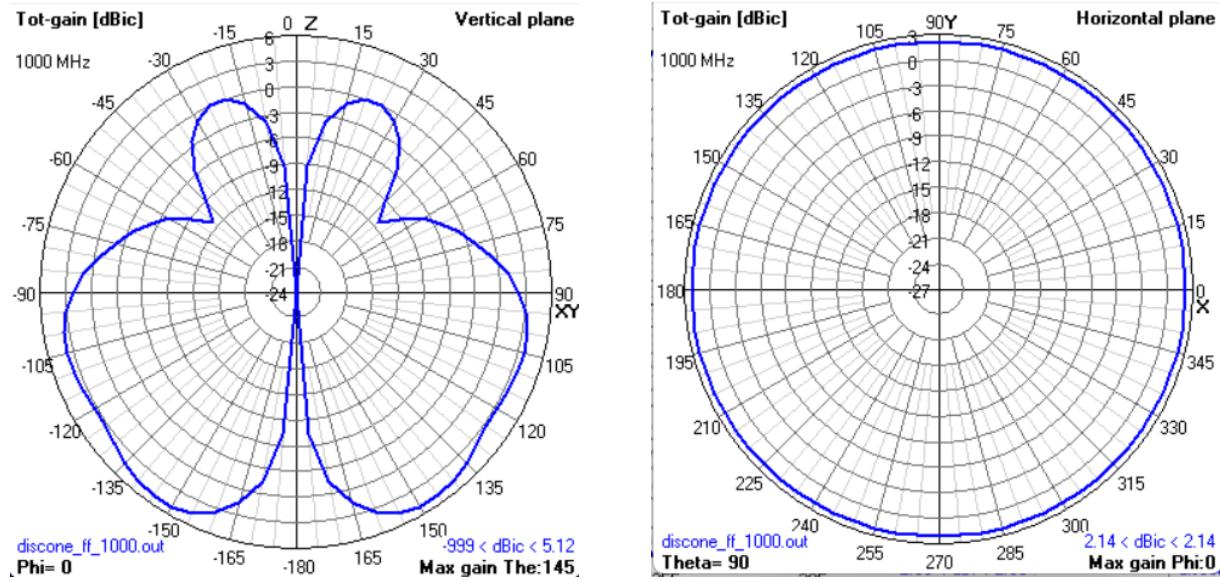
2.5.1 Συχνότητα $f_0 = 500 \text{ MHz}$



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.

2.5.2 Συχνότητα $2f_0 = 1000$ MHz



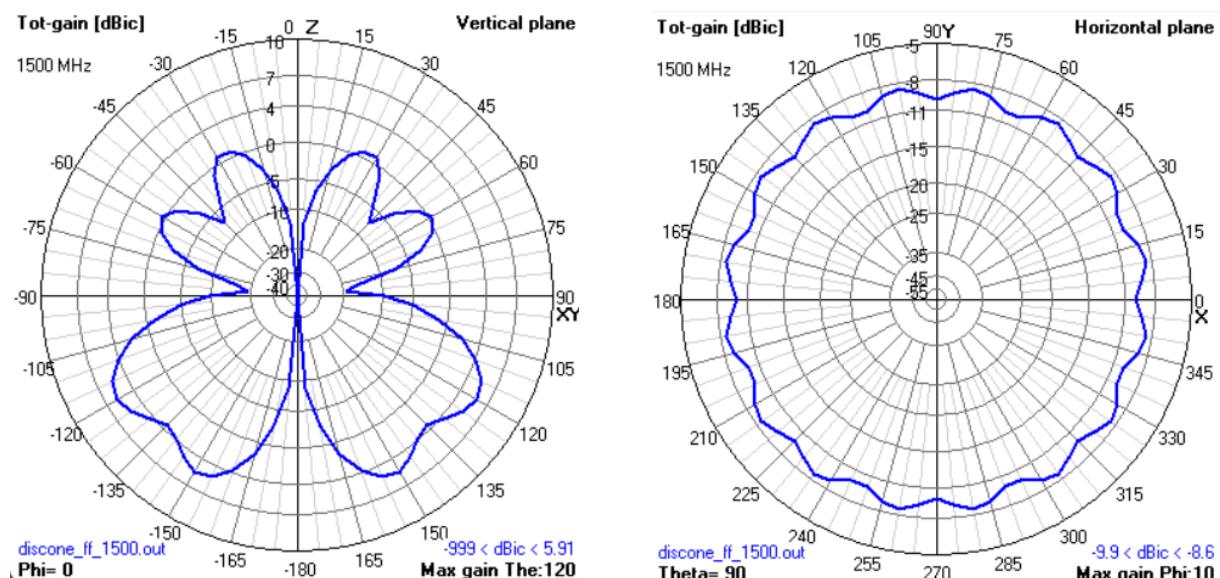
(α') Κατακόρυφο διάγραμμα ακτινοβολίας

(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 διαχρίνεται 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 $3f_0 = 1500$ MHz



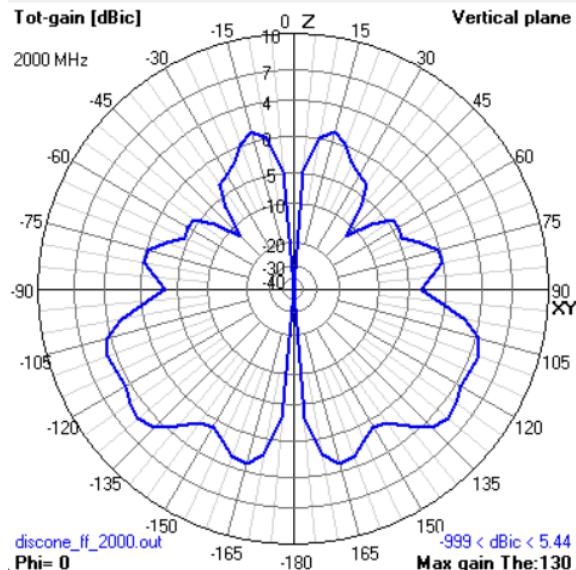
(α') Κατακόρυφο διάγραμμα ακτινοβολίας

(β') Οριζόντιο διάγραμμα ακτινοβολίας

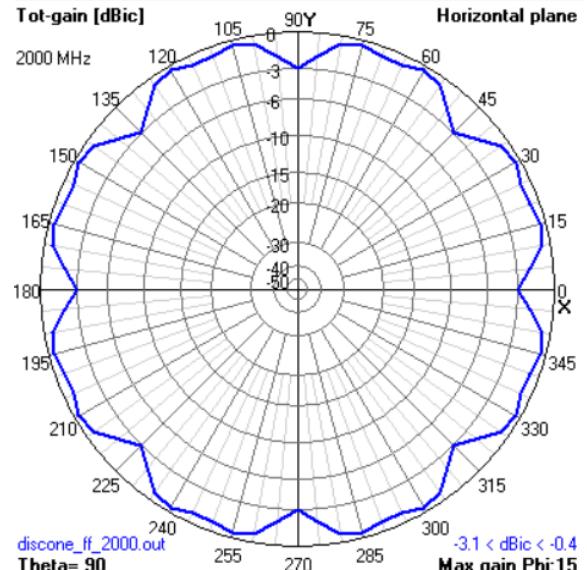
Σχήμα 2.8: Διαγράμματα ακτινοβολίας δισκοκωνικής κεραίας στη συχνότητα 1500 MHz.

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



(α') Κατακόρυφο διάγραμμα ακτινοβολίας



(β') Οριζόντιο διάγραμμα ακτινοβολίας

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.

2.6 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 ψευδελιώδη 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 παγκανεύθυντικό 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°), 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, φιλόνοντας 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.

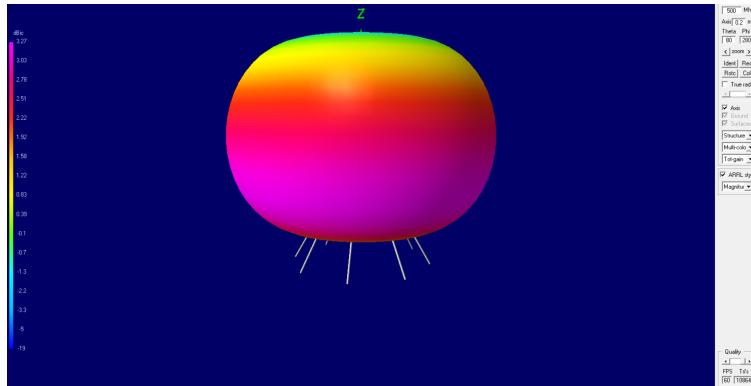
Στο κατακόρυφο επίπεδο για τα 1500 MHz, το φαινόμενο της λοβοποίησης (lobbing) γίνεται ιδιαίτερα εμφανές. Η μέγιστη απολαβή φιλάνει τα 5.91 dBic σε γωνία $\theta \approx 120^\circ$, ενώ παρατηρούνται και βαθιοί μηδενισμοί σε ενδιάμεσες κατευθυνσεις. Τα χαρακτηριστικά αυτά αποτελούν σαφή ένδειξη σύνθετης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

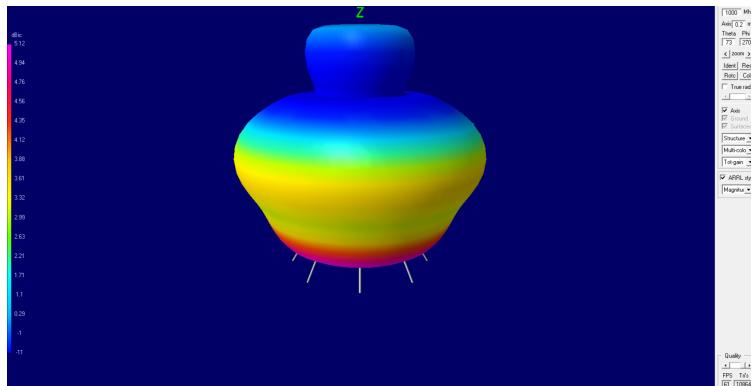
2.7 Παράθεση και Ανάλυση 3D Διαγραμμάτων Ακτινοβολίας

Η τρισδιάστατη απεικόνιση της ακτινοβολίας της δισκοκωνικής κεφαλίας 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.



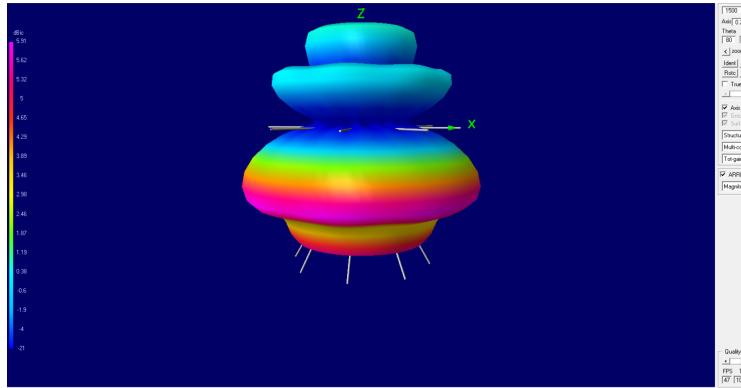
Σχήμα 2.10: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας για $f_0 = 500$ MHz.

Στη ψευδοχρονική παράσταση 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 $\theta = 180^\circ$.



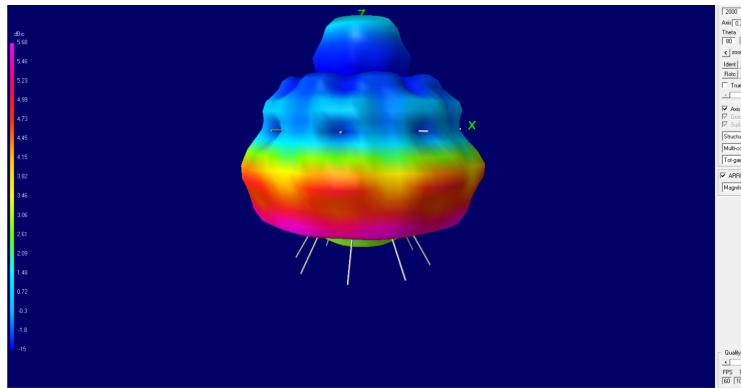
Σχήμα 2.11: Τρισδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας για $2f_0 = 1000$ MHz.

Στη συχνότητα των 1000 MHz, η συνολική κατανομή παραφένει 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 θ, στοιχείο που συνάδει με την εμφάνιση του φαινομένου κλίσης της δέσμης (βεαμ τιλτινγ) 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 ιδιαίτερη 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.

Κεφάλαιο 3

Ανάλυση Ελικοειδούς Κεραίας

3.1 Παρουσίαση Προβλήματος και Βασικά Χαρακτηριστικά

Στο δεύτερο μέρος της παρούσας εργασίας εξετάζεται η ελικοειδής κεραία, η οποία αποτελεί μία από τις πλέον κλασικές και ευρέως χρησιμοποιούμενες κεραίες ευρείας ζώνης, ιδιαίτερα σε εφαρμογές δορυφορικών επικοινωνιών, τηλεμετρίας και συστημάτων όπου απαιτείται χυλική πόλωση. Η ελικοειδής κεραία παρουσιάζει μοναδικό ενδιαφέρον, καθώς η ηλεκτρομαγνητική της συμπεριφορά εξαρτάται άμεσα από τη γεωμετρία της και τη σχέση των διαστάσεών της με το μήκος κύματος λειτουργίας.

Η λειτουργία της ελικοειδούς κεραίας μπορεί να διακριθεί σε διαφορετικά καθεστώτα, με σημαντικότερο για την παρούσα μελέτη τον αξονικό ρυθμό ακτινοβολίας (axial mode). Στο καθεστώς αυτό, η κεραία ακτινοβολεί κατά μήκος του αξονά της, παρουσιάζοντας αυξημένη κατευθυντικότητα και χυλική πόλωση, χαρακτηριστικά που επιτυγχάνονται όταν η περιφέρεια της έλικας είναι συγκρίσιμη με το μήκος κύματος.

Σκοπός του συγκεκριμένου προβλήματος είναι ο προσδιορισμός των κατάλληλων γεωμετρικών διαστάσεων μιας ελικοειδούς κεραίας δέκα (10) σπειρών, έτσι ώστε η κεραία να λειτουργεί σε αξονικό ρυθμό με κεντρική συχνότητα λειτουργίας f_0 , η οποία καθορίζεται από το εύρος επωνύμου κάθε φοιτητή. Για το επώνυμο Διακολουκάς, το οποίο ανήκει στο εύρος Δ-Λ, η κεντρική συχνότητα λαμβάνεται ίση με $f_0 = 400 \text{ MHz}$.

Η σχεδίαση της ελικοειδούς κεραίας πραγματοποιείται σύμφωνα με τις κλασικές θεωρητικές προσεγγίσεις, σύμφωνα με τις οποίες η περιφέρεια της έλικας C επιλέγεται ίση με το μήκος κύματος ($C \approx \lambda$), ώστε να εξασφαλίζεται η εμφάνιση αξονικής ακτινοβολίας. Παράλληλα, το βήμα της έλικας S επιλέγεται ώστε να εξασφαλίζεται σταθερή φάση ακτινοβολίας μεταξύ διαδοχικών σπειρών.

Η κεραία μοντελοποιείται στο περιβάλλον του λογισμικού NEC με τη χρήση της εντολής GH (Generate Helix), η οποία επιτρέπει τον ακριβή ορισμό της γεωμετρίας της έλικας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην υλοποίηση του επιπέδου γείωσης, το οποίο είναι καθοριστικής σημασίας για τη σωστή λειτουργία της ελικοειδούς κεραίας σε αξονικό ρυθμό. Το ground προσεγγίζεται με δίσκο ακτίνας $\lambda/2$, υλοποιημένο μέσω ακτινικών και χυλικών συρμάτων, σύμφωνα με τις οδηγίες της εκφώνησης.

Το σημείο τροφοδοσίας της κεραίας ορίζεται στη βάση της έλικας, στο σημείο ένωσης του πρώτου segment της έλικας με το κεντρικό σημείο του ground. Η επιλογή αυτή εξασφα-

λίζει ομαλή διέγερση της δομής και συμβατότητα με τη μεθοδολογία επίλυσης του NEC. Η διάμετρος των συρμάτων θεωρείται ίση με $\lambda/100$, ώστε να ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις εγκυρότητας της μεθόδου των ροπών.

Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, για τη διευκόλυνση της μοντελοποίησης και την αποφυγή αριθμητικών σφαλμάτων, αναπτύχθηκε αυτοματοποιημένος κώδικας σε MATLAB, ο οποίος υπολογίζει τις γεωμετρικές παραμέτρους της κεραίας βάσει του μήκους κύματος λειτουργίας και παράγει το αντίστοιχο αρχείο εισόδου .nec. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την εύκολη επαναληψιμότητα της διαδικασίας για διαφορετικές συχνότητες και παραμέτρους.

3.2 Γεωμετρικός Σχεδιασμός και Παράμετροι Μοντέλου

Οι γεωμετρικές παράμετροι της ελικοειδούς κεραίας (10 σπείρες) και του επιπέδου γείωσης (spider-web ground) προέκυψαν από τον κώδικα MATLAB που δημιουργεί τα αρχεία εισόδου .nec. Για το εύρος επωνύμου $\Delta-\Lambda$ τέθηκε $f_0 = 400 \text{ MHz}$, άρα $\lambda = c_0/f_0 = 0.75 \text{ m}$. Η σχεδίαση στοχεύει σε λειτουργία αξονικού ρυθμού (axial mode), με κλασικές επιλογές $C \simeq \lambda$ και $S \simeq \lambda/4$.

3.2.1 Συνοπτικός Πίνακας Διαστάσεων

Παράμετρος	Σύμβολο	Σχέση/Ορισμός	Τιμή (για $f_0 = 400 \text{ MHz}$)
Κεντρική συχνότητα	f_0	—	400 MHz
Μήκος κύματος	λ	c_0/f_0	0.75 m
Αριθμός σπειρών	N	δεδομένο	10
Περιφέρεια έλικας	C	$\approx \lambda$	0.75 m
Διάμετρος έλικας	D	C/π	0.2387 m
Ακτίνα έλικας	R	$D/2$	0.1194 m
Βήμα έλικας	S	$\lambda/4$	0.1875 m
Διάμετρος σύρματος	d	$\lambda/100$	0.0075 m
Ακτίνα σύρματος (για NEC)	a	$d/2$	0.00375 m
Ανύψωση/διάκενο τροφοδοσίας	Gap	$\lambda/40$	0.01875 m
Ακτίνα ground (δίσκος)	R_g	$\lambda/2$	0.375 m
Ακτινικά σύρματα ground	N_{rad}	δεδομένο	8
Κυκλικά σύρματα ground	N_{cir}	δεδομένο	4
Ακτίνες κυκλικών δακτυλίων	r_k	$k R_g/N_{cir}$	0.09375, 0.1875, 0.28125, 0.375 m
Segments ανά σπείρα	N_s	δεδομένο	17
Σύνολο segments έλικας	N_{seg}	$N \cdot N_s$	170

Πίνακας 3.1: Γεωμετρικές παράμετροι της ελικοειδούς κεραίας και του spider-web ground.

3.3 Μεταβολή του $|Z_{in}|$ και επιλογή Z_0 [Ερώτημα (α)]

3.3.1 Μοντελοποίηση στο NEC και παραγόμενα αρχεία

Η αριθμητική ανάλυση της ελικοειδούς κεραίας υλοποιήθηκε με αυτοματοποιημένη παραγωγή αρχείων εισόδου .nec μέσω MATLAB, ώστε να εξασφαλιστεί ότι η γεωμετρία (έλικα, τροφοδοσία και γρουντ) ορίζεται με πλήρη συνέπεια ως προς το μήκος κύματος σχεδίασης $\lambda = c_0/f_0$, με $f_0 = 400$ MHz (άρα $\lambda = 0.75$ m).

Η έλικα σχεδιάστηκε για λειτουργία σε axial mode, επιλέγοντας περιφέρεια $C \simeq \lambda$ και βήμα $S = \lambda/4$, ώστε η ακτινοβολία να αναπτύσσεται κατά μήκος του άξονά της και να επιτυγχάνονται τα χαρακτηριστικά ευρείας ζώνης που αναμένονται για τέτοιου τύπου διάταξη.

Η γεωμετρία της έλικας κατασκευάζεται παραμετρικά από τις σχέσεις

$$x(t) = R \cos t, \quad y(t) = R \sin t, \quad z(t) = Gap + \frac{S}{2\pi} t, \quad t \in [0, 2\pi N],$$

όπου $N = 10$ ο αριθμός σπειρών, $R = D/2$ η ακτίνα της έλικας και $D = C/\pi$ η διάμετρος που αντιστοιχεί στην επιλεγμένη περιφέρεια.

Το κάτω άκρο της έλικας τοποθετείται στο $z = Gap$ ώστε η διέγερση να μην εφαρμόζεται απευθείας πάνω στο επίπεδο γείωσης, αλλά να πραγματοποιείται μέσω σαφώς ορισμένου κατακόρυφου αγωγού τροφοδοσίας. Η επιλογή διαμέτρου σύρματος $d = \lambda/100$ (και ακτίνας $a = d/2$) διατηρεί την προσομοίωση εντός των ορίων εγκυρότητας της MoM, χωρίς να δημιουργεί αριθμητικά προβλήματα.

Κρίσιμο στοιχείο της διάταξης αποτελεί το ground plane, το οποίο δεν θεωρείται ιδανικό άπειρο επίπεδο, αλλά προσεγγίζεται ως πεπερασμένος δίσκος ακτίνας $R_g = \lambda/2$. Ο δίσκος υλοποιείται ως πλέγμα τύπου spider-web με 8 ακτινικούς αγωγούς και 4 ομόκεντρους κυκλικούς δακτυλίους, σχηματίζοντας δομή που προσεγγίζει ικανοποιητικά μια συμπαγή μεταλλική επιφάνεια στη συχνότητα σχεδίασης.

Οι ακτινικοί αγωγοί εκκινούν από το κεντρικό σημείο $(0, 0, 0)$ και καταλήγουν στην περιφέρεια του δίσκου, ενώ οι κυκλικοί δακτυλίοι συνδέουν διαδοχικά τους ακτινικούς αγωγούς σε ίσες ακτίνες. Για την αποφυγή σφαλμάτων τύπου crossing wires, οι κόμβοι τομής υπολογίζονται ρητά από το script και χρησιμοποιούνται ως κοινά άκρα συρμάτων.

Στην κατεύθυνση $\phi = 0$ προβλέπεται ειδικός κόμβος στην ακτίνα R , ίση με την ακτίνα της έλικας, ώστε το σημείο τροφοδοσίας να συμπίπτει ακριβώς με κόμβο του ground. Με αυτόν τον τρόπο, το σύρμα τροφοδοσίας συνδέεται σε πραγματικό σημείο τομής του πλέγματος γείωσης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εκφώνησης.

Η τροφοδοσία υλοποιείται ως κατακόρυφος αγωγός (feed wire) με one segment, μήκους $Gap = \lambda/40$, ο οποίος εκτείνεται από το σημείο $(R, 0, 0)$ έως $(R, 0, Gap)$. Το πρώτο τμήμα της έλικας ξεκινά στο $z = Gap$ και διεγίρεται από την πηγή τάσης που τοποθετείται στο μοναδικό segment του feed (tag 100, segment 1). Η διάταξη αυτή εξασφαλίζει καθαρή διέγερση και αποφυγή τεχνητών ασυνεχειών.

Ως προς την κατάτμηση (segmentation), επιλέχθηκαν 17 τμήματα ανά στροφή, δηλαδή συνολικά 170 segments για τις 10 στροφές. Το μήκος κάθε τμήματος είναι περίπου $\Delta L \simeq 0.044$

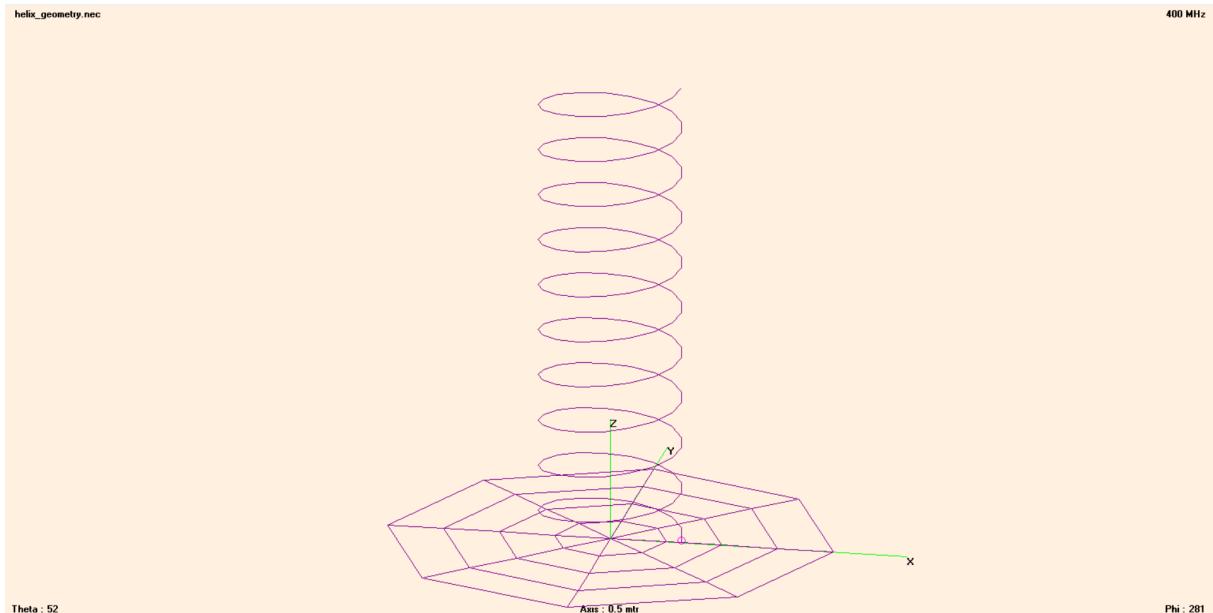
m, τιμή μικρότερη από $\lambda/10$ στη συχνότητα σχεδίασης, γεγονός που εξασφαλίζει αριθμητική σύγκλιση και ομαλή αναπαράσταση της καμπυλότητας της έλικας. Αντίστοιχη λογική ακολουθείται και για την κατάτμηση του ground plane.

Ο κώδικας παράγει δύο αρχεία .nec με διακριτό ρόλο. Το `helix_geometry.nec` είναι μονο-συχνοτικό, με κάρτα FR στα 400 MHz, και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της γεωμετρίας και της σωστής διέγερσης στο 4nec2. Αντίθετα, το `helix_sweep.nec` περιλαμβάνει σάρωση συχνότητας από 120 έως 800 MHz με βήμα 5 MHz, δηλαδή

$$N_f = \frac{800 - 120}{5} + 1 = 137$$

σημεία, ώστε να εξαχθεί η μεταβολή του μέτρου $|Z_{in}(f)|$ στο εύρος $0.3f_0$ έως $2f_0$. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά αξιολογείται στη συνέχεια η προσαρμογή της κεραίας και επιλέγεται κατάλληλη χαρακτηριστική αντίσταση γραμμής τροφοδοσίας Z_0 .

Παρακάτω παρουσιάζεται το σχήμα της γεωμετρίας της κεραίας όπως προκύπτει από το 4nec2 και πιο συγκεκριμένα το `helix_geometry.nec`.



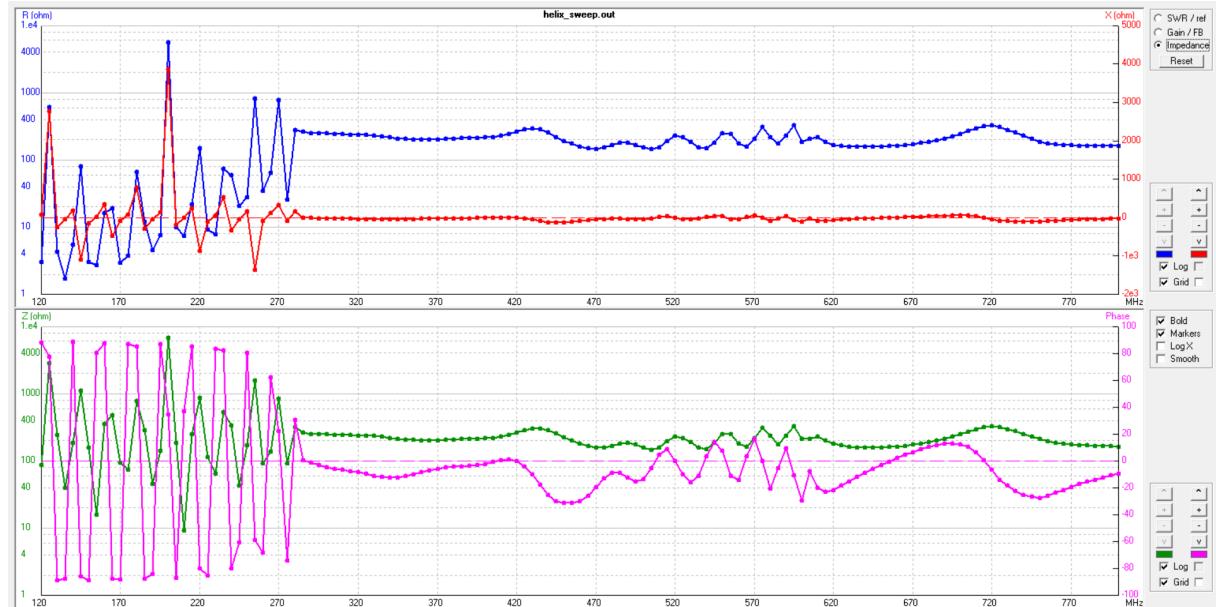
Σχήμα 3.1: Γεωμετρία ελικοειδούς κεραίας με πλέγμα γείωσης τύπου σπιδερ-ωεβ, όπως μοντελοποιήθηκε στο 4nec2 για $f_0 = 400$ MHz.

3.3.2 Αποτελέσματα και Ανάλυση Ερωτήματος (α)

Για την αξιολόγηση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς της ελικοειδούς κεραίας πραγματοποιήθηκε σάρωση συχνοτήτων στο εύρος 120–800 MHz, το οποίο αντιστοιχεί προσεγγιστικά στο διάστημα $0.3f_0$ έως $2f_0$. Η ανάλυση βασίστηκε στην εξαγωγή της σύνθετης αντίστασης εισόδου $Z_{in}(f)$ και του λόγου στασίμων κυμάτων (SWR) για χαρακτηριστική αντίσταση γραμμής $Z_0 = 50 \Omega$.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η μεταβολή της πραγματικής και φανταστικής συνιστώσας της αντίστασης εισόδου στο σύνολο του εξεταζόμενου φάσματος. Στις χαμηλές συχνότητες, κάτω περίπου από τα 270 MHz, παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις τόσο στο πραγματικό όσο και στο άρεγο μέρος της αντίστασης. Η συμπεριφορά αυτή υποδηλώνει ότι η κεραία δεν έχει ακόμη εισέλθει σε καθεστώς αξονικής λειτουργίας και η γεωμετρία της έλικας είναι ηλεκτρικά μικρή ως προς το μήκος κύματος.

Με την αύξηση της συχνότητας και ειδικότερα πάνω από τα 300 MHz, η αντίσταση εισόδου αποκτά σαφώς πιο ομαλή μορφή. Η πραγματική συνιστώσα σταθεροποιείται σε τιμές της τάξης των $120\text{--}180 \Omega$, ενώ το φανταστικό μέρος παραμένει περιορισμένο και μεταβάλλεται ήπια γύρω από το μηδέν. Στην περιοχή της κεντρικής συχνότητας σχεδίασης $f_0 = 400$ MHz, η σύνθετη αντίσταση εμφανίζει σχεδόν καθαρά ωμική συμπεριφορά, γεγονός που είναι σύμφωνο με τη θεωρία της ελικοειδούς κεραίας σε αξονικό ρυθμό, όπου η είσοδος κυριαρχείται από τη γεωμετρία της έλικας και όχι από φαινόμενα συντονισμού.

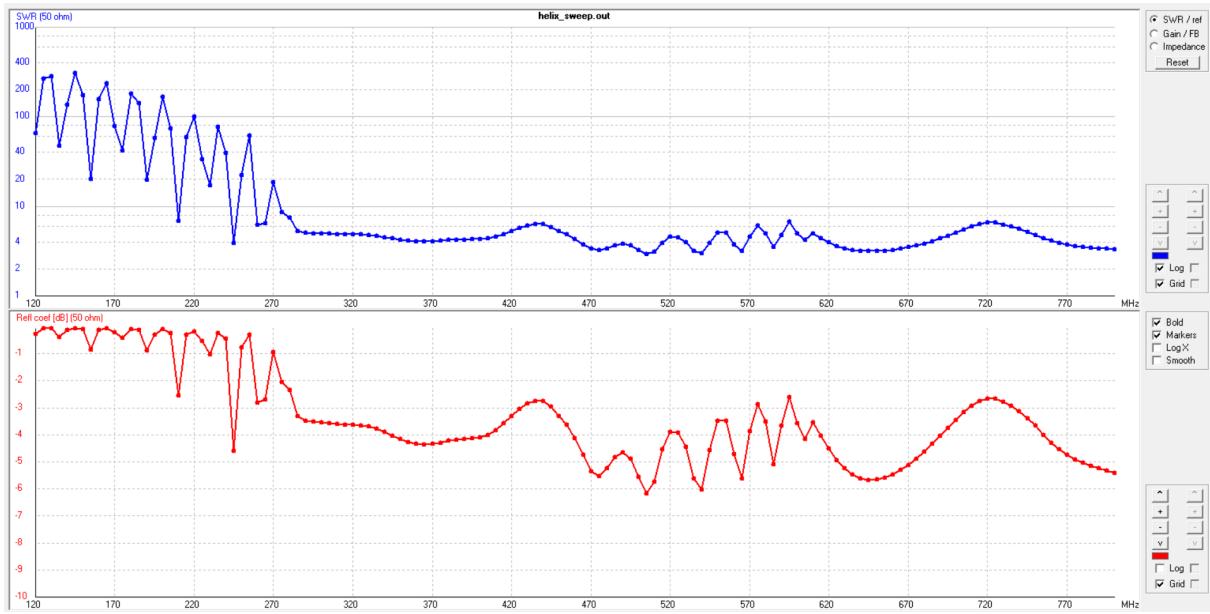


Σχήμα 3.2: Μεταβολή της σύνθετης αντίστασης εισόδου Z_{in} της ελικοειδούς κεραίας στο εύρος 120–800 MHz.

Η συμπεριφορά αυτή αντικατοπτρίζεται άμεσα και στο διάγραμμα του λόγου στασίμων κυμάτων, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3. Στο χαμηλό όχρο του φάσματος ο λόγος SWR λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές, γεγονός που επιβεβαιώνει τη σημαντική ασυμφωνία με γραμμή τροφοδοσίας 50Ω και την κακή προσαρμογή της κεραίας εκτός του καθεστώτος αξονικής λειτουργίας.

Αντίθετα, στο εύρος περίπου 300–770 MHz, ο λόγος SWR μειώνεται σημαντικά και παρα-

μένει σε αποδεκτά επίπεδα, της τάξης 3–6, ενώ ο συντελεστής ανάχλασης κινείται στα -4 dB με -6 dB, με σχετικά ομαλή μεταβολή. Η καλύτερη συμπεριφορά παρατηρείται γύρω από τα 400 MHz, όπου η κεραία παρουσιάζει την πιο σταθερή προσαρμογή και τη μικρότερη ανάχλαση ισχύος. Η εικόνα αυτή επιβεβαιώνει ότι, παρότι η ελικοειδής κεραία δεν είναι αυστηρά προσαρμοσμένη στα 50Ω , εμφανίζει σαφώς ευρυζωνική συμπεριφορά στο εύρος σχεδίασής της.



Σχήμα 3.3: Λόγος στασίμων κυμάτων (SWR) της ελικοειδούς κεραίας για $Z_0 = 50\Omega$ στο εύρος 120–800 MHz.

Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ελικοειδής κεραία εμφανίζει σαφή μετάβαση από μη αποδοτική λειτουργία σε καθεστώς αξονικής ακτινοβολίας καθώς η συχνότητα προσεγγίζει και υπερβαίνει την κεντρική τιμή σχεδίασης. Η σταθεροποίηση της σύνθετης αντίστασης και η αντίστοιχη βελτίωση του SWR αποτελούν σαφή ένδειξη ότι η γεωμετρία που επιλέχθηκε οδηγεί σε αξιόπιστη και ευρυζωνική συμπεριφορά, σύμφωνη με τη θεωρία και τις απαιτήσεις της εκφώνησης.

3.3.3 Σχολιασμός και Προτάσεις Ιδανικότερης Προσαρμογής

Η ανάλυση της σύνθετης αντίστασης εισόδου και του λόγου στασίμων κυμάτων κατέδειξε ότι η ελικοειδής κεραία, αν και παρουσιάζει ευρυζωνική συμπεριφορά, δεν είναι βέλτιστα προσαρμοσμένη σε γραμμή χαρακτηριστικής αντίστασης 50Ω στο σύνολο του φάσματος λειτουργίας της. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς η αντίσταση εισόδου της ελικοειδούς κεραίας σε αξονικό ρυθμό καθορίζεται κυρίως από τη γεωμετρία της έλικας και όχι από συνθήκες συντονισμού.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτει ότι, στην περιοχή της κεντρικής συχνότητας σχεδίασης $f_0 = 400$ MHz, η πραγματική συνιστώσα της αντίστασης εισόδου σταθεροποιείται κοντά στην τιμή $R_{in} \approx 210\Omega$, ενώ το άεργο μέρος είναι περιορισμένο. Η

συμπεριφορά αυτή υποδεικνύει ότι η κεραία λειτουργεί στο επιθυμητό καθεστώς αξονικής ακτινοβολίας και ότι η κύρια απόκλιση από την ιδανική προσαρμογή οφείλεται στη διαφορά μεταξύ R_{in} και της τυπικής τιμής των 50Ω .

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, μια καταλληλότερη επιλογή χαρακτηριστικής αντίστασης γραμμής τροφοδοσίας θα ήταν $Z_0 \approx 210 \Omega$, τιμή που προσεγγίζει άμεσα την αντίσταση εισόδου της κεραίας στην περιοχή λειτουργίας της. Υπό αυτή τη συνθήκη, ο συντελεστής ανάκλασης στην κεντρική συχνότητα θα μειωνόταν σημαντικά, οδηγώντας σε λόγο SWR πολύ κοντά στη μονάδα και συνεπώς σε σχεδόν ιδανική μεταφορά ισχύος.

Η παρατήρηση αυτή δεν συνιστά ένδειξη κακής σχεδίασης της κεραίας, αλλά αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα των ελικοειδών κεραιών αξονικής ακτινοβολίας, οι οποίες τυπικά παρουσιάζουν υψηλότερη αντίσταση εισόδου σε σχέση με τις συνήθεις γραμμές μεταφοράς. Στην πράξη, η προσαρμογή σε 50Ω θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω κατάλληλου δικτύου προσαρμογής (π.χ. μετασχηματιστή αντίστασης ή τμηματικής γραμμής), χωρίς να απαιτείται μεταβολή της βασικής γεωμετρίας της κεραίας.

Συμπερασματικά, η επιλογή γραμμής τροφοδοσίας με χαρακτηριστική αντίσταση κοντά στα 210Ω αποτελεί την ιδανικότερη λύση από ηλεκτρομαγνητικής άποψης, εξασφαλίζοντας ελάχιστες ανακλάσεις και μεγιστοποίηση της αποδιδόμενης ισχύος, ενώ η χρήση 50Ω παραμένει μια πρακτική, αν και μη βέλτιστη, επιλογή για λόγους συμβατότητας με τυπικά συστήματα RF.

3.4 Ευρυζωνικότητα στην τιμή χαρακτηριστικής αντίστασης $Z_0 = 210 \Omega$

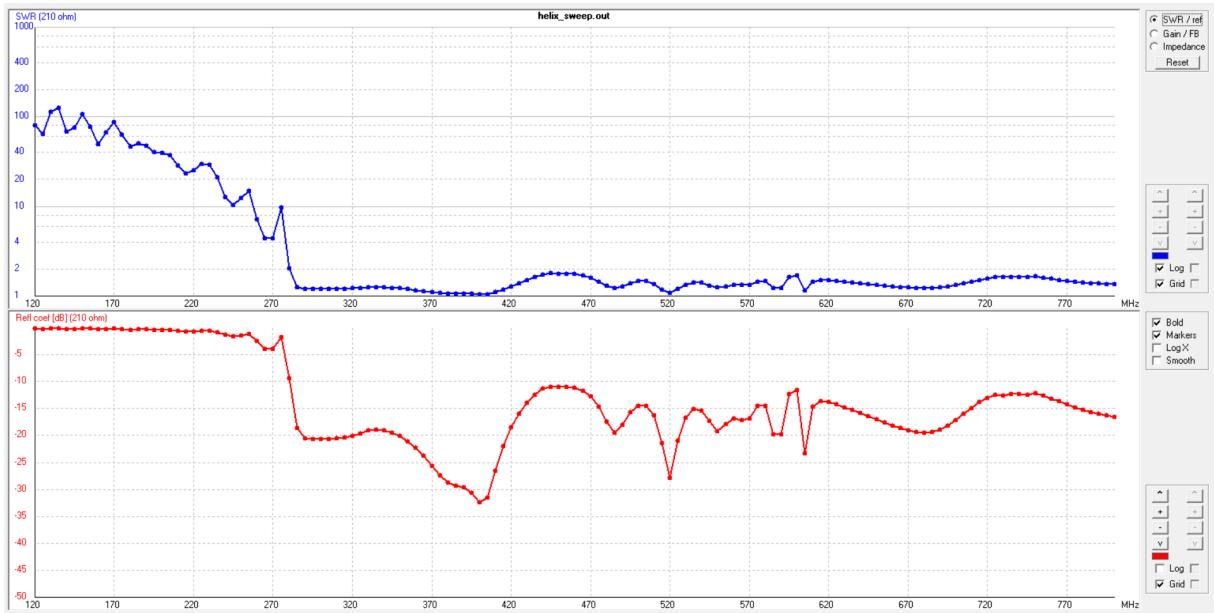
Στο παρόν ερώτημα εξετάζεται η συμπεριφορά της ελικοειδούς κεραίας ως προς τον λόγο στασίμων κυμάτων (SWR) και τον συντελεστή ανάκλασης, όταν η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής τροφοδοσίας επιλέγεται ίση με $Z_0 = 210 \Omega$. Η τιμή αυτή προκύπτει από τη μελέτη της σύνθετης αντίστασης εισόδου και στοχεύει στη βελτιστοποίηση της προσαρμογής στην περιοχή αξονικής ακτινοβολίας.

3.4.1 Αποτελέσματα και Ανάλυση Ερωτήματος (β)

Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR)

Το διάγραμμα του SWR, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4, δείχνει σαφή διαφοροποίηση της συμπεριφοράς της κεραίας σε σχέση με τη χαμηλή περιοχή συχνοτήτων. Για συχνότητες κάτω από περίπου $270\text{--}280 \text{ MHz}$, ο λόγος SWR λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές, γεγονός που υποδηλώνει έντονη κακή προσαρμογή. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς η κεραία δεν έχει εισέλθει ακόμη στο καθεστώς αξονικής λειτουργίας.

Μετά τη μετάβαση αυτή, ο λόγος SWR μειώνεται απότομα και παραμένει σε τιμές πολύ κοντά στη μονάδα σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Συγκεκριμένα, στο διάστημα περίπου 300 έως 800 MHz , παρατηρείται σταθεροποίηση με $1 \leq \text{SWR} \lesssim 1.5$, ένδειξη εξαιρετικής προσαρμογής μεταξύ κεραίας και γραμμής τροφοδοσίας. Η επίπεδη αυτή απόκριση επιβεβαιώνει ότι η ελικοειδής κεραία λειτουργεί ως δομή κυλιόμενου κύματος (*traveling-wave antenna*) στον αξονικό ρυθμό.



Σχήμα 3.4: Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR) για $Z_0 = 210 \Omega$ στο εύρος 120–800 MHz.

Συντελεστής Ανάκλασης

Η ανάλυση του συντελεστή ανάκλασης $|\Gamma|$, σε μορφή dB, παρουσιάζεται στο ίδιο σύνολο αποτελεσμάτων και συμπληρώνει την εικόνα της προσαρμογής. Στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων, ο $|\Gamma|$ βρίσκεται κοντά στο 0 dB, γεγονός που αντιστοιχεί σε σχεδόν πλήρη ανάκλαση ισχύος.

Αντίθετα, μετά την είσοδο της κεραίας στον αξονικό ρυθμό, ο συντελεστής ανάκλασης μειώνεται σημαντικά και διατηρείται κάτω από -10 dB σε μεγάλο τμήμα του φάσματος. Ιδιαίτερα κοντά στη συχνότητα σχεδίασης $f_0 = 400$ MHz, παρατηρούνται πολύ χαμηλές τιμές, με ελάχιστα της τάξης των -30 έως -35 dB, γεγονός που υποδηλώνει σχεδόν ιδανική προσαρμογή.

Σχολιασμός Ευρυζωνικής Κεραίας

Η συνολική συμπεριφορά του SWR και του συντελεστή ανάκλασης αναδεικνύει τον έντονα ευρυζωνικό χαρακτήρα της ελικοειδούς κεραίας σε αξονικό ρυθμό. Η διατήρηση χαμηλών τιμών SWR σε εύρος μεγαλύτερο από μία οκτάδα αποτελεί άμεση συνέπεια του γεγονότος ότι η περιφέρεια της έλικας παραμένει κοντά στο μήκος κύματος ($0.75\lambda \lesssim C \lesssim 1.33\lambda$).

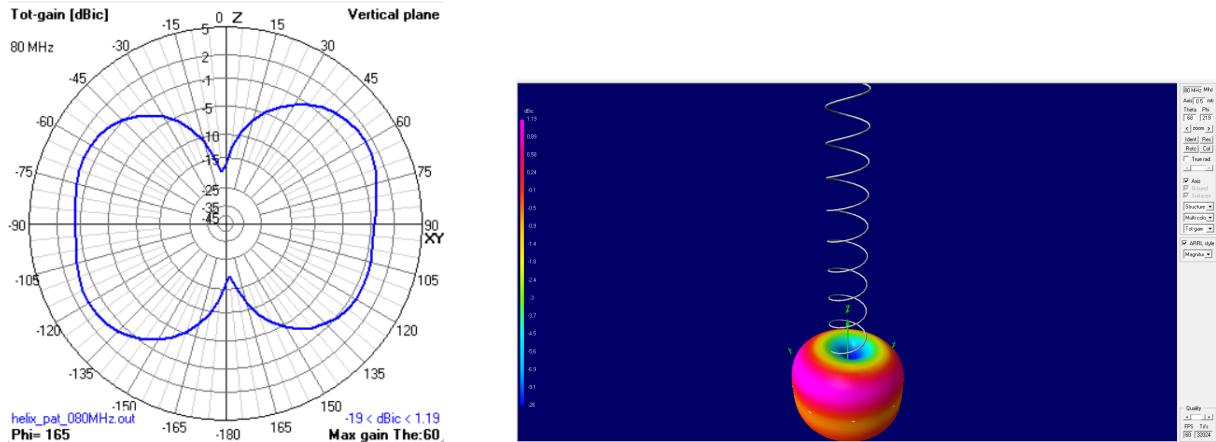
Η σταθερότητα της σύνθετης αντίστασης εισόδου και η απουσία έντονων συντονισμών καθιστούν την κεραία κατάλληλη για λειτουργία σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων, χωρίς την ανάγκη πολύπλοκων κυκλωμάτων προσαρμογής. Η επιλογή χαρακτηριστικής αντίστασης $Z_0 = 210 \Omega$ αποδεικνύεται επομένως ιδιαίτερα αποτελεσματική για τη βέλτιστη εκμετάλλευση των αξονικών χαρακτηριστικών ακτινοβολίας.

3.5 Ακτινοβολούμενη Συμπεριφορά και Εξέλιξη Κέρδους της Ελικοειδούς Κεραίας [Ερώτημα (γ)]

Στην παρούσα ενότητα μελετάται διεξοδικά η μεταβολή των διαγραμμάτων ακτινοβολίας και του κέρδους της ελικοειδούς κεραίας σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, από $0.2f_0$ έως $3f_0$, δηλαδή από 80 MHz έως 1200 MHz. Η ανάλυση βασίζεται τόσο σε τομές κατακόρυφου επιπέδου (vertical plane) όσο και σε τρισδιάστατες απεικονίσεις, οι οποίες επιτρέπουν την πλήρη χωρική κατανόηση της ακτινοβολούμενης ισχύος.

3.5.1 Λειτουργία σε Χαμηλές Συχνότητες: Κανονικός Ρυθμός Ακτινοβολίας

Για τη συχνότητα $f = 0.2f_0 = 80$ MHz, η περιφέρεια της έλικας είναι σημαντικά μικρότερη από το μήκος κύματος ($C \approx 0.2\lambda$). Υπό αυτές τις συνθήκες, η κεραία δεν λειτουργεί σε αξονικό ρυθμό, αλλά συμπεριφέρεται ως ηλεκτρικά μικρή δομή.

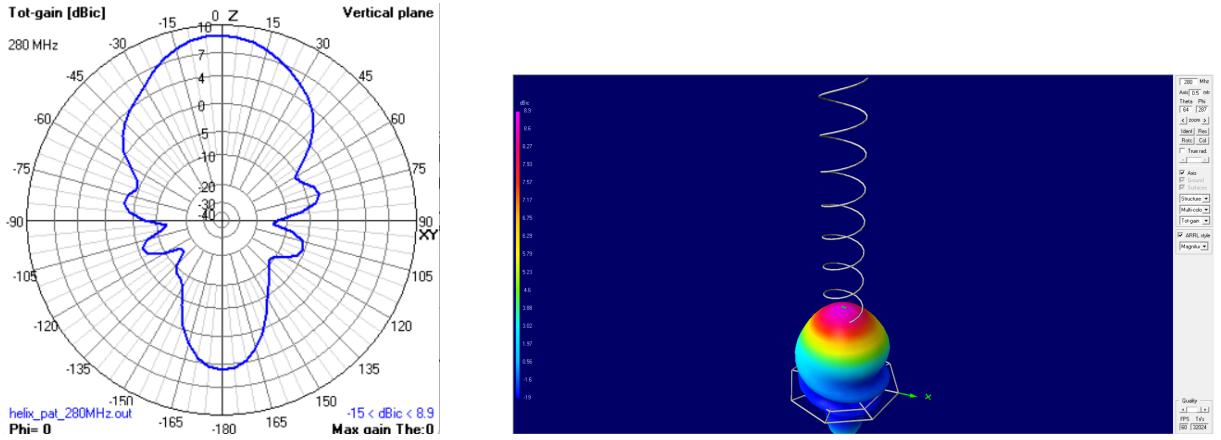


Σχήμα 3.5: Διαγράμματα ακτινοβολίας ελικοειδούς κεραίας στα 80 MHz: κατακόρυφο επίπεδο (αριστερά) και 3D απεικόνιση (δεξιά).

Το κατακόρυφο διάγραμμα παρουσιάζει διλοβική μορφή *doughnut*, με μηδενική ακτινοβολία κατά μήκος του άξονα της έλικας. Η μέγιστη απολαβή εμφανίζεται κοντά στο οριζόντιο επίπεδο ($\theta \approx 90^\circ$) και είναι ιδιαίτερα χαμηλή (περίπου 1.19 dB_i), γεγονός που επιβεβαιώνει τον κανονικό (normal) ρυθμό λειτουργίας.

3.5.2 Μεταβατική Περιοχή και Προσέγγιση Αξονικού Ρυθμού

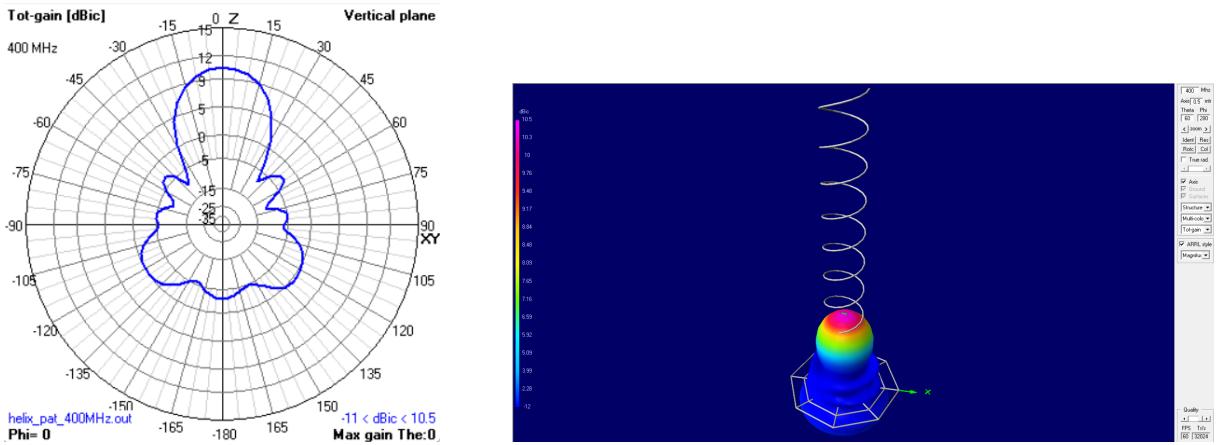
Καθώς η συχνότητα αυξάνεται και πλησιάζει την περιοχή $0.7f_0 = 280$ MHz, η περιφέρεια της έλικας γίνεται συγκρίσιμη με το μήκος κύματος, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται τα πρώτα χαρακτηριστικά αξονικής ακτινοβολίας.



Σχήμα 3.6: Διαγράμματα ακτινοβολίας στα 280 MHz: διαμόρφωση κύριου λοβού προς τον άξονα $+z$.

Ο κύριος λοβός αρχίζει να συγκεντρώνεται κατά μήκος του άξονα της έλικας, ενώ το κέρδος αυξάνεται σημαντικά, φτάνοντας περίπου τα 8.9 dBi. Η τρισδιάστατη απεικόνιση αποκαλύπτει την αρχική διαμόρφωση αξονικής δέσμης, με περιορισμένη ακόμη καταστολή δευτερευόντων λοβών.

Στην κεντρική συχνότητα σχεδίασης $f_0 = 400$ MHz, η λειτουργία της κεραίας εισέρχεται πλήρως στον αξονικό ρυθμό.

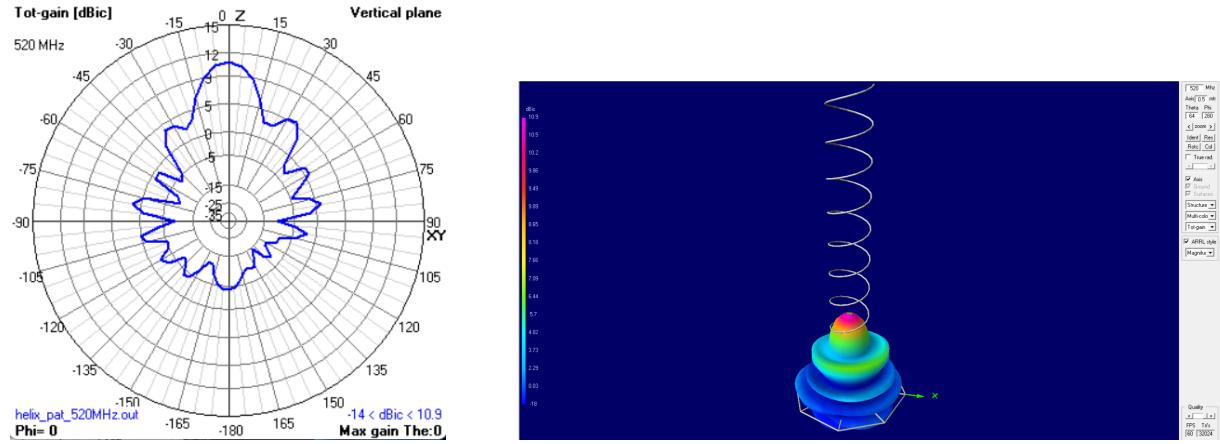


Σχήμα 3.7: Ακτινοβολία ελικοειδούς κεραίας στα 400 MHz: πλήρης αξονικός ρυθμός λειτουργίας.

Η ακτινοβολία κατευθύνεται σαφώς προς την κατεύθυνση $+z$, με μέγιστο κέρδος περίπου 10.5 dBi. Η παρουσία του *spider-web ground plane* περιορίζει αποτελεσματικά την οπίσθια ακτινοβολία, εξασφαλίζοντας υψηλό λόγο Front-to-Back.

3.5.3 Μέγιστη Απόδοση και Συμπεριφορά σε Υψηλές Συχνότητες

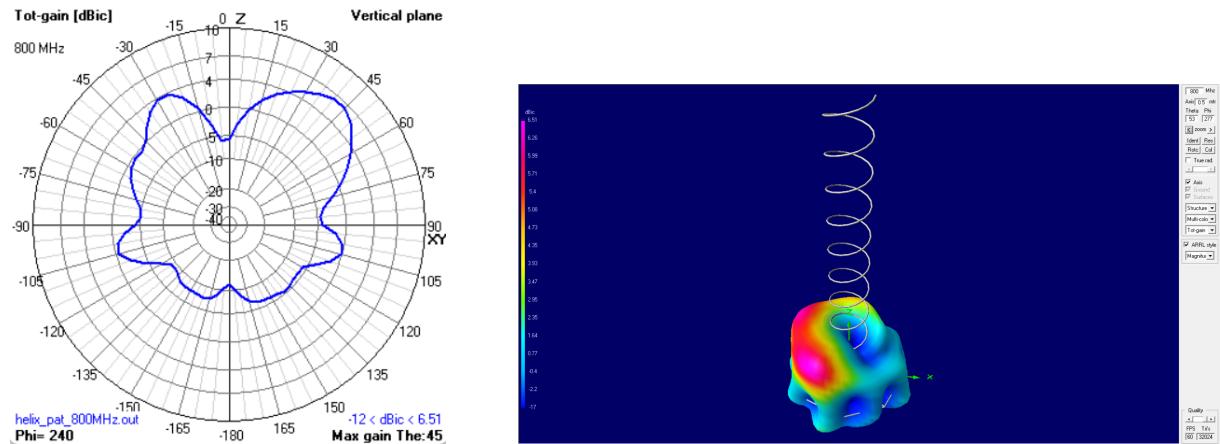
Στη συχνότητα $f = 1.3f_0 = 520 MHz, η κεραία παρουσιάζει τη μέγιστη κατευθυντικότητα.$



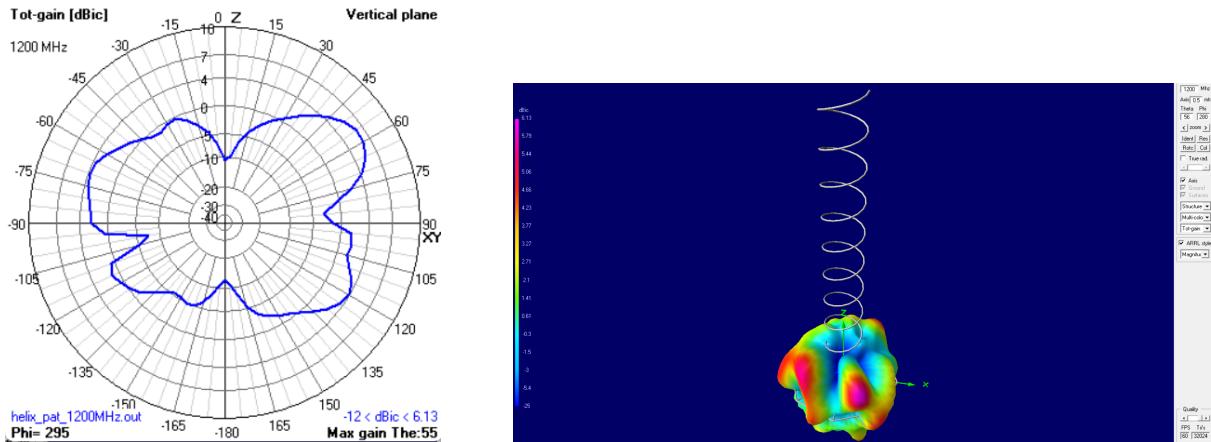
Σχήμα 3.8: Διαγράμματα ακτινοβολίας στα 520 MHz: μέγιστη απόδοση και στένωση κύριου λοβού.

Το κέρδος φτάνει την υψηλότερη τιμή του, περίπου 10.9 dB_i, ενώ παρατηρείται σημαντική στένωση του κύριου λοβού κατά μήκος του άξονα, γεγονός που υποδηλώνει αυξημένη κατευθυντικότητα και αποδοτική αξονική ακτινοβολία.

Σε ακόμη υψηλότερες συχνότητες (800 MHz και 1200 MHz), η κεραία αρχίζει να αποκλίνει από τον ιδανικό αξονικό ρυθμό.



Σχήμα 3.9: Ακτινοβολία στα 800 MHz: εμφάνιση δευτερεύοντων λοβών και μείωση αξονικότητας.



Σχήμα 3.10: Ακτινοβολία στα 1200 MHz: πολυλοιπική συμπεριφορά και απώλεια αξονικού χαρακτήρα.

Η κατανομή της ακτινοβολίας γίνεται πολυλοιπική, με εμφανή μείωση του κύριου λοβού και αύξηση της εκπομπής σε πλάγιες κατευθύνσεις. Το κέρδος περιορίζεται στα 6.51 dBi στα 800 MHz και περαιτέρω στα 6.13 dBi στα 1200 MHz, υποδηλώνοντας ότι η κεραία λειτουργεί πλέον εκτός της βέλτιστης περιοχής αξονικού ρυθμού.

3.5.4 Συνολική Αξιολόγηση

Από τη συνδυαστική ανάλυση των διαγραμμάτων προκύπτει ότι η ελικοειδής κεραία παρουσιάζει βέλτιστη συμπεριφορά στο εύρος $0.8f_0$ έως $1.3f_0$ (320–520 MHz), όπου συνδυάζονται: σταθερή αξονική ακτινοβολία, υψηλό κέρδος και αποτελεσματική καταστολή δευτερευόντων λοβών. Εκτός του εύρους αυτού, η απόδοση περιορίζεται είτε λόγω ηλεκτρικά μικρής γεωμετρίας (χαμηλές συχνότητες), είτε λόγω πολυλοιπικής ακτινοβολίας (υψηλές συχνότητες). Ο αντίστοιχος κώδικας για το ερώτημα (γ) είναι στο αρχείο MATLAB, `helix_ff.m` και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται αντιστοίχως στα αρχεία:

Ως αποτέλεσμα, παράγονται έξι αρχεία εισόδου της μορφής:

- `helix_pat_080MHz.nec` (για $f = 80$ MHz = $0.2f_0$),
- `helix_pat_280MHz.nec` (για $f = 280$ MHz = $0.7f_0$),
- `helix_pat_400MHz.nec` (για $f = 400$ MHz = f_0),
- `helix_pat_520MHz.nec` (για $f = 520$ MHz = $1.3f_0$),
- `helix_pat_800MHz.nec` (για $f = 800$ MHz = $2f_0$),
- `helix_pat_1200MHz.nec` (για $f = 1200$ MHz = $3f_0$).

Κεφάλαιο 4

Ανάλυση Αναδιπλωμένου Διπόλου

4.1 Παρουσίαση Προβλήματος και Δεδομένα Κεραίας

Στο τρίτο μέρος της εργασίας εξετάζεται ένα αναδιπλωμένο δίπολο μήκους $\lambda/2$ (folded dipole), το οποίο αποτελεί κλασική διάταξη κεραίας με αυξημένη αντίσταση εισόδου σε σχέση με το απλό δίπολο και χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές ζεύξης/προσαρμογής και σε ευρυζωνικές υλοποιήσεις.

Σύμφωνα με την εκφώνηση, η διάμετρος των αγωγών τίθεται $d = \lambda/200$, ενώ εξετάζονται τρεις διαφορετικές τιμές απόστασης μεταξύ των δύο παράλληλων αγωγών: $s = \lambda/100$, $s = \lambda/20$ και $s = \lambda/4$. Η σύγκριση των τριών περιπτώσεων επιτρέπει να αξιολογηθεί η επίδραση της σύζευξης μεταξύ των σκελών στο $|Z_{in}|$ και στην προσαρμογή.

Για το εύρος επωνύμου $\Delta-\Lambda$, η κεντρική συχνότητα ορίζεται $f_0 = 60$ MHz, άρα το αντίστοιχο μήκος κύματος είναι $\lambda = c_0/f_0 = 5$ m. Η ανάλυση της σύνθετης αντίστασης εισόδου ζητείται στο εύρος $0.5f_0$ έως $1.5f_0$, δηλαδή από 30 έως 90 MHz.

Η μοντελοποίηση πραγματοποιείται στο NEC/4nec2, με προγραμματιστική παραγωγή των αρχείων εισόδου .nec μέσω MATLAB, ώστε να διασφαλίζεται ακριβής και επαναλήψιμη περιγραφή της γεωμετρίας για κάθε τιμή του s .

4.2 Γεωμετρικός Σχεδιασμός και Παράμετροι Μοντέλου

Για το αναδιπλωμένο δίπολο χρησιμοποιούνται δύο παράλληλοι αγωγοί ίδιου μήκους $\lambda/2$, οι οποίοι ενώνονται ηλεκτρικά στα δύο άκρα τους (πάνω και κάτω) με shorting τμήματα, σχηματίζοντας κλειστό ορθογώνιο βρόχο. Η διέγερση εφαρμόζεται στο ένα από τα δύο σκέλη (driven leg), στο κεντρικό του τμήμα, ώστε να εξασφαλίζεται συμμετρική τροφοδοσία.

Η γεωμετρία ορίζεται έτσι ώστε οι δύο κατακόρυφοι αγωγοί να βρίσκονται στον άξονα z και να απέχουν μεταξύ τους κατά s στον άξονα x (στις θέσεις $x = \pm s/2$). Το συνολικό μήκος κάθε σκέλους είναι $L = \lambda/2$ με άκρα στα $z = \pm L/2$. Τα δύο άκρα βραχυκυλώνονται με δύο οριζόντια σύρματα (πάνω και κάτω), τα οποία υλοποιούνται με ένα μόνο segment ώστε να αποφεύγονται περιττές αριθμητικές αστάθειες.

4.2.1 Συνοπτικός Πίνακας Διαστάσεων

Παράμετρος	Σύμβολο	Σχέση/Ορισμός	Τιμή (για $f_0 = 60$ MHz)
Κεντρική συχνότητα	f_0	—	60 MHz
Μήκος κύματος	λ	c_0/f_0	5 m
Μήκος διπόλου (ανά σκέλος)	L	$\lambda/2$	2.5 m
Διάμετρος σύρματος	d	$\lambda/200$	0.025 m
Ακτίνα σύρματος (για NEC)	a	$d/2$	0.0125 m
Απόσταση σκελών (περίπτωση 1)	s_1	$\lambda/100$	0.05 m
Απόσταση σκελών (περίπτωση 2)	s_2	$\lambda/20$	0.25 m
Απόσταση σκελών (περίπτωση 3)	s_3	$\lambda/4$	1.25 m
Segments ανά σκέλος	N_{seg}	επιλεγμένο (περιττό)	41
Feed segment	N_f	$(N_{\text{seg}} + 1)/2$	21
Εύρος σάρωσης	—	$0.5f_0$ έως $1.5f_0$	30–90 MHz
Βήμα σάρωσης	Δf	επιλογή χρήστη	0.5 MHz

Πίνακας 4.1: Γεωμετρικές παράμετροι αναδιπλωμένου διπόλου για τις τρεις τιμές απόστασης s .

4.3 Ανάλυση $|Z_{\text{in}}|$ και Επιλογή Z_0 [Ερώτημα (α)]

4.3.1 Μοντελοποίηση στο NEC και Παραγόμενα Αρχεία

Η παραγωγή των αρχείων .nec πραγματοποιείται αυτόματα μέσω MATLAB κώδικα, ο οποίος δημιουργεί τρεις παραλλαγές της ίδιας γεωμετρίας, μία για κάθε απόσταση s . Κάθε αρχείο περιλαμβάνει δύο παράλληλα σκέλη μήκους $L = \lambda/2$ και δύο βραχυκυλωτικές συνδέσεις στα άκρα, ώστε να σχηματίζεται το αναδιπλωμένο δίπολο ως κλειστή δομή.

Για την εξασφάλιση σωστής τοποθέτησης της διέγερσης, το κάθε σκέλος διαχριτοποιείται σε περιττό πλήθος τμημάτων (segments), ώστε να υπάρχει ακριβώς κεντρικό τμήμα. Στο βασικό μοντέλο επιλέγονται 41 segments ανά σκέλος, όφει η τροφοδοσία τοποθετείται στο segment 21 του driven leg (tag 1).

Η σάρωση συχνότητας υλοποιείται από $0.5f_0$ έως $1.5f_0$ (30–90 MHz) με βήμα 0.5 MHz, ώστε να εξαχθεί η $|Z_{\text{in}}(f)|$ και να αξιολογηθεί η προσαρμογή κοντά στη συχνότητα σχεδίασης.

Παράγονται τρία αρχεία από τον κώδικα MATLAB folded_dipole.m:

- `folded_dipole_s_lam100.nec` (για $s = \lambda/100$)
- `folded_dipole_s_lam20.nec` (για $s = \lambda/20$)
- `folded_dipole_s_lam4.nec` (για $s = \lambda/4$)

Κάθε αρχείο περιλαμβάνει κάρτα FR για το frequency sweep και κάρτα EX που εφαρμόζει πηγή τάσης στο driven leg (tag 1) στο κεντρικό segment.

Στρατηγική κατάτμησης και αριθμητική ευστάθεια: επειδή στις μικρές απόστασεις s οι δύο παράλληλοι αγωγοί βρίσκονται ισχυρά συζευγμένοι, η επιλογή των segments

επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια της MoM. Για τον λόγο αυτό υιοθετήθηκε προσεκτική κατάτμηση, ώστε οι ενώσεις (junctions) να υλοποιούνται με συμβατούς κόμβους και να αποφεύγονται ανεπιθύμητες προειδοποιήσεις του NEC σχετικά με δυσμενείς λόγους μήκους/ακτίνας τμήματος.

Στην περίπτωση $s = \lambda/100$ χρησιμοποιήθηκε πυκνή διακριτοποίηση κατά μήκος των δύο κατακόρυφων σκελών (31 τμήματα ανά σκέλος), ενώ τα βραχυκυλωτικά τμήματα στα άκρα ορίστηκαν με ένα μόνο τμήμα, ώστε η γεωμετρία να παραμένει «καυθαρή» στις ενώσεις. Με τις παραπάνω τιμές, το τυπικό μήκος τμήματος είναι $\Delta L \approx L/31 \approx 0.08$ m, δηλαδή περίπου $\lambda/62$, τιμή που είναι σαφώς μικρότερη από το πρακτικό κριτήριο $\lambda/10$ στη μέγιστη συχνότητα (90 MHz).

Για $s = \lambda/20$ διατηρήθηκε η ίδια λογική στα κύρια σκέλη (31 τμήματα), αλλά τα βραχυκυλωτικά τμήματα «έσπασαν» σε 3 τμήματα, ώστε να μοντελοποιείται καλύτερα η σύνδεση μεταξύ των δύο αγωγών όταν το μήκος των οριζόντιων γεφυρώσεων αυξάνεται. Το χαρακτηριστικό μήκος τμήματος στα άκρα είναι $\Delta S \approx s/3 \approx 0.083$ m, δηλαδή περίπου $\lambda/60$.

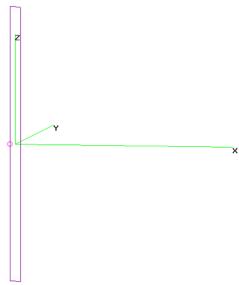
Τέλος, στην πιο αραιή διάταξη $s = \lambda/4$, η αύξηση της απόστασης επιτρέπει μικρότερο πλήθος τμημάτων στα κατακόρυφα σκέλη (15 τμήματα), ενώ τα βραχυκυλωτικά τμήματα ορίστηκαν με 7 τμήματα, ώστε να μην προκύπτουν υπερβολικά μεγάλα segments στις οριζόντιες γέφυρες. Σε αυτή την περίπτωση προκύπτει $\Delta L \approx L/15 \approx 0.16$ m (περίπου $\lambda/31$), ενώ για τα άκρα $\Delta S \approx s/7 \approx 0.17$ m. Ακόμη και έτσι, στη μέγιστη συχνότητα των 90 MHz ισχύει $\lambda_{\min} \approx 3.33$ m, άρα $\lambda_{\min}/10 \approx 0.33$ mκαι το κριτήριο ακρίβειας παραμένει ικανοποιημένο.

Η διέγερση εφαρμόζεται πάντα στο κεντρικό τμήμα του driven leg (tag 1), ώστε να διατηρείται συμμετρία στην τροφοδότηση. Οι δύο υπόλοιπες περιπτώσεις διαφέρουν αποκλειστικά ως προς την απόσταση s , ενώ το συνολικό μήκος του διπόλου παραμένει $L = \lambda/2$.

Στη συνέχεια, από τα αποτελέσματα του 4nec2 εξάγεται η μεταβολή της $|Z_{in}(f)|$ και επιλέγεται μια κατάλληλη χαρακτηριστική αντίσταση Z_0 (τιμή αναφοράς) ώστε να αξιολογηθεί ο συντελεστής ανάλασης $|\Gamma(f)|$ στην ίδια ζώνη. Η επιλογή του Z_0 γίνεται με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του $|\Gamma|$ γύρω από τη συχνότητα f_0 , καθώς και τη γενικότερη σταθερότητα της προσαρμογής στο εύρος 0.5–1.5 f_0 .

Τα αντίστοιχα διαγράμματα με τις κεραίες παρατίθενται παρακάτω:

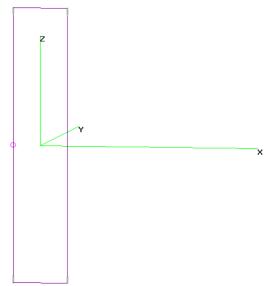
folded_dipole_z_lambda100.out 60 MHz



Theta : 80 Axis : 1 mtr Phi : 280

(α) Αναδιπλωμένο δίπολο με απόσταση αγωγών $s = \lambda/100$

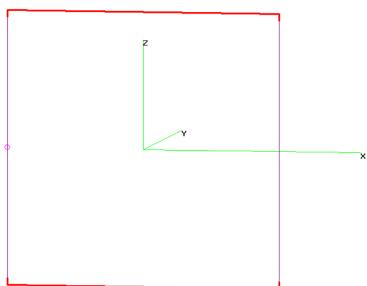
folded_dipole_z_lambda20.out 60 MHz



Theta : 80 Axis : 1 mtr Phi : 280

(β) Αναδιπλωμένο δίπολο με απόσταση αγωγών $s = \lambda/20$

folded_dipole_z_lambda4.out 60 MHz



Theta : 80 Axis : 1 mtr Phi : 280

(γ) Αναδιπλωμένο δίπολο με απόσταση αγωγών $s = \lambda/4$

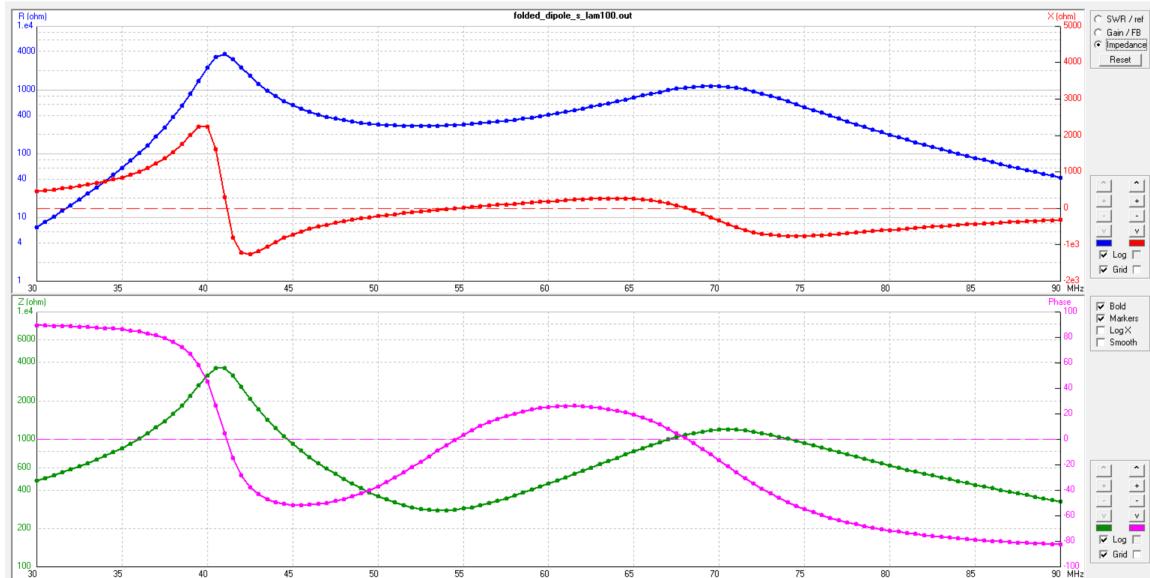
Σχήμα 4.1: Γεωμετρία αναδιπλωμένου διπόλου για τις τρεις εξεταζόμενες αποστάσεις μεταξύ των παράλληλων αγωγών.

4.3.2 Αποτελέσματα και Ερμηνεία της Σύνθετης Αντίστασης

Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζεται η μεταβολή της εισόδου στο εύρος 30–90 MHz για τις τρεις αποστάσεις s . Η συχνότητα συντονισμού εντοπίζεται πρακτικά στα σημεία όπου το φανταστικό μέρος μηδενίζεται, ενώ η τιμή του πραγματικού μέρους στο ίδιο σημείο δίνει μία «φυσική» ένδειξη για πιθανό Z_0 προσαρμογής.

Περίπτωση $s = \lambda/100$ (0.05 m)

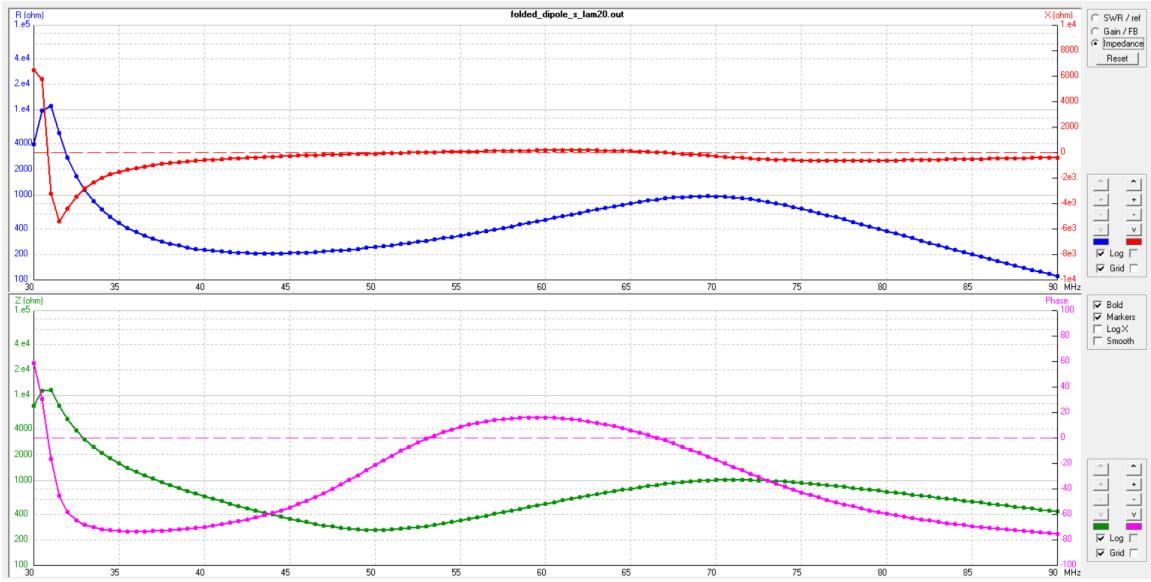
Για τη μικρή απόσταση, η διάταξη λειτουργεί ως ισχυρά συζευγμένο σύστημα αγωγών. Η σάρωση ανέδειξε τρία εμφανή σημεία συντονισμού στα 41 MHz, 55 MHz και 68 MHz. Από αυτά, το σημείο στα 55 MHz είναι το πιο καθαρό ως προς την εκτίμηση προσαρμογής, με πραγματικό μέρος περίπου 285 Ω, γεγονός που υποδεικνύει γραμμή τροφοδοσίας της τάξης των 300 Ω ως ρεαλιστική επιλογή αναφοράς γύρω από αυτό το σημείο. Στα άλλα δύο 41 MHz έχουμε περίπου 3600 Ω και στο 68 MHz, 1081 Ω πραγματικό μέρος αντίστασης εισόδου (R) με αποτέλεσμα να είναι η προσαρμογή αδύνατη.



Σχήμα 4.2: Αναδιπλωμένο δίπολο: $Z_{in}(f)$ για $s = \lambda/100$ στο εύρος 30–90 MHz.

Περίπτωση $s = \lambda/20$ (0.25 m)

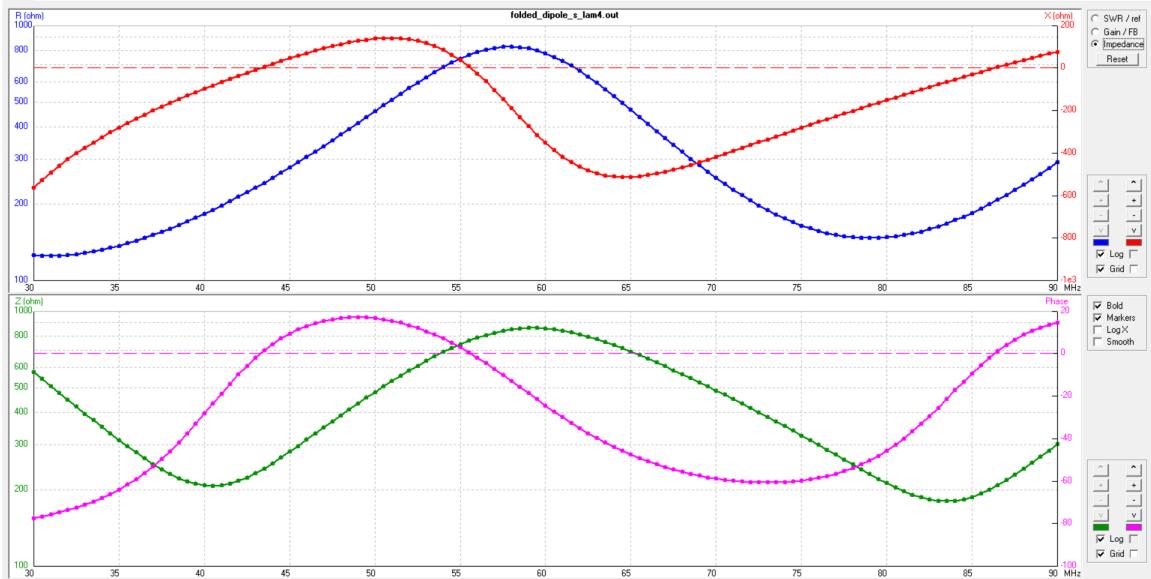
Με την αύξηση της απόστασης, ο λόγος μετασχηματισμού και η ισορροπία μεταξύ συμπεριφοράς κεραίας και γραμμής γίνεται πιο εμφανής. Παρατηρούνται δύο κύρια σημεία συντονισμού στα 66 MHz και 52.5 MHz. Κοντά στα 52.5 MHz, το πραγματικό μέρος είναι περίπου 281 Ω, τιμή που ταιριάζει με πρακτική προσαρμογή σε 280–300 Ω. Αντίθετα, στο χαμηλότερο σημείο (66 MHz) η αντίσταση ανεβαίνει πολύ υψηλότερα (περίπου 854 Ω), κάτι που σπρώχνει την απαίτηση Z_0 προς μη τυπικές τιμές, αν επιλεγεί ως βασικό σημείο λειτουργίας.



Σχήμα 4.3: Αναδιπλωμένο δίπολο: $Z_{in}(f)$ για $s = \lambda/20$ στο εύρος 30–90 MHz.

Περίπτωση $s = \lambda/4$ (1.25 m)

Στη μεγάλη απόσταση, οι δύο κατακόρυφοι αγωγοί παύουν να συνεργάζονται ως χλασικό αναδιπλωμένο δίπολο και η είσοδος αποκτά έντονα συχνοεξαρτώμενο χαρακτήρα. Εντοπίζονται τρία σημεία συντονισμού στα 43.6 MHz, 65.5 MHz και 86.5 MHz, με αντίστοιχες ενδιεικτικές τιμές πραγματικού μέρους 241Ω , 767Ω και 207Ω . Η μεγάλη διασπορά τιμών δείχνει ότι η προσαρμογή δεν κλειδώνει σε μία σταθερή περιοχή, άρα η επιλογή ενός ενιαίου Z_0 για όλο το εύρος είναι λιγότερο αποτελεσματική σε σύγχριση με τις δύο πρώτες περιπτώσεις.



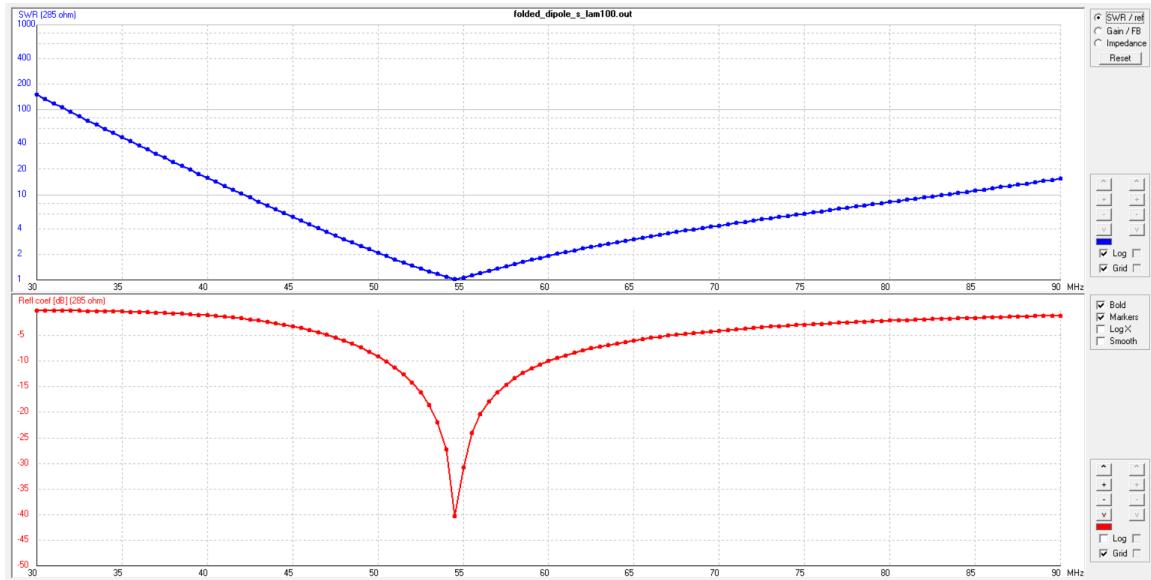
Σχήμα 4.4: Αναδιπλωμένο δίπολο: $Z_{in}(f)$ για $s = \lambda/4$ στο εύρος 30–90 MHz.

4.3.3 Αξιολόγηση Προσαρμογής (SWR / $|\Gamma|$) και Επιλογές Z_0

Για να αξιολογηθεί πρακτικά η προσαρμογή, επιλέχθηκαν τιμές Z_0 κοντά στις αντιστάσεις εισόδου στα σημεία συντονισμού που προέκυψαν από τα διαγράμματα. Η επιλογή αυτή δεν επιβάλλει ότι η κεραία είναι ευρυζωνική, αλλά δείχνει σε ποια συχνότητα/συντονισμό η διάταξη μπορεί να τροφοδοτηθεί πιο ρεαλιστικά, με μικρότερο λόγο στασίμων.

Προσαρμογή για $s = \lambda/100$

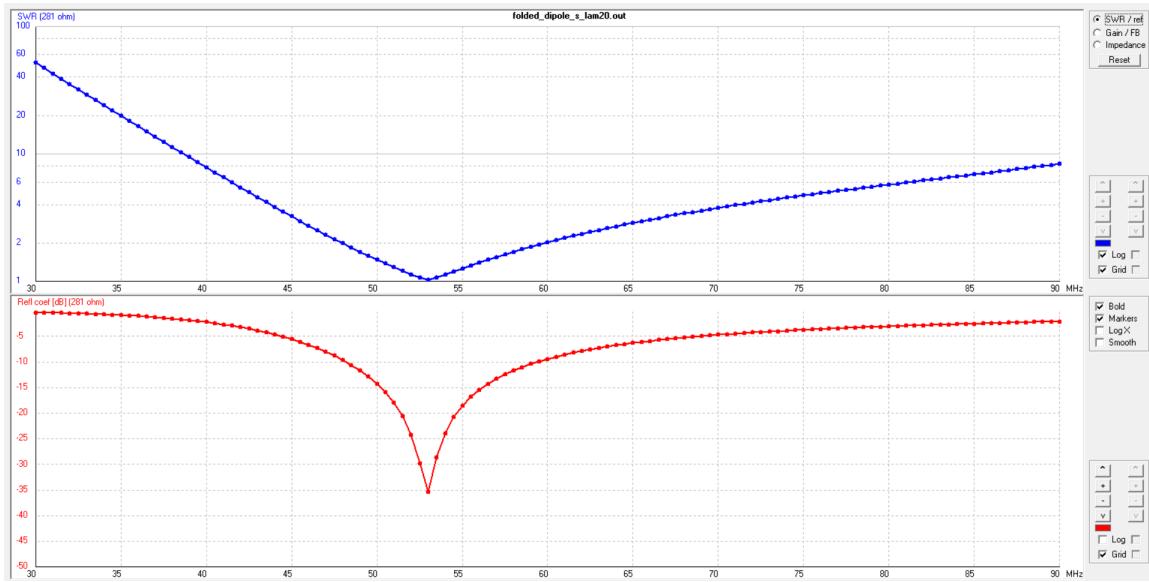
Στο συντονισμό των 55 MHz, η επιλογή $Z_0 = 285 \Omega$ δίνει το καλύτερο σημείο προσαρμογής σε σχέση με την υπόλοιπη καμπύλη, καθώς αντιστοιχεί άμεσα στην τιμή του R_{in} όταν $X_{in} \approx 0$.



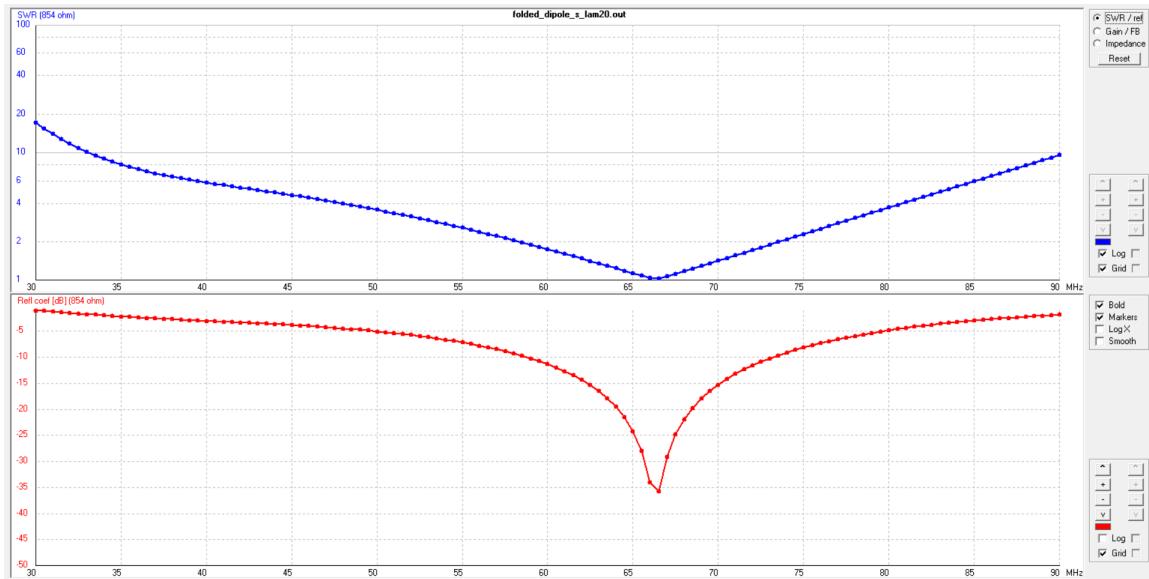
Σχήμα 4.5: SWR / συντελεστής ανάκλασης με $Z_0 = 285 \Omega$ για $s = \lambda/100$.

Προσαρμογή για $s = \lambda/20$

Για την περίπτωση $s = \lambda/20$ εξετάστηκαν δύο διαφορετικές τιμές αναφοράς, επειδή εμφανίζονται δύο συντονισμοί με πολύ διαφορετικό R_{in} . Κοντά στα 52.5 MHz, το $Z_0 = 281 \Omega$ οδηγεί σε πολύ πιο λογική προσαρμογή για γραμμή μεσαίας/υψηλής αντίστασης. Εναλλακτικά, αν θεωρηθεί στόχος ο συντονισμός στα 66 MHz, τότε το $Z_0 = 854 \Omega$ δίνει σαφώς καλύτερη προσαρμογή εκεί, αλλά πρόκειται για τιμή που δύσκολα εξυπηρετεί τυπική τροφοδότηση.



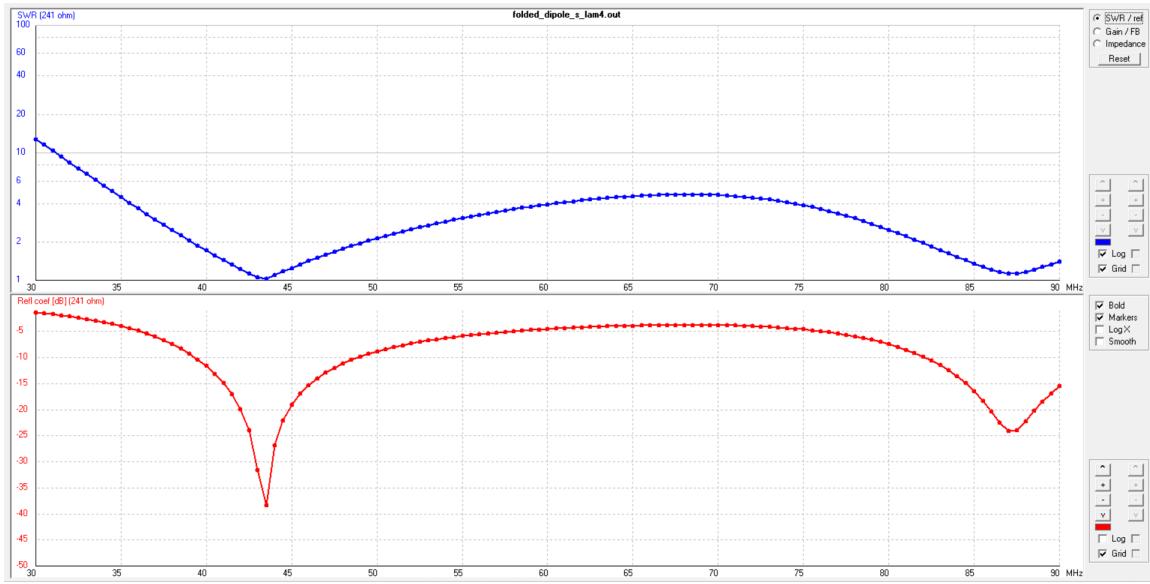
Σχήμα 4.6: SWR / συντελεστής ανάκλασης με $Z_0 = 281 \Omega$ για $s = \lambda/20$ (έμφαση στο συντονισμό στα 52.5 MHz).



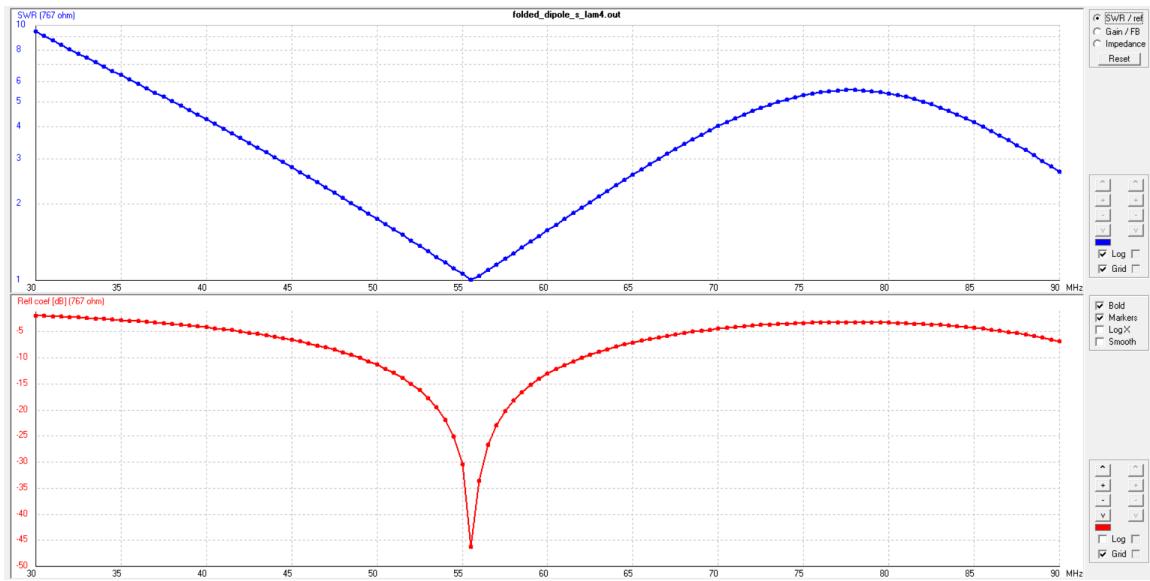
Σχήμα 4.7: SWR / συντελεστής ανάκλασης με $Z_0 = 854 \Omega$ για $s = \lambda/20$ (έμφαση στο συντονισμό στα 66 MHz).

Προσαρμογή για $s = \lambda/4$

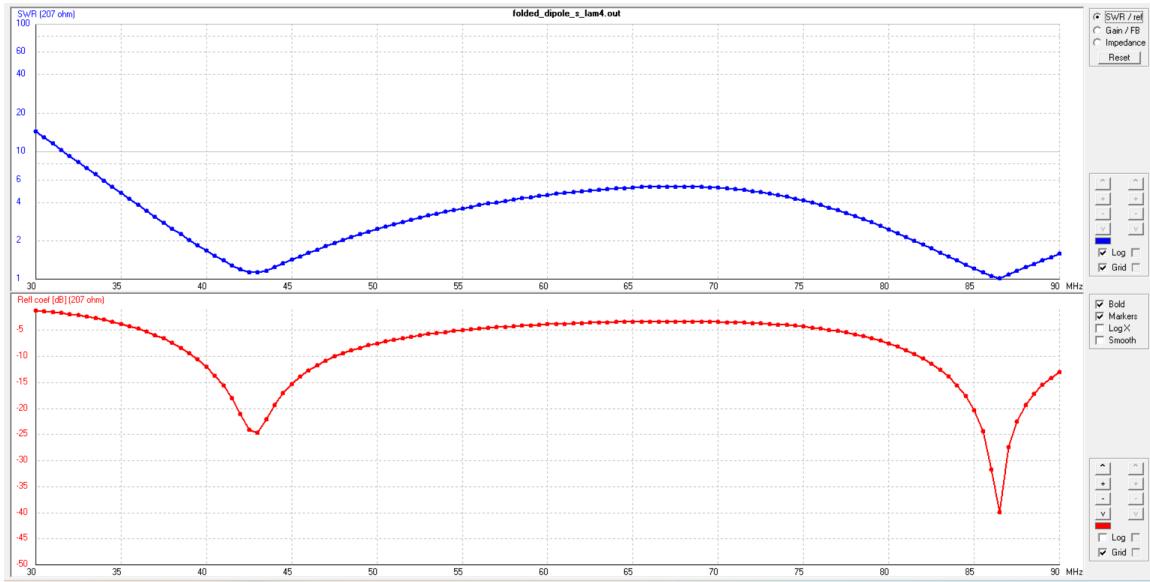
Στη μεγάλη απόσταση, ένα μόνο Z_0 δεν μπορεί να καλύψει ικανοποιητικά και τους τρεις συντονισμούς, επειδή το R_{in} μεταβάλλεται έντονα από συντονισμό σε συντονισμό. Για τον λόγο αυτό παρουσιάζονται τρεις δοκιμές, μία ανά συντονισμό, με τιμές αναφοράς $Z_0 = 241 \Omega$ (43.6 MHz), $Z_0 = 767 \Omega$ (55.5 MHz) και $Z_0 = 207 \Omega$ (86.5 MHz).



Σχήμα 4.8: SWR / συντελεστής ανάκλασης με $Z_0 = 241 \Omega$ για $s = \lambda/4$ (συντονισμός 43.6 MHz).



Σχήμα 4.9: SWR / συντελεστής ανάκλασης με $Z_0 = 767 \Omega$ για $s = \lambda/4$ (συντονισμός 55.5 MHz).



Σχήμα 4.10: SWR / συντελεστής ανάκλασης με $Z_0 = 207 \Omega$ για $s = \lambda/4$ (συντονισμός 86.5 MHz).

4.3.4 Συνολικός Σχολιασμός

Η παράμετρος s αποδεικνύεται καθοριστική για το πώς φαίνεται η διάταξη στην είσοδο. Στη μικρή απόσταση ($\lambda/100$) η συμπεριφορά είναι πιο κοντά στην χλασική ιδέα του folded dipole ως μετασχηματιστή αντίστασης, με αντιστάσεις της τάξης μερικών εκατοντάδων Ω . Στη μέση απόσταση ($\lambda/20$) η ύπαρξη δύο συντονισμών με πολύ διαφορετικές τιμές R_{in} δημιουργεί δύο εναλλακτικές περιοχές λειτουργίας. Τέλος, για $\lambda/4$ η έντονη μεταβολή του R_{in} από συντονισμό σε συντονισμό υποδεικνύει ότι η διάταξη δεν προσαρμόζεται ικανοποιητικά με μία σταθερή γραμμή, και η αξιοποίησή της απαιτεί πιο στοχευμένη επιλογή συχνότητας ή/και κύκλωμα/μετασχηματισμό προσαρμογής.

4.4 Καθορισμός Παραμέτρων για την Ανάλυση Ακτινοβολίας [Ερώτημα (β)]

Για την αξιόπιστη μελέτη των διαγραμμάτων ακτινοβολίας του αναδιπλωμένου διπόλου (folded dipole), χρίθηκε αναγκαίος ο προσδιορισμός μίας κατάλληλης αντίστασης αναφοράς Z_0 και ενός αντιπροσωπευτικού σημείου λειτουργίας για κάθε γεωμετρική περίπτωση. Η επιλογή αυτή βασίστηκε αποκλειστικά στα αποτελέσματα της ανάλυσης προσαρμογής που προηγήθηκε (Ερώτημα α'), με στόχο τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος και τη σταθερότητα της ακτινοβολίας στο μακρινό πεδίο.

4.4.1 Επιλεγμένα Σημεία Λειτουργίας ανά Περίπτωση

Για καθεμία από τις τρεις αποστάσεις μεταξύ των παράλληλων αγωγών s , επιλέχθηκε μία συχνότητα λειτουργίας κοντά στο ισχυρότερο και πλέον σταθερό σημείο συντονισμού.

Περίπτωση 1: $s = \lambda/100$ Η κεραία παρουσιάζει τον κυρίαρχο συντονισμό στους $f = 55 \text{ MHz}$, όπου η σύνθετη αντίσταση εισόδου προσεγγίζει τα $Z_{\text{in}} \approx 285 \Omega$. Η τιμή αυτή είναι ιδιαίτερα κοντά στη θεωρητική αντίσταση αναδιπλωμένου διπόλου ($\approx 4R_d$), γεγονός που καθιστά το σημείο αυτό ιδανικό για ανάλυση ακτινοβολίας.

Περίπτωση 2: $s = \lambda/20$ Με την αύξηση της απόστασης, ο κύριος συντονισμός μετατοπίζεται ελαφρώς προς υψηλότερη συχνότητα. Ως σημείο λειτουργίας επιλέχθηκε $f = 66 \text{ MHz}$ με αντίσταση αναφοράς $Z_0 = 854 \Omega$, καθώς στο σημείο αυτό επιτυγχάνεται ικανοποιητική προσαρμογή και σταθερή συμπεριφορά στο πεδίο.

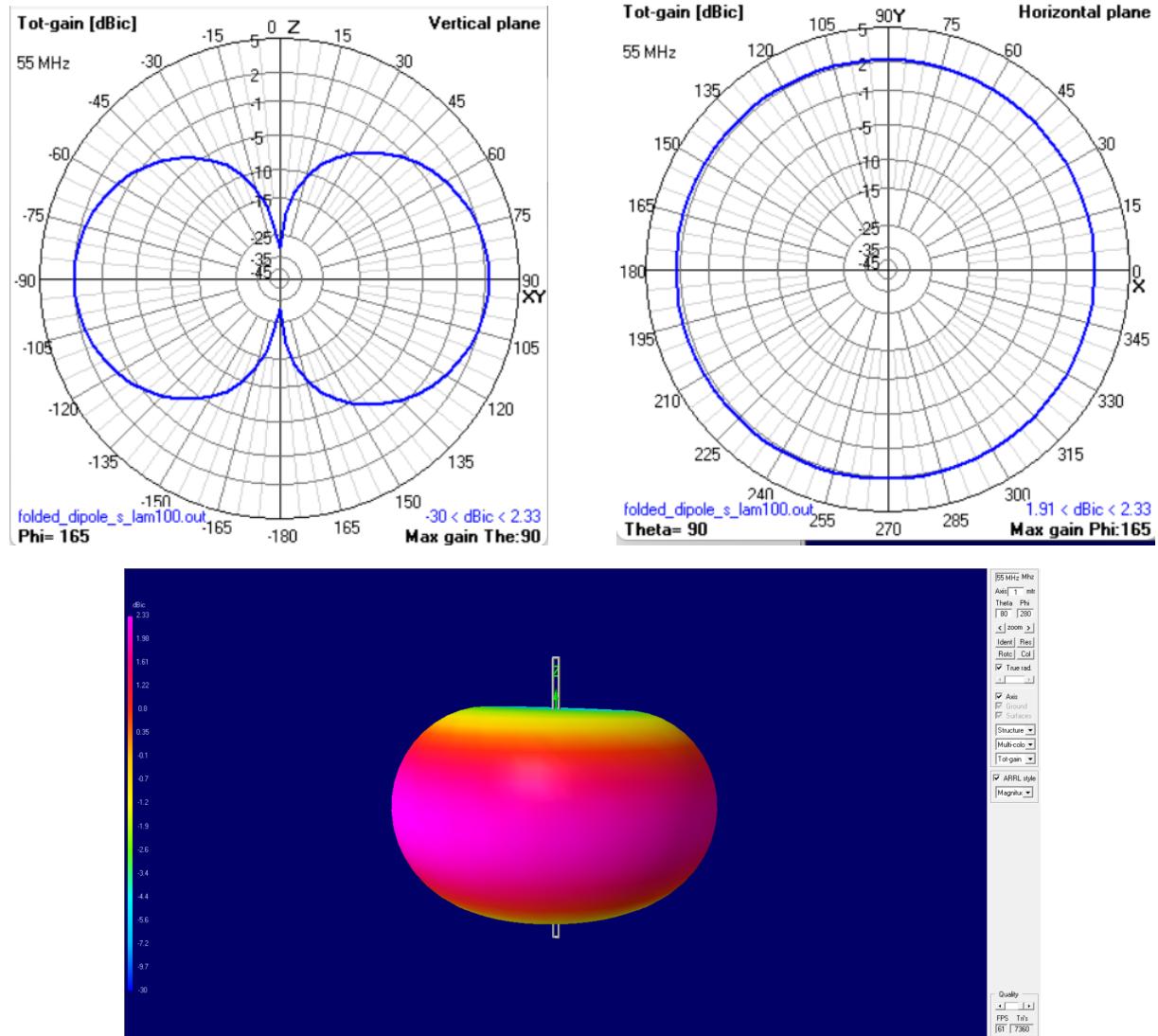
Περίπτωση 3: $s = \lambda/4$ Στην ακραία αυτή γεωμετρία, η δομή εμφανίζει πολλαπλές κοιλάδες στον συντελεστή ανάλασης. Για λόγους συγκρισιμότητας και σαφήνειας, επιλέχθηκε η συχνότητα $f = 55.5 \text{ MHz}$ με $Z_0 = 767 \Omega$, η οποία αντιστοιχεί στη μοναδική σχετικά καθαρή περιοχή συντονισμού.

4.4.2 Διαγράμματα Ακτινοβολίας στο Μακρινό Πεδίο

Με βάση τις παραπάνω επιλογές, υπολογίστηκαν τα διαγράμματα ακτινοβολίας στο μακρινό πεδίο (far-field) σε κατακόρυφο, οριζόντιο επίπεδο και σε τρισδιάστατη απεικόνιση.

Περίπτωση 1: $s = \lambda/100$ (55 MHz, $Z_0 = 285 \Omega$)

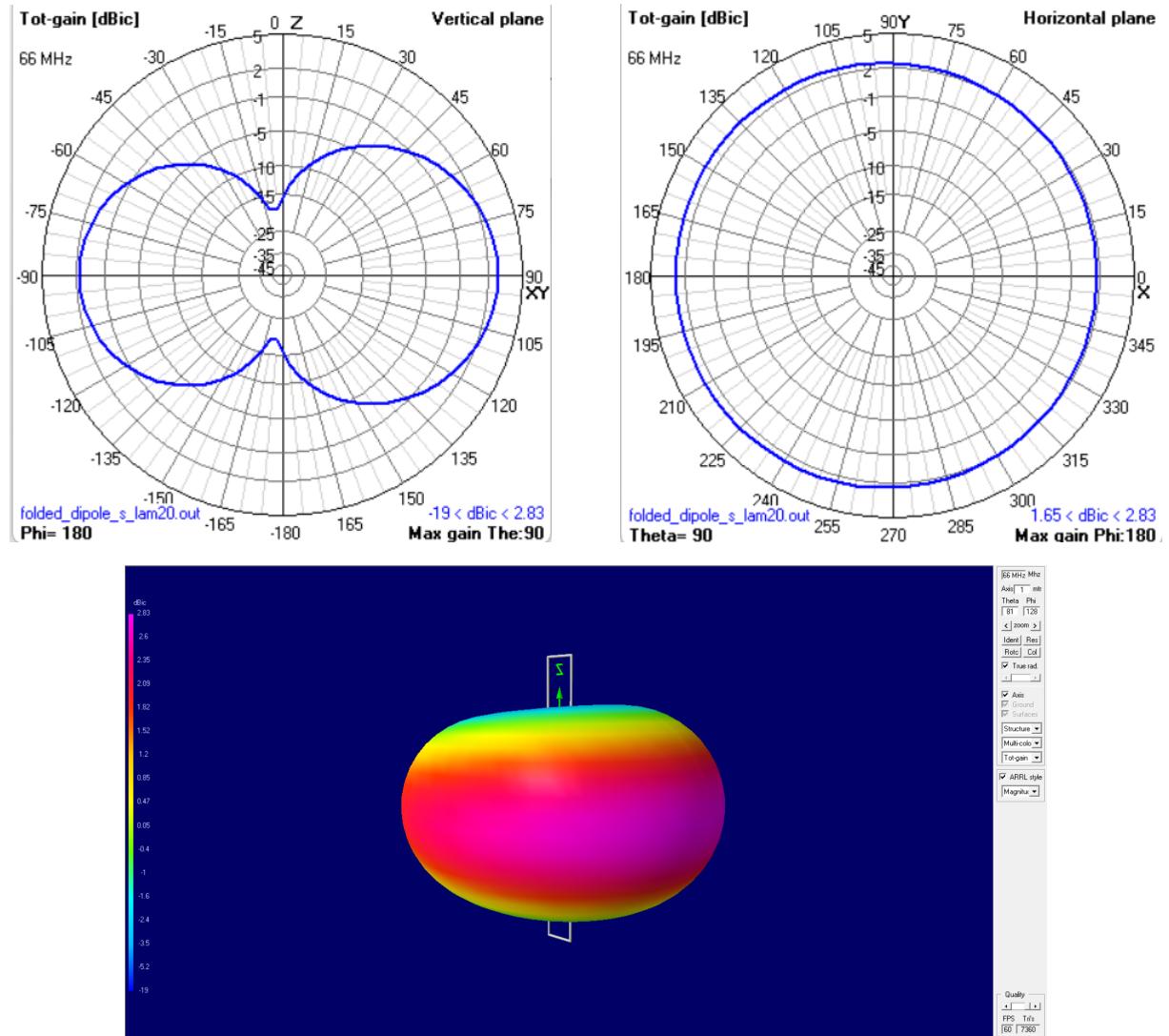
Η ακτινοβολία παρουσιάζει την κλασική συμπεριφορά διπόλου. Το κατακόρυφο διάγραμμα εμφανίζει συμμετρικό σχήμα τύπου figure-eight, με σαφείς μηδενισμούς κατά τον άξονα του αγωγού, ενώ το οριζόντιο διάγραμμα παραμένει σχεδόν κυκλικό, επιβεβαιώνοντας τον παγκαντευθυντικό χαρακτήρα στο επίπεδο ϕ . Το μέγιστο κέρδος ανέρχεται σε 2.33 dBi.



Σχήμα 4.11: Διαγράμματα ακτινοβολίας για $s = \lambda/100$ στα 55 MHz.

Περίπτωση 2: $s = \lambda/20$ (66 MHz, $Z_0 = 854 \Omega$)

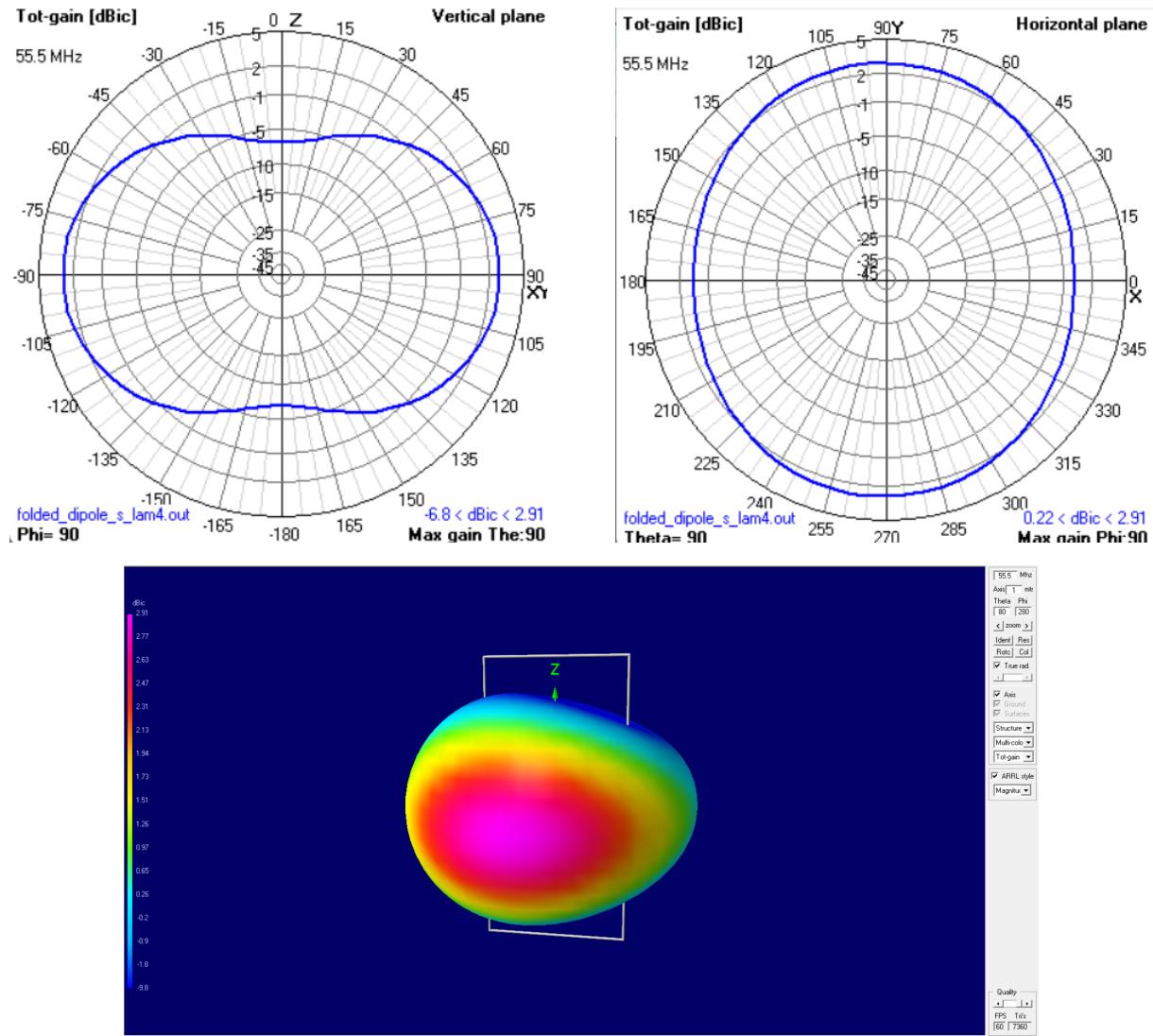
Η αύξηση της απόστασης των αγωγών οδηγεί σε ελαφρά αλλοίωση της κατανομής της ακτινοβολίας. Το κατακόρυφο διάγραμμα διατηρεί τον διπολικό χαρακτήρα, ενώ στο οριζόντιο επίπεδο παρατηρείται μικρή απόκλιση από την τέλεια κυκλική συμμετρία. Το μέγιστο κέρδος αυξάνεται στα 2.83 dBic, γεγονός που συνδέεται με τη λειτουργία σε υψηλότερη συχνότητα.



Σχήμα 4.12: Διαγράμματα ακτινοβολίας για $s = \lambda/20$ στα 66 MHz.

Περίπτωση 3: $s = \lambda/4$ (55.5 MHz, $Z_0 = 767 \Omega$)

Στην τρίτη περίπτωση, η γεωμετρία παύει να προσεγγίζει το ιδανικό αναδιπλωμένο δίπολο. Η ακτινοβολία παραμένει χυρίως διπολική, ωστόσο παρατηρείται μεγαλύτερη εξομάλυνση των λοβών και ενίσχυση της εκπεμπόμενης ισχύος. Το μέγιστο κέρδος ανέρχεται σε 2.91 dBi, αν και η προσαρμογή επιτυγχάνεται μόνο για υψηλές τιμές Z_0 .



Σχήμα 4.13: Διαγράμματα ακτινοβολίας για $s = \lambda/4$ στα 55.5 MHz.

4.4.3 Συνολική Αποτίμηση

Η συγκριτική ανάλυση δείχνει ότι η μικρή απόσταση μεταξύ των αγωγών ($s = \lambda/100$) παρέχει την πιο καθαρή διπολική συμπεριφορά και την πιο προβλέψιμη προσαρμογή. Η αύξηση της απόστασης οδηγεί σε υψηλότερο κέρδος, αλλά με κόστος την πολυπλοκότητα της σύνθετης αντίστασης και την ανάγκη για μη τυπικές γραμμές μεταφοράς. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τον κρίσιμο ρόλο της γεωμετρίας στην ηλεκτρομαγνητική απόδοση του αναδιπλωμένου διπόλου.

Κεφάλαιο 5

Ανάλυση Κεραίας Οδεύοντος Κύματος (Beverage)

5.1 Παρουσίαση Προβλήματος και Δεδομένα Κεραίας

Στο παρόν ερώτημα εξετάζεται μία κεραία οδεύοντος κύματος τύπου Beverage, η οποία υλοποιείται ως οριζόντιος αγωγός μήκους 5λ σε ύψος $h = \lambda/4$ από το ground. Η συγκεκριμένη διάταξη αντιμετωπίζεται ουσιαστικά ως γραμμή που ακτινοβολεί, όπου ο στόχος δεν είναι η δημιουργία ισχυρού στάσιμου κύματος αλλά η επικράτηση οδεύοντος κύματος κατά μήκος του σύρματος. Για τον λόγο αυτό, στο δεξί άκρο εισάγεται ωμικός τερματισμός R_L , ώστε να απορροφάται η ενέργεια στο άκρο και να περιορίζονται οι ανακλάσεις.

Για το εύρος επωνύμου $\Delta-\Lambda$ λαμβάνεται συχνότητα σχεδίασης $f_0 = 12$ MHz. Με βάση τον κώδικα, το μήκος κύματος υπολογίζεται με $\lambda = 300/f_0$ (σε m όταν το f_0 δίνεται σε MHz), άρα $\lambda = 25$ m, και συνεπώς $L = 5\lambda = 125$ m και $h = \lambda/4 = 6.25$ m. Η ζητούμενη σάρωση γίνεται από $0.5f_0$ έως $1.5f_0$, δηλαδή 6 έως 18 MHz, με βήμα $\Delta f = 0.1$ MHz, ώστε το φάσμα να δειγματοληπτείται πυκνά.

Η προσομοίωση εκτελείται για δύο διαφορετικά ground σενάρια, όπως ορίζονται ρητά στον κώδικα μέσω της κάρτας GN:

- (i) ιδανικό/τέλειο ground (GN 1 ...), και
- (ii) έδαφος καλής αγωγιμότητας (fast ground, g type: good) (GN 2 ... με $\varepsilon_r = 17$ και $\sigma = 0.015$ S/m). Με αυτόν τον τρόπο αποτυπώνεται άμεσα η επίδραση του εδάφους στην είσοδο και στην αποτελεσματικότητα του τερματισμού.

5.2 Γεωμετρικός Σχεδιασμός και Παράμετροι Μοντέλου

Η γεωμετρία ορίζεται από τρία wires (GW): έναν κύριο οριζόντιο αγωγό μήκους L στο $z = h$ και δύο κατακόρυφα σύρματα στα άκρα, που συνδέουν τα άκρα του οριζόντιου αγωγού με το επίπεδο $z = 0$. Η επιλογή αυτή δεν είναι απλώς σχεδιαστική: εξασφαλίζει ξεκάθαρο σημείο εφαρμογής του τερματισμού στο έδαφος και συγκεκριμένη θέση διέγερσης σε κόμβο της δομής.

Στον κώδικα χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές ακτίνες: η ακτίνα του κύριου αγωγού είναι $a_{wire} = (\lambda/200)/2$, ενώ στα κατακόρυφα τμήματα τίθεται μικρότερη ακτίνα $a_{feed} = a_{wire}/4$. Η

διαφοροποίηση αυτή βοηθά ώστε τα κατακόρυφα τμήματα να λειτουργούν κυρίως ως στοιχεία σύνδεσης/τροφοδοσίας και όχι ως κύριοι ακτινοβολητές, περιορίζοντας τεχνητή ακτινοβολία από τα σημεία τροφοδοσίας/τερματισμού.

5.2.1 Συνοπτικός Πίνακας Διαστάσεων και Ρυθμίσεων

Παράμετρος	Σύμβολο	Ορισμός (από κώδικα)	Τιμή (για $f_0 = 12 \text{ MHz}$)
Κεντρική συχνότητα	f_0	δεδομένο	12 MHz
Μήκος κύματος	λ	$300/f_0$	25 m
Μήκος οριζόντιου αγωγού	L	5λ	125 m
Υψος από το έδαφος	h	$\lambda/4$	6.25 m
Διάμετρος κύριου αγωγού	d	$\lambda/200$	0.125 m
Ακτίνα κύριου αγωγού	a_{wire}	$d/2$	0.0625 m
Ακτίνα κατακόρυφων τμημάτων	a_{feed}	$a_{\text{wire}}/4$	0.015625 m
Segments οριζόντιου	N_L	επιλογή	101
Segments κατακόρυφου	N_v	επιλογή	5
Τερματισμός	R_L	δοσμένος	317.54Ω
Σάρωση συχνότητας	—	$0.5f_0 \rightarrow 1.5f_0$	6–18 MHz
Βήμα σάρωσης	Δf	επιλογή	0.1 MHz

Πίνακας 5.1: Παράμετροι μοντέλου και προσομοίωσης της κεραίας οδεύοντος κύματος.

5.3 Ανάλυση $|Z_{\text{in}}|$ και Επιλογή Z_0 [Ερώτημα (α)]

5.3.1 Μοντελοποίηση στο NEC και Παραγόμενα Αρχεία

Τα αρχεία εισόδου .nec δημιουργούνται αυτόματα από τον MATLAB κώδικα στο αρχείο traveling_wave_antenna.m σε δύο εκδόσεις, μία ανά τύπο εδάφους, με ονόματα μορφής: traveling_wave_antenna_geometry_perfect.nec και traveling_wave_antenna_geometry_good.nec. Η διαφοροποίηση ανά περίπτωση γίνεται αποκλειστικά από την κάρτα GN που εισάγεται στο αρχείο.

Ο κύριος οριζόντιος αγωγός ορίζεται συμμετρικά γύρω από την αρχή, από $x = -L/2$ έως $x = +L/2$ στο ύψος $z = h$ (GW 1). Στο δεξί άκρο ($x = +L/2$) προστίθεται κατακόρυφο σύρμα (GW 2) που καταλήγει στο $z = 0$, ενώ αντίστοιχο κατακόρυφο σύρμα στο αριστερό άκρο (GW 3) εξυπηρετεί τη διέγερση της διάταξης. Με αυτόν τον ορισμό η τροφοδοσία γίνεται σε συγκεκριμένο tag/segment (EX 0 3 1), δηλαδή στο πρώτο segment του αριστερού κατακόρυφου, ώστε η είσοδος να βλέπει τη δομή μέσω του κόμβου σύνδεσης με τον κύριο αγωγό.

Η χαρακτηριστική αντίσταση υπολογίζεται από τον τύπο

$$Z_0 \approx 138 \log_{10} \left(\frac{4h}{d} \right)$$

και προκύπτει $Z_0 = 317.54 \Omega$

Ο τερματισμός εφαρμόζεται στο δεξί κατακόρυφο (tag 2) στο κάτω όρο του (segment 5), με κάρτα LD:

$$\text{LD } 0 \ 2 \ 5 \ 5 \ R_L$$

ώστε το φορτίο να αναπαριστά πραγματική αντίσταση προς γείωση στο άκρο του αγωγού. Η συγκεκριμένη τιμή τερματισμού λαμβάνεται $R_L = 317.54 \Omega$ και χρησιμοποιείται ίδια και στις δύο περιπτώσεις εδάφους, ώστε να μπορεί να συγχριθεί καθαρά η επίδραση του ground στην είσοδο και στη συμπεριφορά ανακλάσεων.

Η κατάτμηση έχει επιλεγεί ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής χωρική ανάλυση σε όλο το φάσμα 6–18 MHz. Στον κύριο αγωγό με $N_L = 101$ προκύπτει $\Delta L \approx L/101 \approx 1.24 \text{ m}$. Στη μέγιστη συχνότητα (18 MHz) ισχύει $\lambda_{\min} \approx 16.7 \text{ m}$, άρα $\lambda_{\min}/10 \approx 1.67 \text{ m}$, και συνεπώς $\Delta L < \lambda_{\min}/10$, κάτι που υποστηρίζει αξιόπιστη λύση MoM χωρίς αριθμητικές αστάθειες από υπερβολικά μεγάλα τμήματα. Τα κατακόρυφα τμήματα διακριτοποιούνται σε $N_v = 5$ τμήματα, ώστε να περιγράφεται ομαλά η σύνδεση προς το έδαφος χωρίς να αυξάνεται άσκοπα το πλήθος αγνώστων.

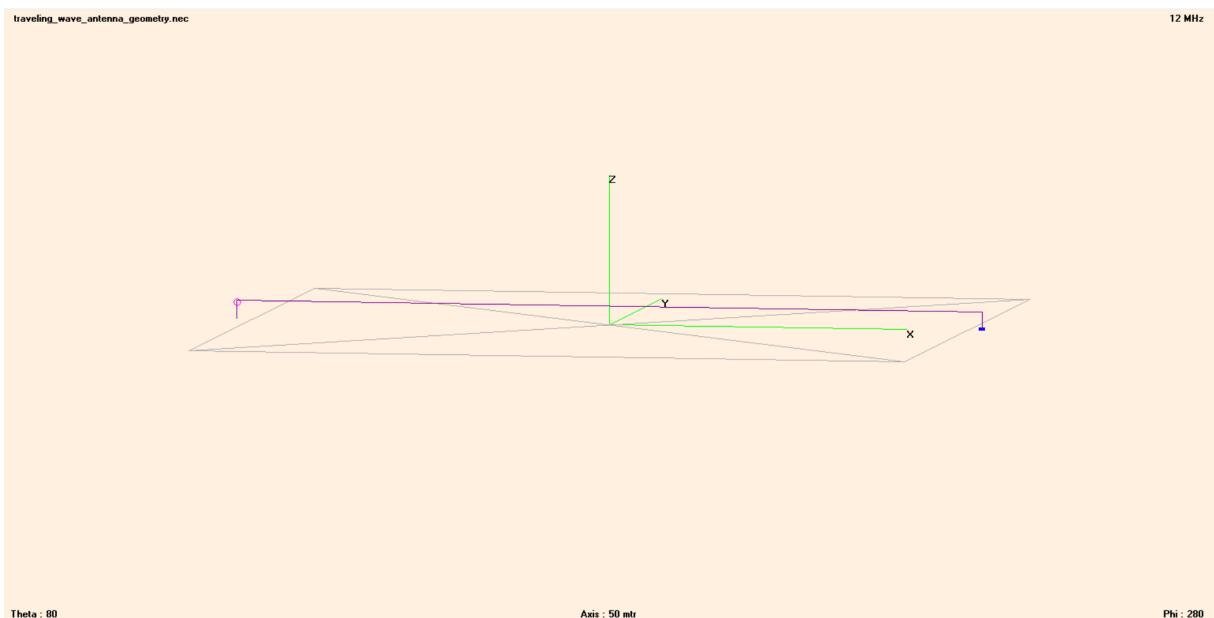
Η σάρωση συχνότητας υλοποιείται με κάρτα FR από 6 έως 18 MHz με βήμα 0.1 MHz, παράγοντας

$$N_f = \frac{18 - 6}{0.1} + 1 = 121$$

σημεία. Από τα αποτελέσματα εξάγεται το $|Z_{in}(f)|$ και, με βάση την περιοχή καλύτερης προσαρμογής κοντά στο f_0 , επιλέγεται κατάλληλη τιμή αναφοράς Z_0 για τον υπολογισμό του $|\Gamma(f)|$.

Σχόλιο για τη φυσική ερμηνεία: σε ιδανικό ground η συμπεριφορά αναμένεται καθαρότερη ως προς την είσοδο (λιγότερες απώλειες εδάφους), ενώ στο good έδαφος η πεπερασμένη αγωγιμότητα εισάγει πρόσθετες απώλειες και μεταβάλλει την αποτελεσματική διάδοση/απόσβεση κατά μήκος του αγωγού, άρα και την τιμή τερματισμού που φαίνεται ως βέλτιστη από την είσοδο.

Παρακάτω παρατίθεται και η γεωμετρία της κεραίας:



Σχήμα 5.1: Οπτικοποίηση της γεωμετρίας στο 4nec2 για $f_0 = 12 \text{ MHz}$.

5.3.2 Αρχική Εκτίμηση Z_0 και Εκκίνηση Επιλογής Τερματισμού

Για μία γραμμή πάνω από γη η χαρακτηριστική αντίσταση μπορεί να εκτιμηθεί από τη γεωμετρία. Χρησιμοποιήθηκε η εμπειρική σχέση

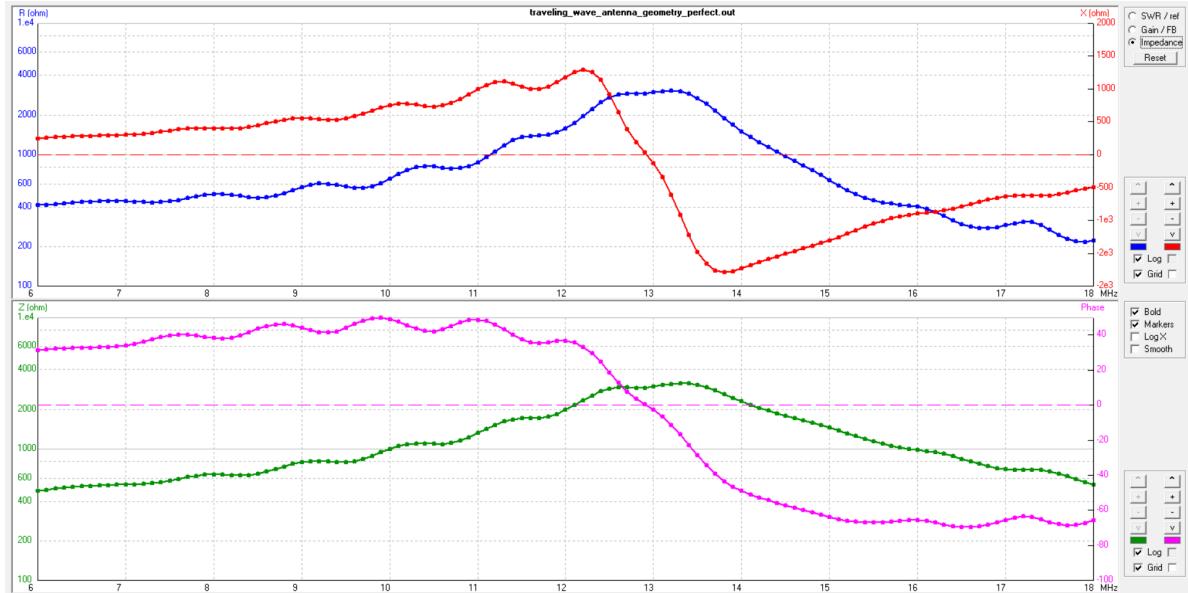
$$Z_0 \approx 138 \log_{10} \left(\frac{4h}{d} \right),$$

η οποία εξαρτάται από το ύψος h και τη διάμετρο d του αγωγού. Με $h = 6.25\text{ m}$ και $d = 0.125\text{ m}$ προκύπτει $Z_0 \approx 317.54\Omega$. Η τιμή αυτή δεν αλλάζει ανάμεσα σε perfect και good ground, καθώς είναι καθαρά γεωμετρική εκτίμηση, αυτό που αλλάζει με το έδαφος είναι το πόσο καλά η διάταξη συμπεριφέρεται ως οδεύον κύμα (δηλ. πόση απόσβεση/απώλεια εισάγει το περιβάλλον και πώς σβήνουν οι ανακλάσεις).

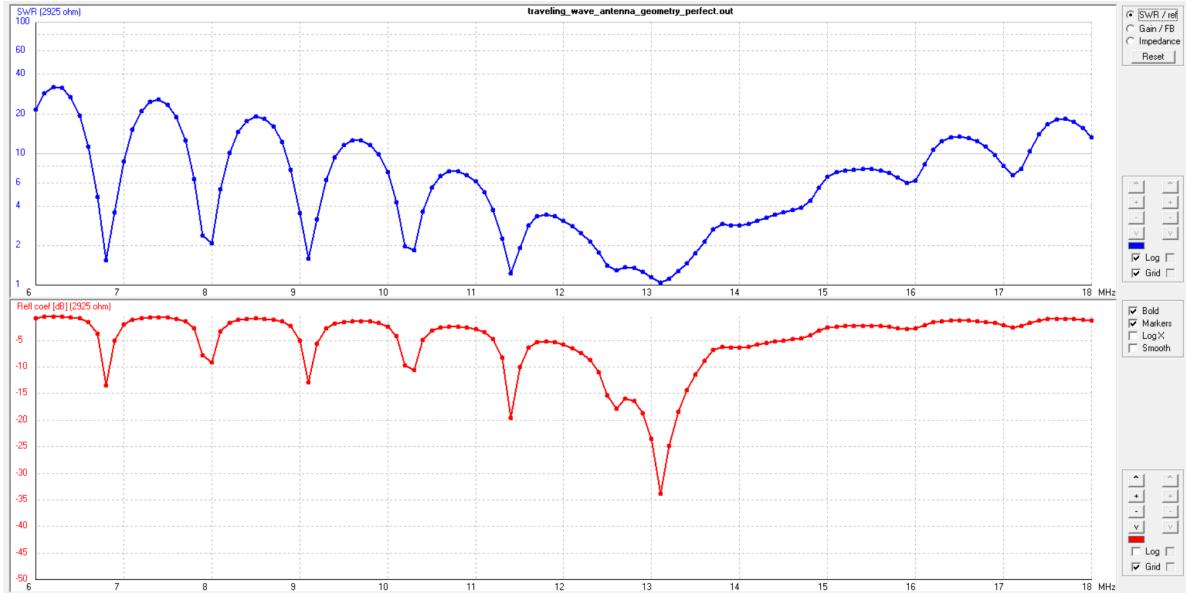
Με βάση το Z_0 , ως αρχική δοκιμή τέθηκε $R_L = 317.54\Omega$. Στη συνέχεια εξετάστηκαν και τιμές R_L που προκύπτουν από τα διαγράμματα ως σημεία συντονισμού (μηδενισμός του X_{in}) ή/και ως πιο ομαλές λύσεις προσαρμογής.

5.3.3 Μελέτη Τερματισμού σε Perfect Ground

Περίπτωση P1: Θεωρητική επιλογή ($R_L = 317.54\Omega$). Με τερματισμό ίσο με την εκτιμώμενη Z_0 , η διάταξη τείνει να συμπεριφερθεί ως γραμμή προσαρμοσμένη στην περιοχή σχεδίασης. Στο perfect ground, όπου οι απώλειες είναι πρακτικά μηδενικές, οι ανακλάσεις φαίνονται πιο έντονα όταν ο τερματισμός δεν είναι ακριβώς στη σωστή τιμή, άρα η απόκριση μπορεί να εμφανίζει περιοδικές κυματώσεις στο R_{in} και στο X_{in} (χαρακτηριστικό στάσιμου κύματος σε γραμμή με μικρή απόσβεση).

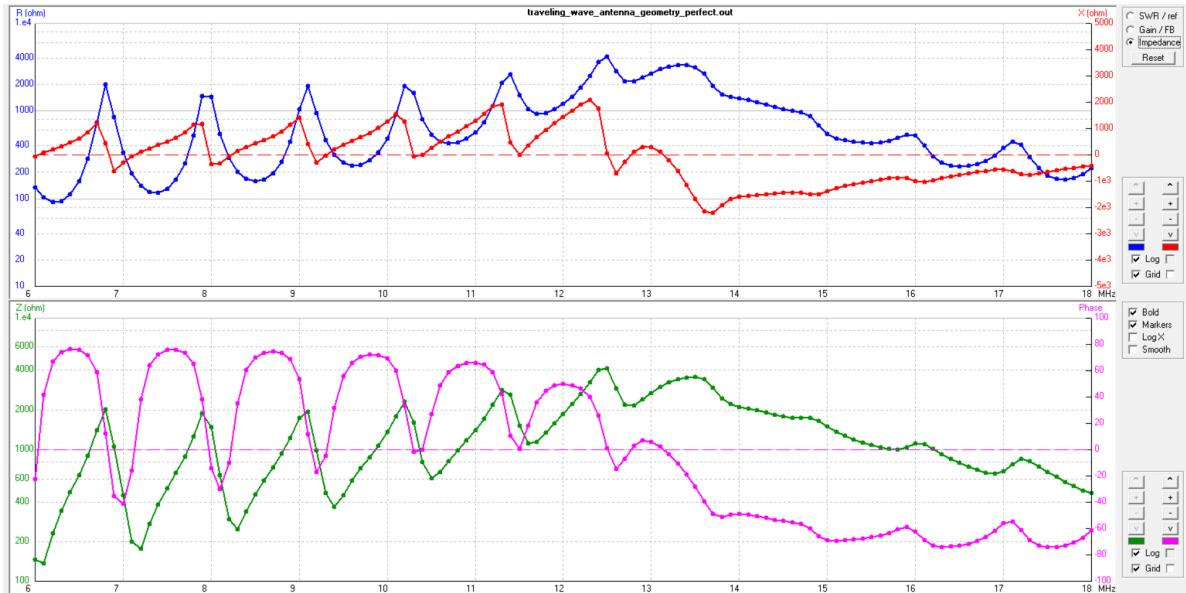


Σχήμα 5.2: (Perfect ground) Σύνθετη αντίσταση εισόδου στο 6–18 MHz για $R_L = 317.54\Omega$.

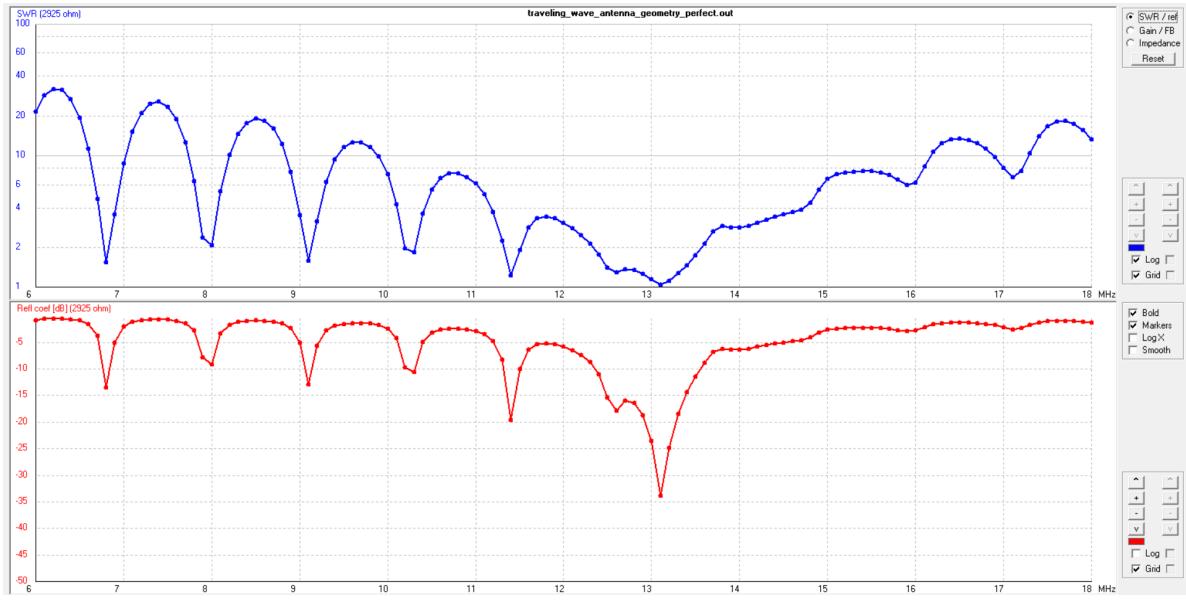


Σχήμα 5.3: (Perfect ground) SWR και συντελεστής ανάκλασης (dB) στο 6–18 MHz για αναφορά $Z_0 = 317.54 \Omega$.

Περίπτωση P2: Ακραίος συντονισμός ($R_L \approx 2925 \Omega$). Από τα αποτελέσματά μας παραπάνω ($R_L = 317.54 \Omega$) προκύπτει μηδενισμός του X_{in} για πολύ υψηλό τερματισμό, περίπου $R_L \simeq 2925 \Omega$. Η κεραία παύει να λειτουργεί ως ευρυζωνικό σύστημα οδεύοντος κύματος και μετατρέπεται σε μια στενής ζώνης κεραία στάσιμου κύματος, χάνοντας την κατευθυντικότητά της λόγω ισχυρών ανακλάσεων από το άκρο και της νευρικότητας που παρατηρείται στο SWR . Παρότι αυτό φτάνει σε έναν συντονισμό, η τιμή είναι δυσανάλογα μεγάλη για γραμμή αυτού του τύπου: πρακτικά ο τερματισμός λειτουργεί σαν σχεδόν ανοικτοκύλωμα, οπότε οι ανακλάσεις αιξάνονται και η συμπεριφορά γίνεται πιο ευαίσθητη στη συχνότητα (έντονες ταλαντώσεις σε SWR).

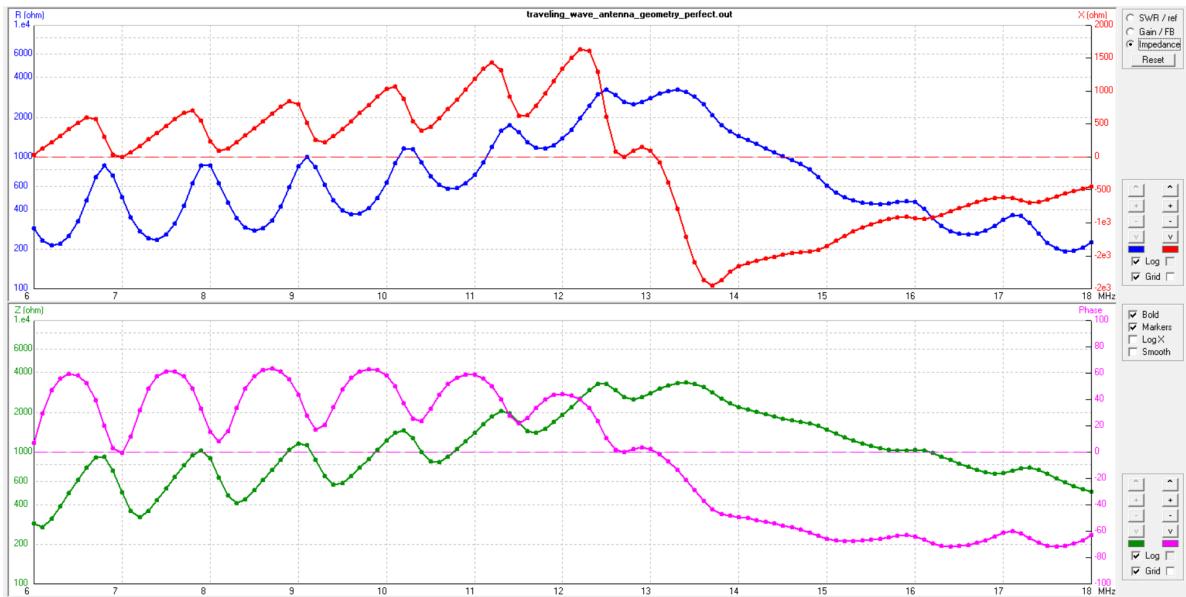


Σχήμα 5.4: (Perfect ground) $Z_{in}(f)$ στο 6–18 MHz για $R_L \approx 2925 \Omega$ (ακραία επιλογή συντονισμού).

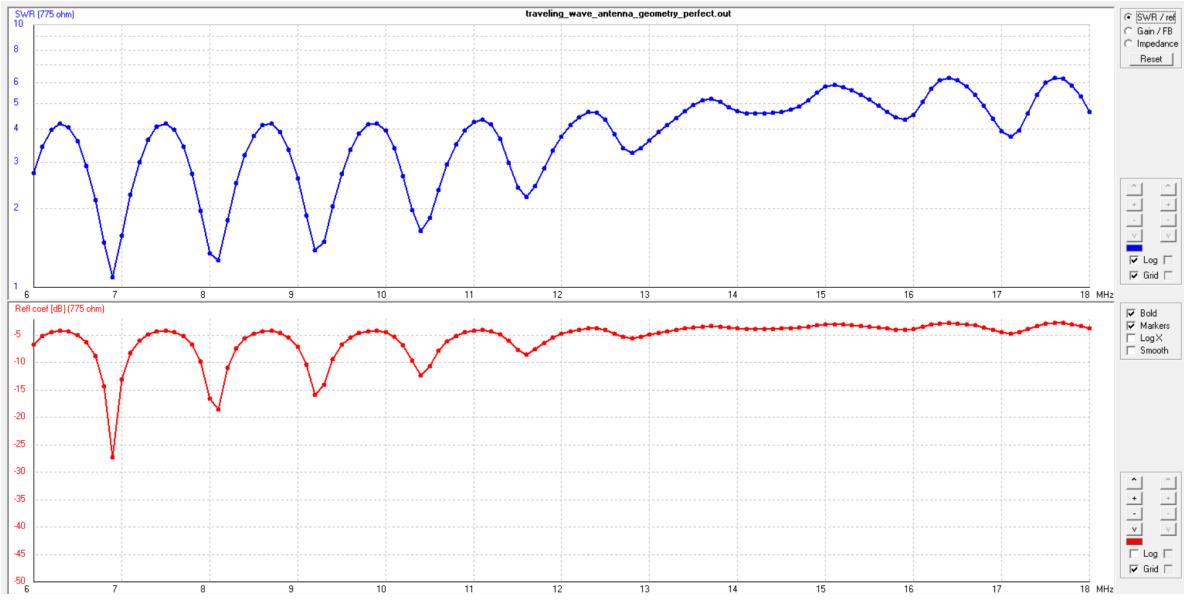


Σχήμα 5.5: (Perfect ground) SWR και ανάκλαση (dB) για $R_L \approx 2925 \Omega$.

Περίπτωση Ρ3: Πιο ήπια προσαρμογή ($R_L \approx 775 \Omega$). Η τιμή $R_L \simeq 775 \Omega$ εμφανίζεται στα αποτελέσματα ως εναλλακτική επιλογή όπου επίσης προκύπτει $X_{in} \approx 0$, αλλά χωρίς να οδηγούμαστε σε υπερβολικά υψηλή αντίσταση. Η τιμή αυτή αποτελεί αρκετά καλή λύση για την περίπτωση του perfect ground, εξασφαλίζοντας μέγιστη ευρυζωνικότητα και διατήρηση του κατευθυντικού διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας Beverage. Ωστόσο ενδέχεται να μην είναι η βέλτιστη, λόγω των παρατηρήσεων που έγιναν παραπάνω. Στην πράξη αυτή η λύση λειτουργεί ως συμβιβασμός: κρατώντας την κεραία πιο κοντά στη λογική οδεύοντος κύματος (λιγότερο κλειδωμένη σε στενό συντονισμό) και συνήθως δίνει πιο ομαλή εικόνα στην προσαρμογή σε σχέση με την ακραία περίπτωση.



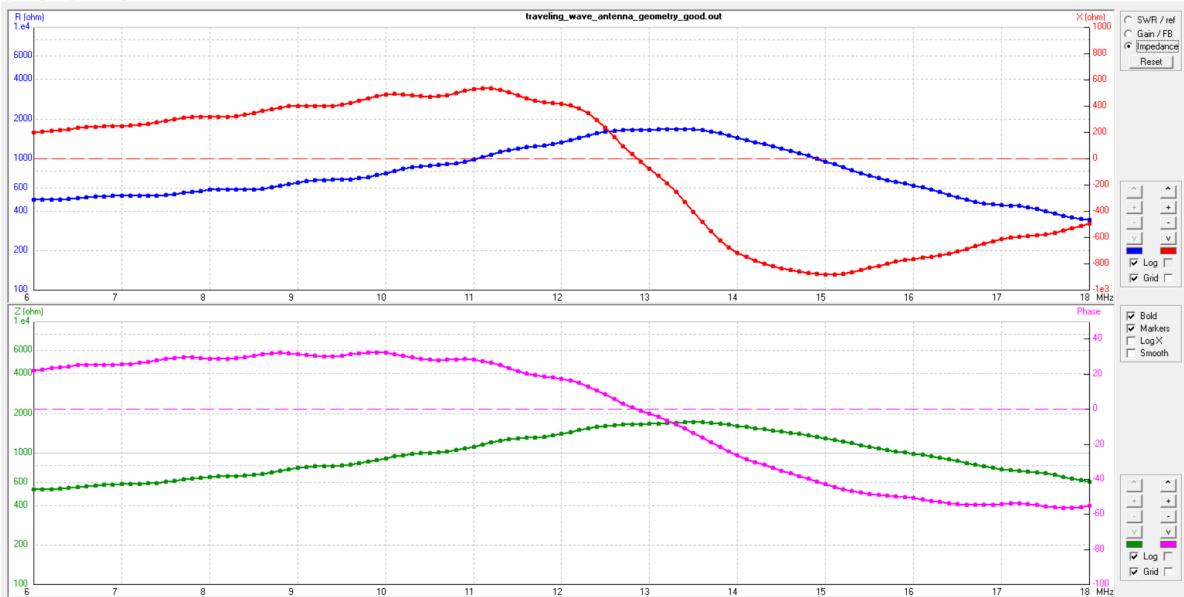
Σχήμα 5.6: (Perfect ground) $Z_{in}(f)$ στο 6–18 MHz για $R_L \approx 775 \Omega$ (επιλογή καλύτερης προσαρμογής).



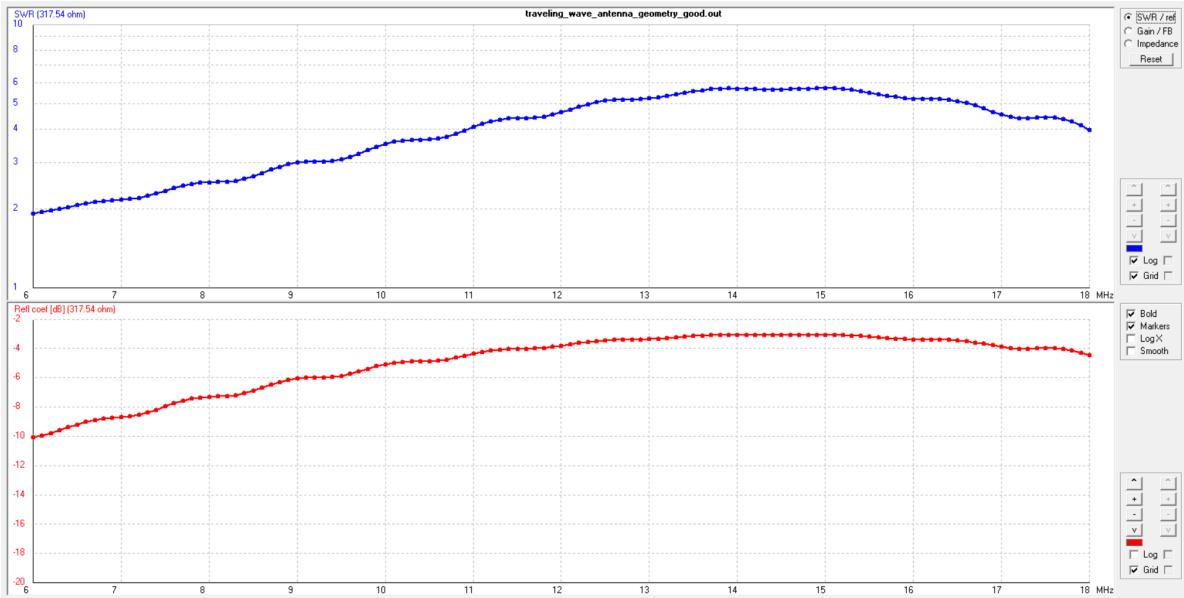
Σχήμα 5.7: (Perfect ground) SWR και ανάκλαση (dB) για $R_L \approx 775 \Omega$.

5.3.4 Μελέτη Τερματισμού σε Good/Fast Ground

Περίπτωση G1: Εκκίνηση με $R_L = 317.54 \Omega$. Στο πραγματικό έδαφος, η αγωγιμότητα και οι διηλεκτρικές απώλειες δρουν σαν επιπλέον απόσβεση κατά μήκος της γραμμής. Αυτό συνήθως μειώνει το βάθος των ταλαντώσεων και ημερεύει την καμπύλη του SWR , γιατί μέρος της ανακλώμενης ενέργειας χάνεται στο περιβάλλον αντί να επιστρέψει ακέραιο προς την τροφοδοσία.



Σχήμα 5.8: (Good ground) $Z_{in}(f)$ στο 6–18 MHz για $R_L = 317.54 \Omega$.

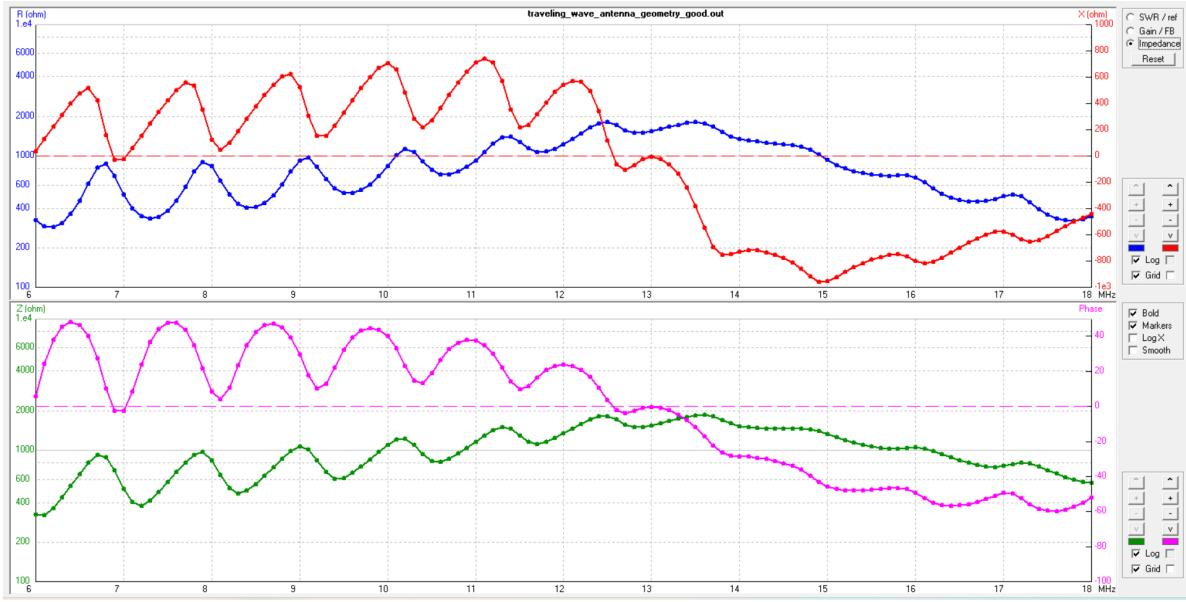


Σχήμα 5.9: (Good ground) SWR και ανάκλαση (dB) για αναφορά $Z_0 = 317.54 \Omega$.

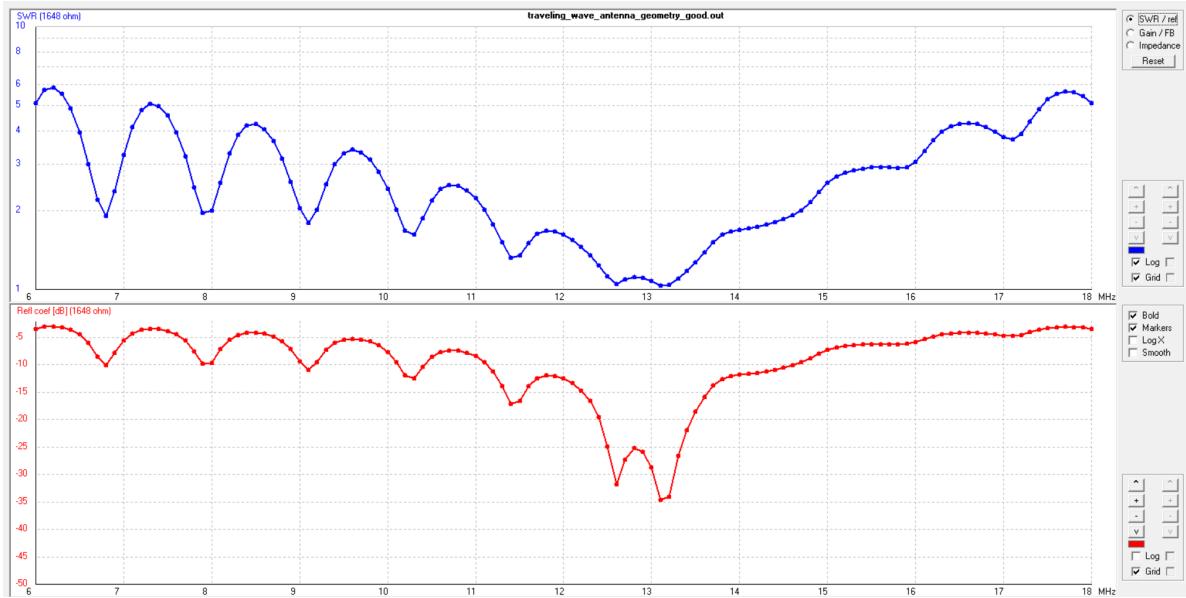
Περίπτωση G2: Συντονισμός βάσει προσομοιωμένων αποτελεσμάτων ($R_L \approx 1648 \Omega$). Στην προσομοίωση με good ground παρατηρείται η εμφάνιση ενός σαφώς καθορισμένου συντονισμού, ο οποίος αντιστοιχεί σε μηδενισμό της άεργης συνιστώσας της αντίστασης εισόδου ($X_{in} \approx 0$) για τερματισμό $R_L \simeq 1648 \Omega$. Παρά την επίτευξη συντονισμού, η απόκριση του SWR εμφανίζει έντονη νευρικότητα ως προς τη συχνότητα, φαινόμενο ανάλογο με εκείνο που παρατηρήθηκε στην περίπτωση perfect ground υπό ακραίο τερματισμό.

Η συμπεριφορά αυτή υποδηλώνει ότι η κεραία παύει να λειτουργεί ως ευρυζωνική διάταξη οδεύοντος κύματος και μεταβαίνει σε καθεστώς στάσιμου κύματος, με ισχυρές ανακλάσεις στο άκρο τερματισμού. Κατά συνέπεια, η ευρυζωνικότητα που χαρακτηρίζει την Beverage υποβαθμίζεται σημαντικά.

Ωστόσο, η συγκεκριμένη επιλογή φορτίου μετατοπίζει το λειτουργικό σημείο της διάταξης και καθιστά φυσική την αξιολόγηση της προσαρμογής με αναφορά $Z_0 = 1648 \Omega$, τιμή που αντιστοιχεί στο φορτίο το οποίο βλέπει αποτελεσματικά η γραμμή υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες εδάφους. Η επιλογή αυτή έχει διαγνωστικό χαρακτήρα και δεν συνιστά βέλτιστη λύση λειτουργίας της κεραίας ως συστήματος οδεύοντος κύματος.



Σχήμα 5.10: (Good ground) $Z_{in}(f)$ στο 6–18 MHz για $R_L \approx 1648 \Omega$ (συντονισμός).



Σχήμα 5.11: (Good ground) SWR και ανάληση (dB) για αναφορά $Z_0 = 1648 \Omega$ και $R_L \approx 1648 \Omega$.

5.3.5 Σύντομη Σύνοψη Επιλογών R_L

Συγκεντρωτικά, η γεωμετρική εκτίμηση δίνει $Z_0 \simeq 317.54 \Omega$ ως αρχική αναφορά. Σε perfect ground, οι τιμές που εντοπίζονται στα plots ($R_L \approx 2925 \Omega$ ως ακραία περίπτωση και $R_L \approx 775 \Omega$ ως πιο ισορροπημένη επιλογή) καταδεικνύουν ότι ο συντονισμός ($X_{in} = 0$) δεν ταυτίζεται κατ' ανάγκη με λειτουργικά χρήσιμη προσαρμογή στο σύνολο του φάσματος.

Σε good ground, ο συντονισμός που εμφανίζεται για $R_L \approx 1648 \Omega$ αποκτά διαγνωστικό ενδιαφέρον, καθώς το έδαφος μεταβάλλει την αποτελεσματική ηλεκτρική συμπεριφορά της διάταξης. Η αντίστοιχη επιλογή Z_0 χρησιμοποιείται αποκλειστικά ως τιμή αναφοράς για την

αξιολόγηση του *SWR* στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας και δεν συνεπάγεται διατήρηση της ευρυζωνικότητας που χαρακτηρίζει την Beverage.

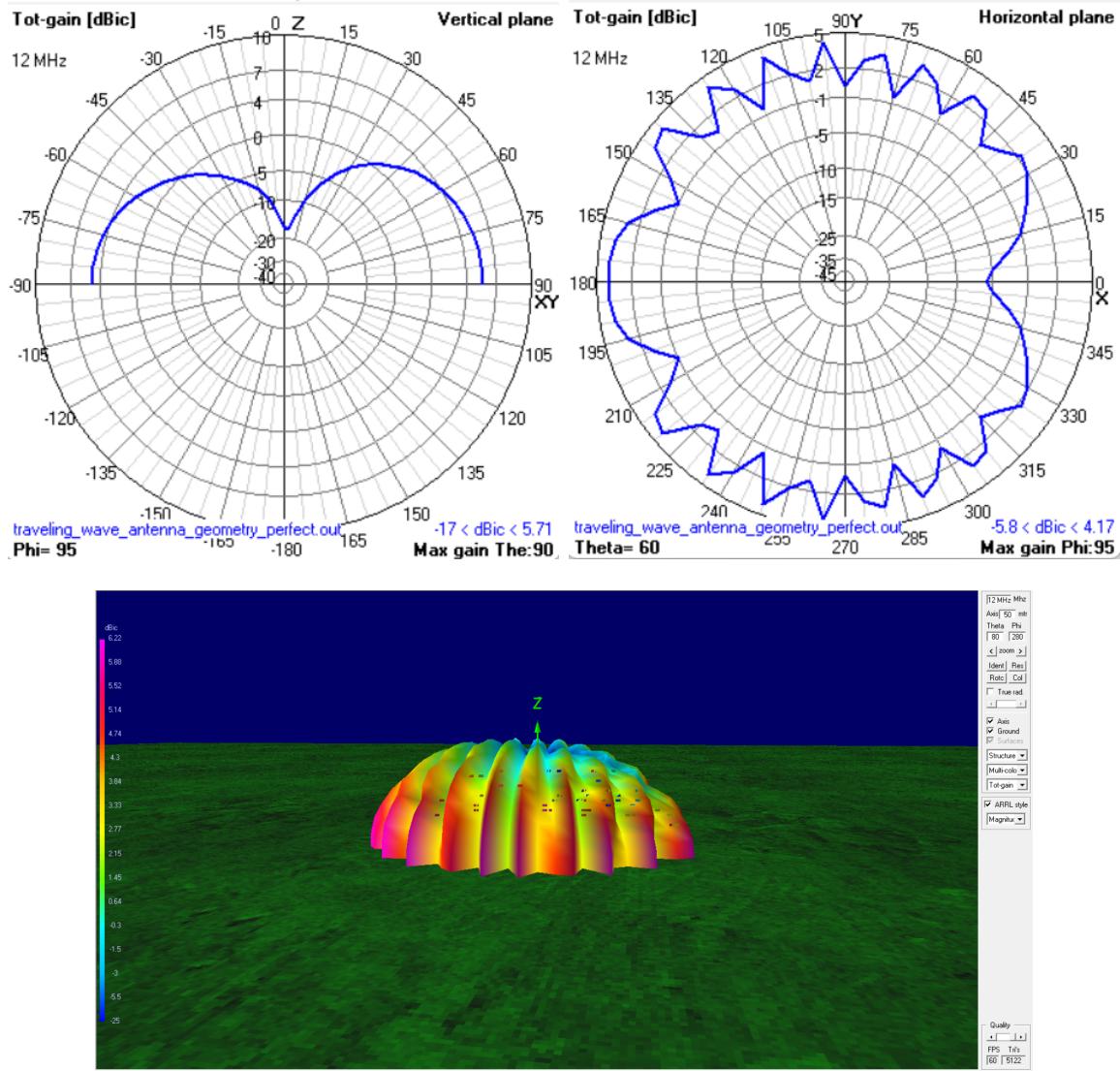
5.4 Ανάλυση Διαγραμμάτων Ακτινοβολίας και Κατευθυντικότητας [Ερώτημα (β)]

Μετά τον καθορισμό των καταλληλότερων τιμών τερματισμού από την ανάλυση προσαρμογής, ακολουθεί η μελέτη της ακτινοβολούμενης ισχύος στο μακρινό πεδίο. Η ανάλυση επικεντρώνεται στις δύο περιπτώσεις, μία για τέλειο έδαφος και μία για πραγματικό έδαφος καλής αγωγιμότητας, με στόχο την αποτύπωση της επίδρασης του υποβάθρου στην κατευθυντικότητα και στο κέρδος της κεραίας οδεύοντος κύματος.

5.4.1 Περίπτωση I: Τέλειο Έδαφος (Perfect Ground)

Σε περιβάλλον ιδανικού αγώγιμου εδάφους, η απουσία απωλειών συνεπάγεται ισχυρές ανακλάσεις κατά μήκος του οριζόντιου αγωγού. Το φαινόμενο αυτό επηρεάζει άμεσα τη μορφή των λοιβών ακτινοβολίας και τη συνολική κατευθυντικότητα της διάταξης.

- **Κατακόρυφο Διάγραμμα (Vertical Plane):** Το κύριο μέγιστο εντοπίζεται στη γωνία $\theta \approx 65^\circ$, δηλαδή σε γωνία ανύψωσης περίπου 25° . Το μέγιστο κέρδος ανέρχεται στα 5.71 dBi.
- **Οριζόντιο Διάγραμμα (Horizontal Plane):** Παρατηρείται έντονα κυματοειδής μορφή με πολλαπλούς πλευρικούς λοιβούς, αποτέλεσμα της ισχυρής ανάκλασης στο άκρο τερματισμού.
- **Τρισδιάστατη Απεικόνιση (3D Pattern):** Η τρισδιάστατη κατανομή αποκαλύπτει δομή με διαδοχικούς λοιβούς κατά μήκος του άξονα του αγωγού, χαρακτηριστική λειτουργίας με στάσιμα κύματα και όχι καθαρού οδεύοντος κύματος.

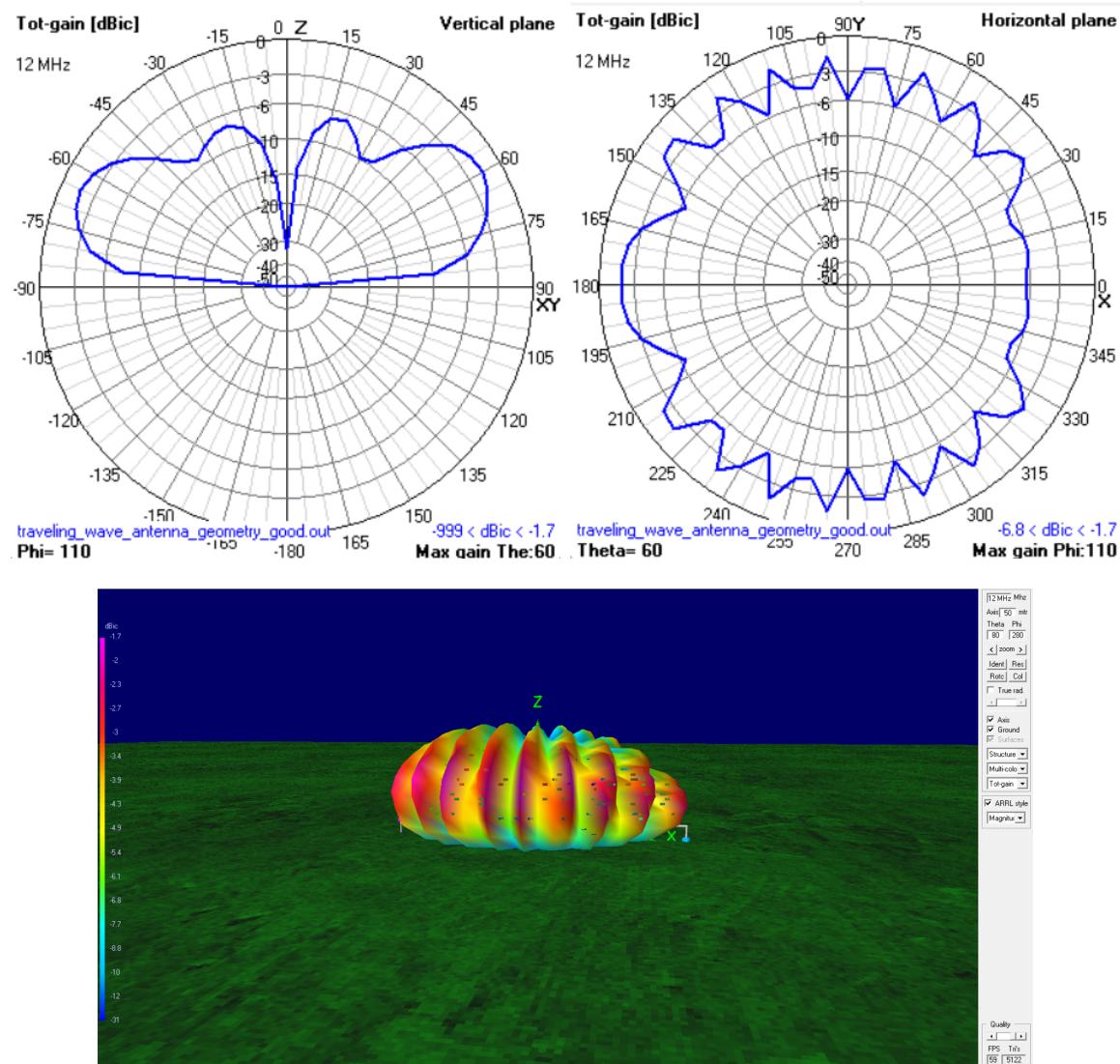


Σχήμα 5.12: Διαγράμματα ακτινοβολίας για Perfect Ground.

5.4.2 Περίπτωση II: Πραγματικό Έδαφος (Good Ground)

Η εισαγωγή πραγματικού εδάφους με πεπερασμένη αγωγιμότητα προκαλεί απόσβεση του οδεύοντος κύματος, μειώνοντας τις ανακλάσεις και εξομαλύνοντας τη συνολική ακτινοβολία της κεραίας.

- Μείωση Κέρδους:** Το μέγιστο κέρδος μειώνεται σημαντικά και λαμβάνει τιμή περίπου -1.7 dBi , καθώς μέρος της ισχύος απορροφάται από το έδαφος.
- Γωνιακή Σταθερότητα:** Παρά τη μείωση του κέρδους, η γωνία μέγιστης ακτινοβολίας παραμένει κοντά στη $\theta \approx 65^\circ$, γεγονός που υποδεικνύει ότι το ύψος $h = \lambda/4$ καθορίζει κυρίως τη γεωμετρία του λοβού.
- Οριζόντιο Διάγραμμα:** Η κατανομή εμφανίζεται αισθητά εξομαλυμένη, με περιορισμένες διακυμάνσεις, ένδειξη καλύτερης απορρόφησης στο φορτίο και βελτιωμένου λόγου εμπρός-προς-πίσω.
- Τρισδιάστατη Απεικόνιση:** Η 3D απεικόνιση παρουσιάζει πιο συμπαγή και ομαλή μορφή, προσεγγίζοντας τη χαρακτηριστική συμπεριφορά κεραίας Beverage.



Σχήμα 5.13: Διαγράμματα ακτινοβολίας για Good Ground.

5.4.3 Σύντομα συμπεράσματα από τα διαγράμματα ακτινοβολίας (12 MHz)

- **Perfect ground:** Τα διαγράμματα είναι πιο «συμμετρικά» και παρουσιάζουν έντονη χυμάτωση, χωρίς καθαρή εμπρόσθια κλίση στο καταχόρυφο επίπεδο. Η συμπεριφορά αυτή αντιστοιχεί σε πιο στασιμή λειτουργία (ισχυρές ανακλάσεις και παρεμβολές) και συνεπάγεται μειωμένη πρακτική κατευθυντικότητα.
- **Good / fast ground:** Στο ερτισαλ πλανε ο κύριος λοβός εμφανίζει σαφή κλίση προς χαμηλές γωνίες ανύψωσης, γεγονός που δείχνει ότι δεν είναι συμμετρικός ως προς τον ορίζοντα. Παράλληλα, στο *horizontal plane* η ακτινοβολία είναι *ενισχυμένη* προς τη διεύθυνση διάδοσης / τερματισμού και εμφανίζεται πιο αδύναμη προς τα πίσω, οδηγώντας σε καλύτερο λόγο front-to-back. Η εικόνα αυτή είναι συνεπής με λειτουργία οδεύοντος κύματος σε κεραία Beverage, όπου οι απώλειες του εδάφους «σπάνε» την ιδανική συμμετρία και επιτρέπουν την εμφάνιση της απαιτούμενης κλίσης του μετώπου κύματος (wave tilt).
- **Κέρδος:** Από τα plots προκύπτει ότι το good ground δίνει χαμηλότερες τιμές total-gain σε σχέση με το perfect, κάτι που είναι αναμενόμενο λόγω των *ground losses*. Παρ' όλα αυτά, η κατευθυντική συμπεριφορά που προκύπτει είναι σαφώς πιο χρήσιμη και σύμφωνη με τη φυσική λειτουργία μιας Beverage κεραίας.

Βιβλιογραφία

- [1] Elearning Ασκήσεις και Θεωρία 058 Κεραίες και Διάδοση
- [2] Λογισμικά 4NEC2 <http://www.qsl.net/4nec2/> και MATLAB R2025b
- [3] Constantine A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd Edition, Wiley Interscience, 2005.