



ARISTOTLE
UNIVERSITY
OF THESSALONIKI

Aristotle University of Thessaloniki
Department of Electrical and Computer Engineering

Καράτης Δημήτριος 10775, karatisd@ece.auth.gr

ΚΕΡΑΙΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ

Εργασία 2 (2025-2026)

Περιεχόμενα

1 Θέμα 1: Ανάλυση Δισκοκωνικής Κεραίας	4
1.1 Εισαγωγή και Θεωρητικό Ύπόβαθρο	4
1.2 Ερώτημα (α): Σύνθετη Αντίσταση Εισόδου και Συντελεστής Ανάκλασης	4
1.2.1 Σύνθετη Αντίσταση Εισόδου (Z_{in})	6
1.2.2 Συντελεστής Ανάκλασης (Γ) και Προσαρμογή	6
1.2.3 Βελτιστοποίηση με $Z_0 = 110\Omega$	7
1.3 Ερώτημα (β): Διαγράμματα Ακτινοβολίας ($f_0, 2f_0, 3f_0, 4f_0$)	10
1.3.1 Μεθοδολογία και Χαρακτηριστικά Ακτινοβολίας	10
1.3.2 Ανάλυση Οριζόντιων Διαγραμμάτων Ακτινοβολίας	12
1.3.3 Ανάλυση Κατακόρυφων Διαγραμμάτων Ακτινοβολίας	13
1.3.4 Αποτελέσματα και Παρατηρήσεις	13
1.3.5 Συμπεράσματα Κατακόρυφης Ακτινοβολίας	15
1.3.6 Τρισδιάστατη Απεικόνιση Ακτινοβολίας (3D Patterns)	15
2 Θέμα 2: Ανάλυση Ελικοειδούς Κεραίας	17
2.1 Εισαγωγή και Θεωρητικό Ύπόβαθρο	17
2.2 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά και Μοντελοποίηση	17
2.3 Ερώτημα (α): Σύνθετη Αντίσταση και Συντελεστής Στασίμων Κυμάτων (SWR)	20
2.3.1 Παρατηρήσεις επί της Σύνθετης Αντίστασης	20
2.3.2 Συντελεστής Στασίμων Κυμάτων (SWR) και Προσαρμογή	20
2.3.3 Πρόταση Βέλτιστης Προσαρμογής	22
2.4 Ερώτημα (β): Συντελεστής Ανάκλασης και Ευρυζωνικότητα με $Z_0 = 210\Omega$	22
2.4.1 Ανάλυση Συντελεστή Ανάκλασης ($ S_{11} $)	22
2.4.2 Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR)	23
2.4.3 Σχολιασμός Ευρυζωνικότητας	23
2.5 Ερώτημα (γ): Διαγράμματα Ακτινοβολίας και Μεταβολή Κέρδους	24
2.5.1 Κανονικός Ρυθμός Λειτουργίας ($f = 80$ MHz)	24
2.5.2 Μετάβαση και Κεντρική Συχνότητα ($f = 280 - 400$ MHz)	26
2.5.3 Μέγιστη Απόδοση και Ύψηλές Συχνότητες ($f = 520 - 1200$ MHz)	26
2.5.4 Συμπεράσματα	28
3 Θέμα 3α: Ανάλυση Αναδιπλωμένου Διπόλου	29
3.1 Εισαγωγή και Φυσική Ερμηνεία	29
3.2 Γεωμετρία και Δυναμική Κατάτμηση στο 4nec2	29
3.2.1 Στρατηγική Κατάτμησης	30
3.3 Ερώτημα (α): Ανάλυση Σύνθετης Αντίστασης Εισόδου	31
3.3.1 Περίπτωση $s = \lambda/100$ (0.05 m)	32
3.3.2 Περίπτωση $s = \lambda/20$ (0.25 m)	33
3.3.3 Περίπτωση $s = \lambda/4$ (1.25 m)	33

3.3.4	Στρατηγική Διερεύνησης Προσαρμογής	34
3.4	Ανάλυση Προσαρμογής: Περίπτωση $s = \lambda/100$	35
3.4.1	Παρατηρήσεις και Αποτελέσματα	35
3.4.2	Συμπεράσματα Περίπτωσης 1	36
3.5	Ανάλυση Προσαρμογής: Περίπτωση $s = \lambda/20$	36
3.5.1	Προσαρμογή στο σημείο συντονισμού των 53 MHz	36
3.5.2	Προσαρμογή στο σημείο συντονισμού των 67 MHz	37
3.5.3	Συνολική Αξιολόγηση Περίπτωσης 2	38
3.6	Ανάλυση Προσαρμογής: Περίπτωση $s = \lambda/4$	39
3.6.1	Δοκιμή στα 43.5 MHz και 85.5 MHz ($Z_0 \approx 230, 205 \Omega$)	39
3.6.2	Δοκιμή στα 57.5 MHz ($Z_0 = 800 \Omega$)	40
3.6.3	Συνολική Αξιολόγηση Περίπτωσης 3	41
3.7	Επιλογή Παραμέτρων για την Ανάλυση Ακτινοβολίας	42
3.7.1	Τελικές Τιμές Προσομοίωσης ανά Περίπτωση	42
3.7.2	Εξαγωγή Διαγραμμάτων Ακτινοβολίας	42
4	Θέμα 3β: Ανάλυση Κεραίας Οδεύοντος Κύματος	46
4.1	Γεωμετρία και Ρεαλιστική Μοντελοποίηση	46
4.2	Ανάλυση Κατάτμησης (Segmentation)	47
4.3	Βελτιστοποίηση Αντίστασης Τερματισμού (R_L)	48
4.4	Συγκριτική Αξιολόγηση Αντιστάσεων Τερματισμού (R_L) υπό συνθήκες Perfect Ground	48
4.4.1	Περίπτωση 1: Θεωρητική Τιμή ($R_L = 317.5 \Omega$)	48
4.4.2	Περίπτωση 2: Τιμή Ακραίου Συντονισμού ($R_L = 2943 \Omega$)	50
4.4.3	Περίπτωση 3: Βέλτιστη Τιμή Προσαρμογής ($R_L = 800 \Omega$)	52
4.5	Ανάλυση υπό συνθήκες Πραγματικού Εδάφους (Fast Ground - Good)	54
4.5.1	Περίπτωση 1: Θεωρητική Τιμή ($R_L = 317.5 \Omega$)	54
4.5.2	Περίπτωση 2: Τιμή Ακραίου Συντονισμού ($R_L = 1329 \Omega$)	55
4.5.3	Περίπτωση 3: Βέλτιστη Τιμή Προσαρμογής ($R_L = 600 \Omega$)	57
4.5.4	Συγκριτικά Συμπεράσματα Εδάφους	58
4.6	Ανάλυση Διαγραμμάτων Ακτινοβολίας και Κατευθυντικότητας	59
4.6.1	Περίπτωση I: Τέλειο Έδαφος (Perfect Ground, $R_L = 800 \Omega$)	59
4.6.2	Περίπτωση II: Πραγματικό Έδαφος (Good Ground, $R_L = 600 \Omega$)	60
4.6.3	Συμπεράσματα και Τελική Αξιολόγηση	62
Αναφορές		63

1 Θέμα 1: Ανάλυση Δισκοκωνικής Κεραίας

1.1 Εισαγωγή και Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η παρούσα μελέτη αφορά τη σχεδίαση και την υπολογιστική ανάλυση μιας δισκοκωνικής κεραίας, η οποία αποτελεί μια κλασική περίπτωση κεραίας ευρείας ζώνης. Η κεραία αποτελείται από έναν οριζόντιο δίσκο και έναν κώνο στη βάση, οι οποίοι στην προκειμένη περίπτωση μοντελοποιούνται με ακτινωτά σύρματα (wire models).

Σύμφωνα με το επώνυμό μου (Καράτης), η συχνότητα σχεδίασης ορίζεται στα $f_0 = 0.5 \text{ GHz}$, με μήκος κύματος $\lambda = 0.6 \text{ m}$. Η τροφοδοσία της κεραίας γίνεται στο κεντρικό σημείο σύνδεσης μεταξύ δίσκου και κώνου, όπου ο δίσκος συνδέεται στον εσωτερικό αγωγό ομοαξονικού καλωδίου και ο κώνος στη θωράκιση/γείωση.

Οι γεωμετρικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του μοντέλου στο 4neC2 είναι:

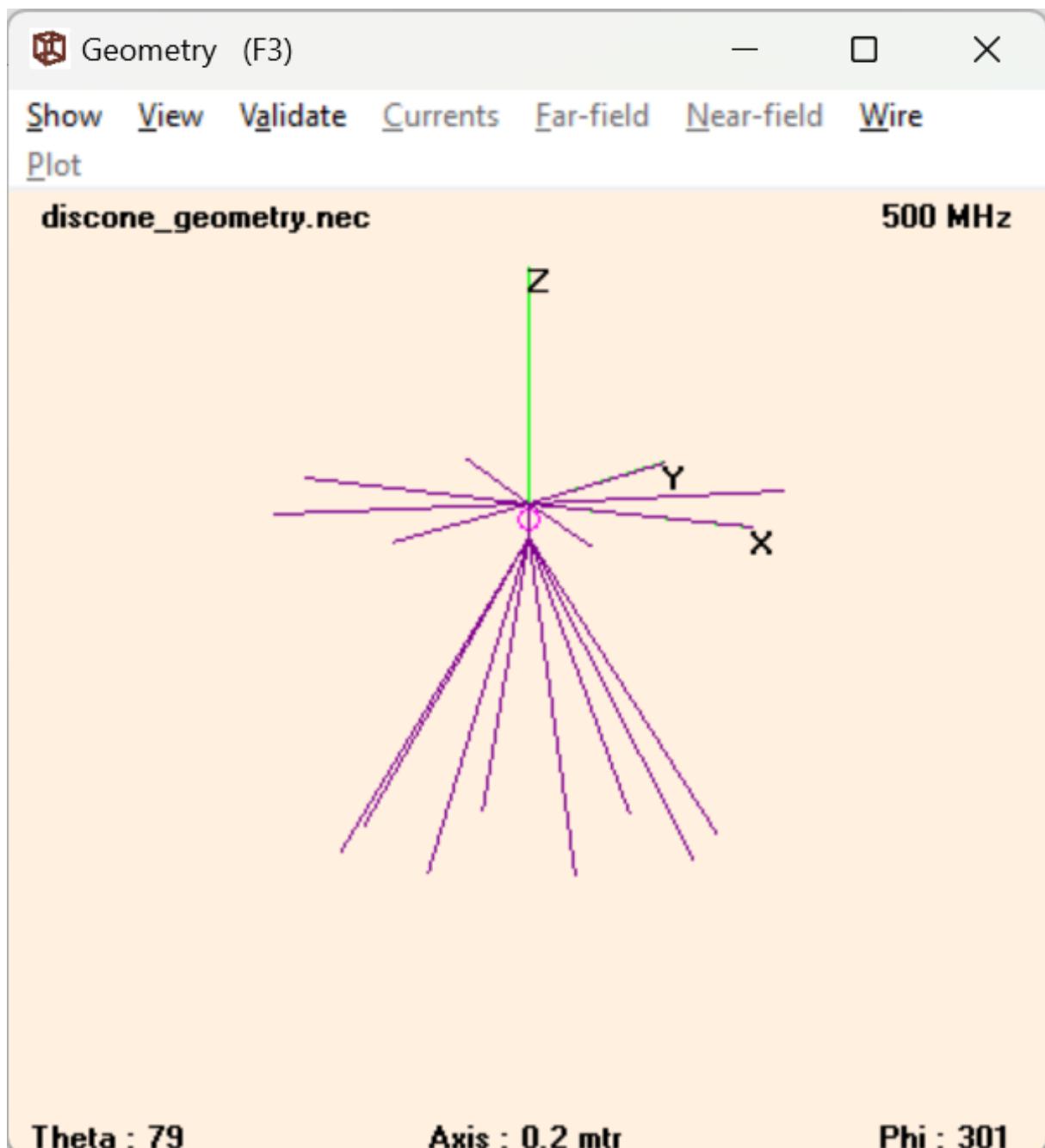
- Ακτίνα δίσκου: $R_d = 0.34\lambda = 0.204 \text{ m}$.
- Μήκος συρμάτων κώνου: $L_c = 0.5\lambda = 0.3 \text{ m}$.
- Συνολική γωνία ανοίγματος κώνου: $2\theta_0 = 60^\circ$.
- Διάμετρος συρμάτων: $d = \lambda/200 = 0.003 \text{ m}$.
- Απόσταση τροφοδοσίας: $Gap = \lambda/20 = 0.03 \text{ m}$.

1.2 Ερώτημα (α): Σύνθετη Αντίσταση Εισόδου και Συντελεστής Ανάκλασης

Για την ανάλυση της συμπεριφοράς της κεραίας, πραγματοποιήθηκε σάρωση συχνότητας (frequency sweep) στο εύρος από $0.5f_0$ (0.25 GHz) έως $4f_0$ (2 GHz) με βήμα 10 MHz . Η συγκεκριμένη επιλογή διασφαλίζει ότι το μέγεθος κάθε τμήματος ΔL παραμένει αυστηρά μικρότερο από $\lambda/10$ για το μεγαλύτερο μέρος του υπό εξέταση φάσματος. Ακόμη και στην ανώτατη συχνότητα των 2 GHz , όπου το μήκος κύματος μειώνεται στα 15 cm , η διακριτοποίηση διατηρείται κοντά στο $\lambda/8$ ($\Delta L \approx 1.58 \text{ cm}$ για τον κώνο), τιμή που βρίσκεται εντός των ορίων υψηλής ακρίβειας του αλγορίθμου. Η στρατηγική αυτή εγγυάται τη σταθερότητα και τη σύγκλιση της μεθόδου των ροπών (MoM), αποφεύγοντας ταυτόχρονα υπερβολικά μικρά τμήματα που θα προκαλούσαν αριθμητική αστάθεια λόγω της πεπερασμένης ακτίνας των συρμάτων.

Ακολουθώντας την υπόδειξη της εργασίας, η γεωμετρία της κεραίας δεν σχεδιάστηκε χειροκίνητα, αλλά παρήχθη αυτόματα μέσω script σε περιβάλλον MATLAB. Ο κώδικας χρησιμοποιεί επαναληπτικές δομές για τον υπολογισμό των συντεταγμένων των 8 ακτινωτών συρμάτων του δίσκου και

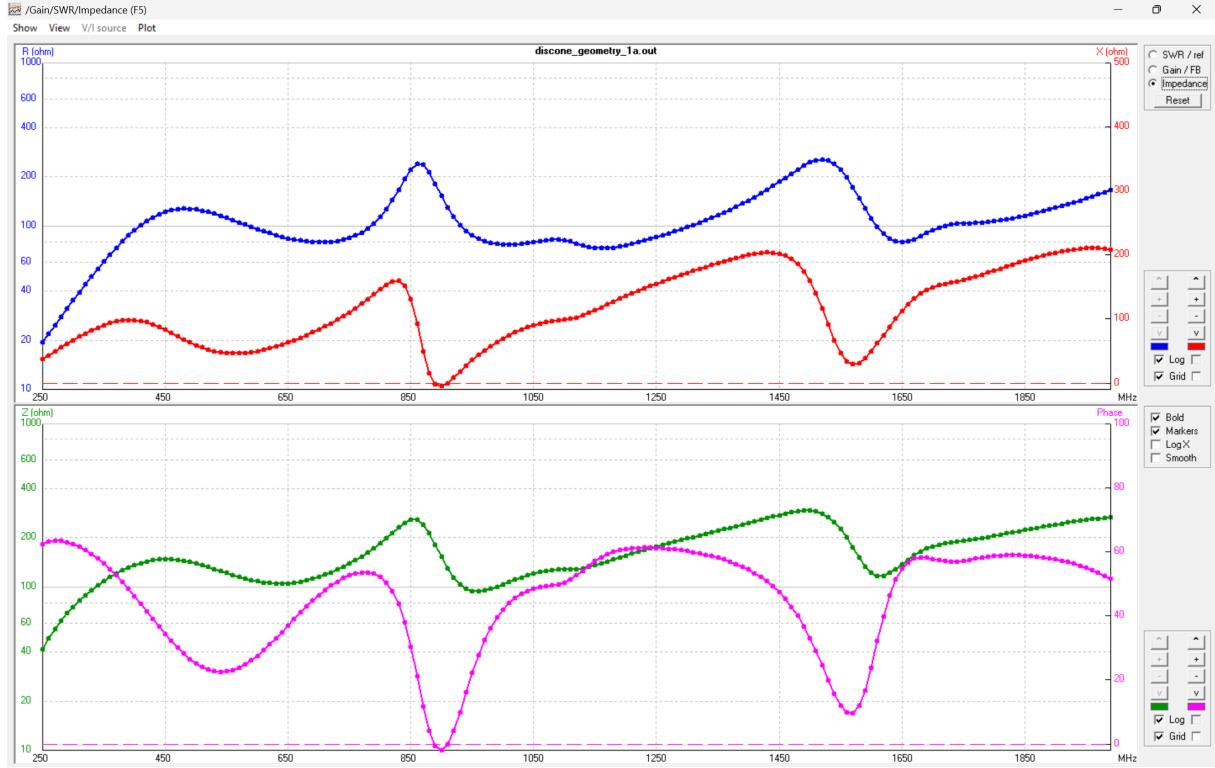
των 8 συρμάτων του κώνου, εκτυπώνοντας τις αντίστοιχες εντολές γεωμετρίας GW, κλπ απευθείας σε αρχείο εισόδου .nec. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η απόλυτη ακρίβεια στις γωνίες ανοίγματος και στα μήκη των συρμάτων βάσει του λ . Τα σχετικά αρχεία είναι τα antennas_1.m και discone_geometry.nec, ενώ, παρακάτω μπορούμε να δούμε την γεωμετρία της κεραίας του πρώτου ερωτήματος που προέκυψε με χρήση τους.



Σχήμα 1: Η γεωμετρία της δισκοκωνικής κεραίας στο 4nec2

1.2.1 Σύνθετη Αντίσταση Εισόδου (Z_{in})

Η σύνθετη αντίσταση εισόδου $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$ υπολογίστηκε μέσω του 4nec2. Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται η μεταβολή του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της αντίστασης.

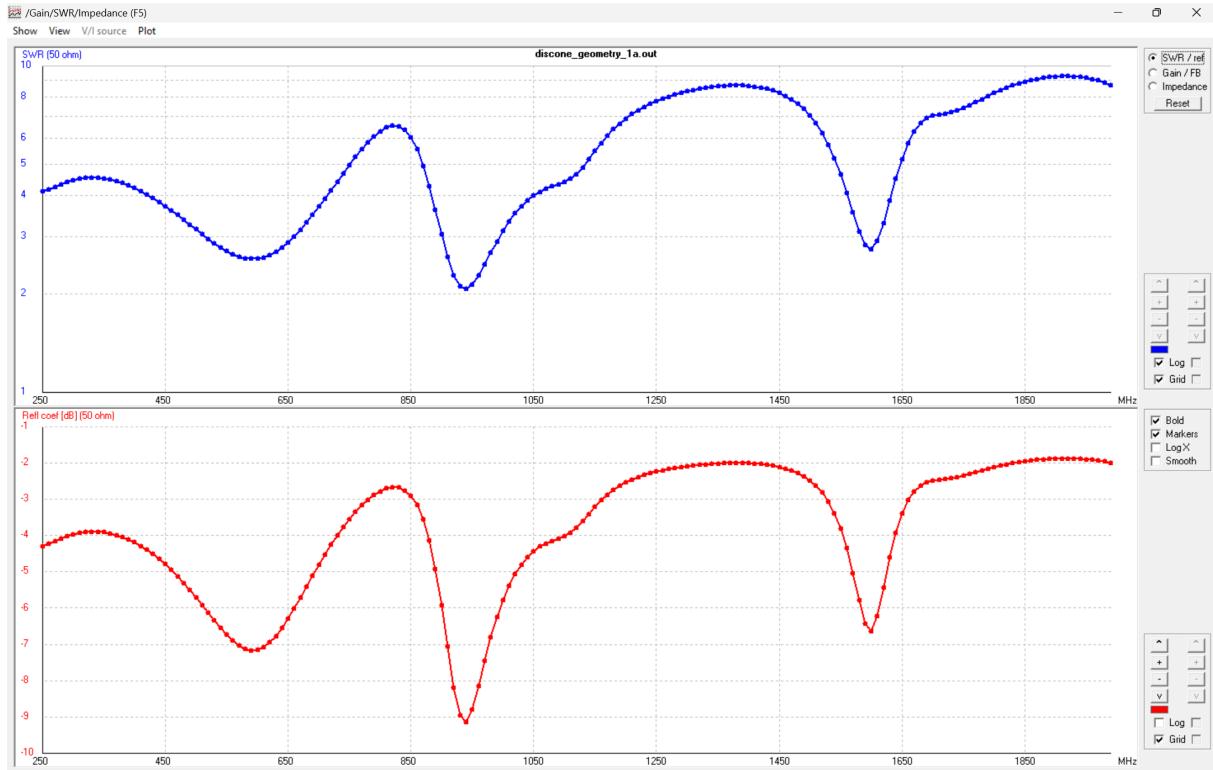


Σχήμα 2: Σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_{in} (Πραγματικό μέρος R και Φανταστικό μέρος X) στο εύρος 0.25 – 2 GHz.

Παρατηρούμε ότι η πραγματική αντίσταση (R_{in}) παρουσιάζει περιοδικές διακυμάνσεις, με τιμές που κυμαίνονται από 20Ω έως και πάνω από 200Ω . Η μέση τιμή της αντίστασης ακτινοβολίας σε όλη τη ζώνη είναι σημαντικά υψηλότερη από τα 50Ω . Το φανταστικό μέρος (X_{in}) παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, με εναλλαγές μεταξύ επαγωγικής και χωρητικής συμπεριφοράς, επιβεβαιώνοντας ότι η δισκοκωνική δομή λειτουργεί ως «μονόπολο μεταβλητής διαμέτρου», το οποίο παρουσιάζει πολλαπλούς συντονισμούς.

1.2.2 Συντελεστής Ανάκλασης (Γ) και Προσαρμογή

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ανάκλασης, χρησιμοποιήθηκε αρχικά χαρακτηριστική αντίσταση γραμμής τροφοδοσίας $Z_0 = 50\Omega$. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτήν την θεώρηση φαίνονται παρακάτω.



Σχήμα 3: Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR) και Συντελεστής Ανάκλασης για $Z_0 = 50\Omega$.

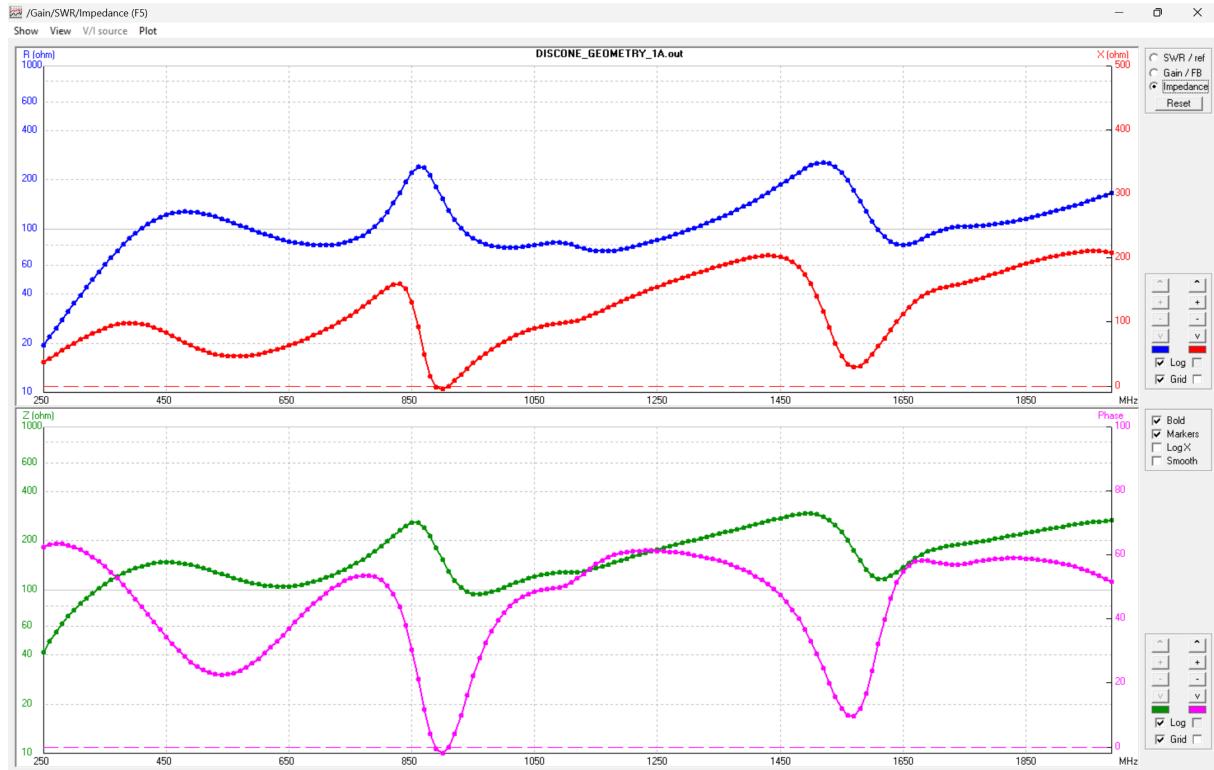
Από το Σχήμα 3, παρατηρούμε ότι για $Z_0 = 50\Omega$ η προσαρμογή δεν είναι ιδανική σε όλο το φάσμα, καθώς ο SWR λαμβάνει τιμές από 2 έως 8. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η δισκοκωνική κεραία, λόγω της γεωμετρίας της, τείνει να παρουσιάζει υψηλότερη χαρακτηριστική αντίσταση εισόδου.

Πρόταση Βελτιστοποίησης: Με βάση την ανάλυση της Z_{in} , προκύπτει ότι η προσαρμογή θα βελτιωνόταν σημαντικά αν χρησιμοποιούσαμε γραμμή μεταφοράς με υψηλότερη χαρακτηριστική αντίσταση (π.χ. $Z_0 = 75\Omega$ με $Z_0 = 120\Omega$). Στην περίπτωση αυτή, ο συντελεστής ανάκλασης θα διατηρούνταν σε χαμηλότερα επίπεδα ($< -10 \text{ dB}$) για μεγαλύτερο μέρος της ζώνης $0.5f_0 - 4f_0$, αναδεικνύοντας τον πραγματικά ευρυζωνικό χαρακτήρα της κεραίας.

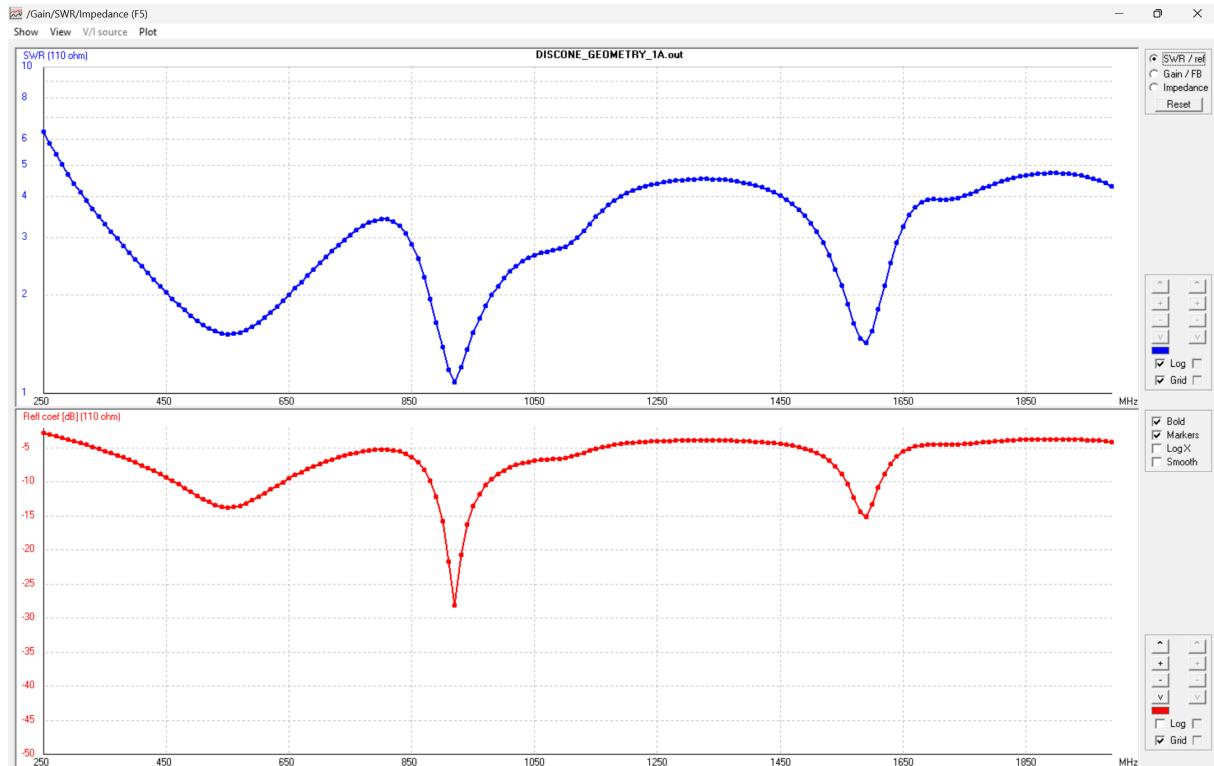
1.2.3 Βελτιστοποίηση με $Z_0 = 110\Omega$

Όπως παρατηρήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η τροφοδοσία της κεραίας με γραμμή 50Ω οδήγησε σε υψηλές τιμές SWR, καθιστώντας την προσαρμογή μη αποδεκτή για το μεγαλύτερο μέρος του φάσματος.

Αναλύοντας το πραγματικό μέρος της σύνθετης αντίστασης εισόδου (R_{in}), διαπιστώθηκε ότι η μέση τιμή της κυμαίνεται σε επίπεδα άνω των 100Ω . Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε νέα ανάλυση επιλέγοντας χαρακτηριστική αντίσταση γραμμής τροφοδοσίας $Z_0 = 110\Omega$. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.



Σχήμα 4: Σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_{in} στο εύρος 0.25 – 2 GHz (ταυτόσημη με την προηγούμενη ανάλυση, καθώς η Z_{in} είναι εγγενής ιδιότητα της κεραίας).



Σχήμα 5: Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR) και Συντελεστής Ανάκλασης (dB) για $Z_0 = 110\Omega$.

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων:

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων (Σχήμα 5) προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- **Βελτίωση Προσαρμογής:** Ο Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR) παρουσιάζει θεαματική πτώση. Ενώ με τη χαρακτηριστική αντίσταση των 50Ω ο SWR ξεπερνούσε την τιμή 4 στο μεγαλύτερο μέρος της ζώνης, με την επιλογή των 110Ω σταθεροποιείται σε τιμές κάτω του 2.5 (Η τιμή $SWR \leq 2$ αποτελεί αποδεκτό κριτήριο για την εύρυθμη λειτουργία μιας κεραίας).
- **Συντελεστής Ανάκλασης:** Ο συντελεστής ανάκλασης $|\Gamma|$ σε dB (κάτω γράφημα) εμφανίζει πλέον σημαντικές περιοχές όπου οι τιμές είναι κάτω από το κρίσιμο όριο των -10 dB . Συγκεκριμένα, παρατηρείται ένας πολύ βαθύς συντονισμός κοντά στα 900 MHz (όπου ο $|\Gamma|$ αγγίζει τα -30 dB , υποδηλώνοντας σχεδόν μηδενικές απώλειες επιστροφής), ένας δεύτερος κοντά στα 1600 MHz (στα -15 dB) και μια τρίτη πιο αδύναμη περιοχή συντονισμού κοντά στα 550 MHz .
- **Επιβεβαίωση Ευρυζωνικότητας και Λειτουργίας:** Η επιλογή των 110Ω αναδεικνύει τον πραγματικό ευρυζωνικό χαρακτήρα της δισκοκωνικής κεραίας. Η κεραία παρουσιάζει αποδεκτή λειτουργία σε ένα εύρος που καλύπτει τρεις οκτάβες ($0.25 - 2\text{ GHz}$), επιβεβαιώνοντας τη θεωρία που τη θέλει να συμπεριφέρεται ως «μονόπολο μεταβλητής διαμέτρου». Λόγω της κωνικής γεωμετρίας, κάθε συχνότητα «βλέπει» διαφορετική ενεργή διάμετρο στην κεραία, επιτρέποντας πολλαπλούς συντονισμούς σε ένα εξαιρετικά ευρύ φάσμα.

Συμπερασματικά, η δισκοκωνική κεραία απαιτεί γραμμή τροφοδοσίας υψηλότερης σύνθετης αντίστασης από την τυπική των 50Ω για να αποδώσει τα ευρυζωνικά χαρακτηριστικά της. Η τιμή των 110Ω αποτελεί μια πολύ καλή συμβιβαστική λύση για τη συγκεκριμένη γεωμετρία.

1.3 Ερώτημα (β): Διαγράμματα Ακτινοβολίας (f_0 , $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$)

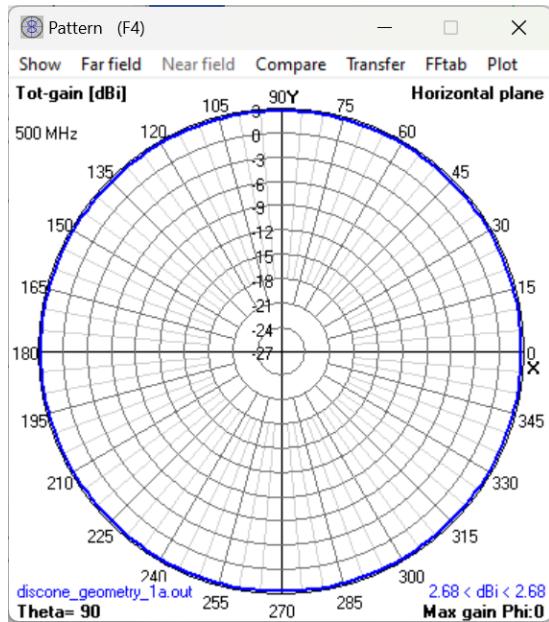
Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η επίδραση της συχνότητας λειτουργίας στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της δισκοκωνικής κεραίας. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για την κεντρική συχνότητα σχεδίασης $f_0 = 500 MHz$, καθώς και για τις αρμονικές συχνότητες $2f_0$ (1 GHz), $3f_0$ (1.5 GHz) και $4f_0$ (2 GHz).

1.3.1 Μεθοδολογία και Χαρακτηριστικά Ακτινοβολίας

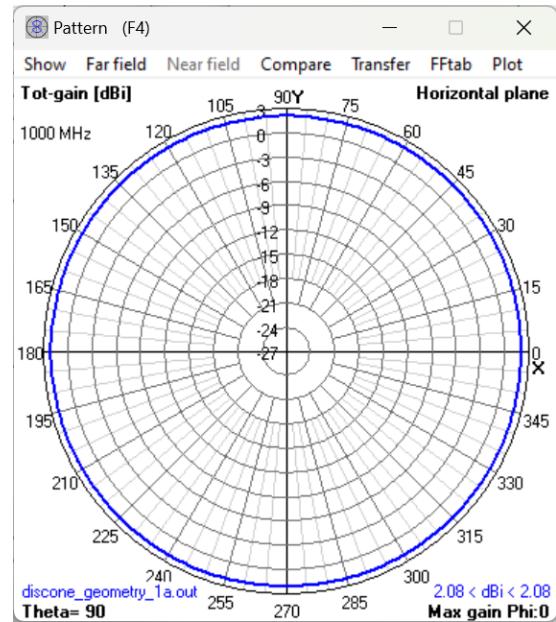
Για κάθε μία από τις προαναφερθείσες συχνότητες, υπολογίστηκε το διάγραμμα ακτινοβολίας στο μακρινό πεδίο (Far Field) με χρήση του 4nec2. Λόγω της κυλινδρικής συμμετρίας της διάταξης, η κεραία αναμένεται να παρουσιάζει πανκατευθυντική (omnidirectional) συμπεριφορά στο οριζόντιο επίπεδο (XY-plane). Το ενδιαφέρον της μελέτης εστιάζεται στο κατακόρυφο επίπεδο (elevation pattern), όπου η αύξηση της συχνότητας αναμένεται να προκαλέσει τα εξής φαινόμενα:

- **Lobing (Δημιουργία δευτερευόντων λοβών):** Καθώς η συχνότητα αυξάνεται, η κεραία καθίσταται ηλεκτρικά μεγαλύτερη σε σχέση με το μήκος κύματος λ , με αποτέλεσμα ο κύριος λοβός να «διασπάται» σε περισσότερους δευτερεύοντες.
- **Beam Tilting (Κλίση δέσμης):** Στις υψηλές συχνότητες, η γωνία μέγιστης ακτινοβολίας τείνει συχνά να μετατοπίζεται μακριά από τον ορίζοντα (προς τον άξονα Z), κάτι που αποτελεί σημαντικό περιορισμό για εφαρμογές επικοινωνίας εδάφους.

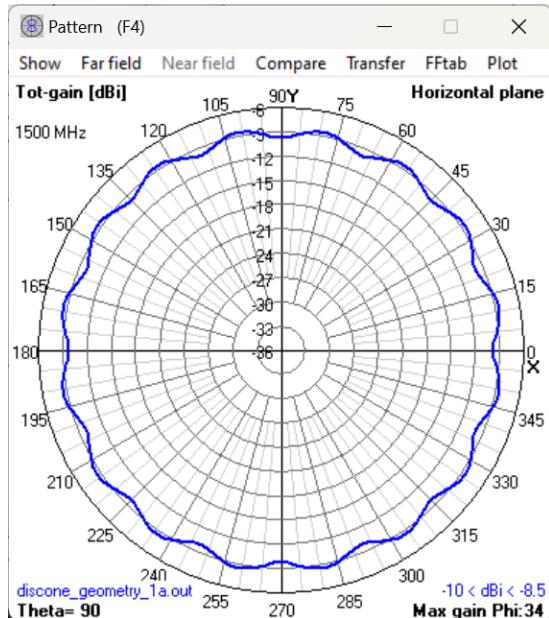
Παρακάτω παρατίθενται τα οριζόντια διαγράμματα ακτινοβολίας σε 2D μορφή, όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις στο 4nec2.



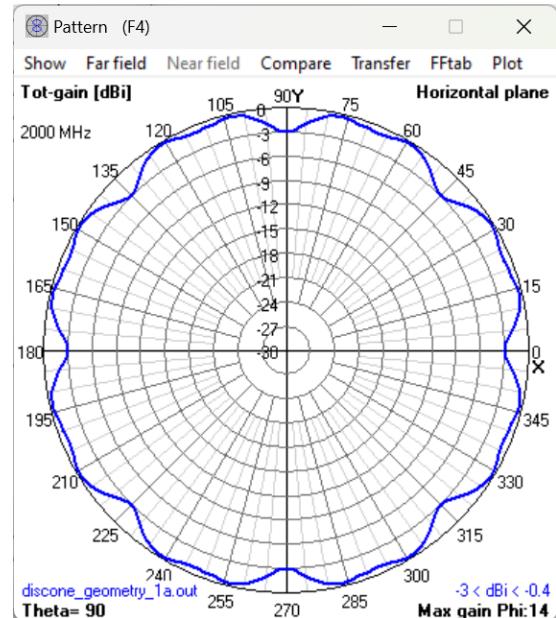
(α') 500 MHz (f_0)



(β') 1000 MHz ($2f_0$)



(γ') 1500 MHz ($3f_0$)



(δ') 2000 MHz ($4f_0$)

Σχήμα 6: Οριζόντια διαγράμματα ακτινοβολίας (Gain dBi) για τις εξεταζόμενες συχνότητες.

1.3.2 Ανάλυση Οριζόντιων Διαγραμμάτων Ακτινοβολίας

Στην παρούσα υποενότητα αναλύονται τα οριζόντια διαγράμματα ακτινοβολίας (Horizontal Plane, $\theta = 90^\circ$) για το εύρος συχνοτήτων f_0 έως $4f_0$. Από τα προσομοιωμένα αποτελέσματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1. **Πανκατευθυντική Συμπεριφορά (Omnidirectionality):** Στις χαμηλές συχνότητες (f_0 και $2f_0$), η κεραία παρουσιάζει σχεδόν τέλεια κυκλική συμμετρία. Στα 500 MHz, η απολαβή είναι σταθερή κοντά στα 2.68 dBi σε όλο το εύρος των 360° .
2. **Εμφάνιση Διακυμάνσεων (Gain Ripples):** Καθώς η συχνότητα αυξάνεται προς τα 1500 MHz ($3f_0$) και τα 2000 MHz ($4f_0$), το διάγραμμα αρχίζει να παρουσιάζει χαρακτηριστικές διακυμάνσεις. Συγκεκριμένα:
 - Παρατηρούνται 8 διακριτοί λοβοί, οι οποίοι αντιστοιχούν απευθείας στα 8 ακτινωτά σύρματα (wires) που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση του κώνου και του δίσκου.
 - Στα 2000 MHz, η διακύμανση της απολαβής κυμαίνεται μεταξύ -3 dBi και -0.4 dBi. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις υψηλές συχνότητες, η ηλεκτρική απόσταση μεταξύ των συρμάτων αυξάνεται, με αποτέλεσμα το συρμάτινο πλέγμα να μην συμπεριφέρεται πλέον ως συμπαγής αγώγιμη επιφάνεια.
3. **Μείωση Απολαβής στον Ορίζοντα:** Παρατηρείται μια σταδιακή μείωση της μέγιστης απολαβής στο επίπεδο $\theta = 90^\circ$ καθώς ανεβαίνουμε σε συχνότητα:
 - f_0 : 2.68 dBi
 - $2f_0$: 2.08 dBi
 - $3f_0$: -8.5 dBi (σημαντική πτώση)
 - $4f_0$: -0.4 dBi

Η δραματική μείωση στα 1.5 GHz και η μεταβολή στα 2 GHz υποδηλώνουν ότι ο κύριος λοβός ακτινοβολίας έχει υποστεί «ανύψωση» (beam tilting) μακριά από το επίπεδο του ορίζοντα, φαινόμενο που θα εξεταστεί λεπτομερέστερα στα κατακόρυφα διαγράμματα.

Επιρροή του Αριθμού των Συρμάτων στη Μοντελοποίηση

Αξίζει να σημειωθεί ότι η εμφάνιση των διακυμάνσεων (ripples) στις υψηλές συχνότητες είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον περιορισμένο αριθμό των 8 συρμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την αναπαράσταση των επιφανειών. Δοκιμαστικές προσομοιώσεις με αυξημένο αριθμό αγωγών (π.χ. 18 σύρματα) έδειξαν ότι η κεραία ανακτά την ιδανική πανκατευθυντική της συμπεριφορά ακόμη και στα 2000 MHz, καθώς το πυκνότερο πλέγμα προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη συμπαγή μεταλλική επιφάνεια. Η επιλογή των 8 συρμάτων στην παρούσα μελέτη έγινε για τη διατήρηση ενός

ισορροπημένου υπολογιστικού κόστους, αναδεικνύοντας ταυτόχρονα τα όρια της διακριτοποίησης στις υψηλές αρμονικές.

1.3.3 Ανάλυση Κατακόρυφων Διαγραμμάτων Ακτινοβολίας

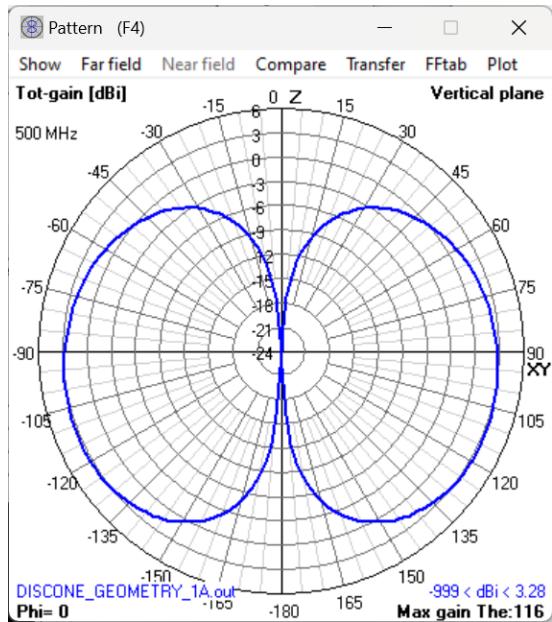
Στην παρούσα υποενότητα εξετάζεται η συμπεριφορά της κεραίας στο κατακόρυφο επίπεδο (Vertical Plane) για γωνία $\phi = 0^\circ$. Η ανάλυση αυτή είναι κρίσιμη για την πλήρη κατανόηση της κατευθυντικότητας της κεραίας.

1.3.4 Αποτελέσματα και Παρατηρήσεις

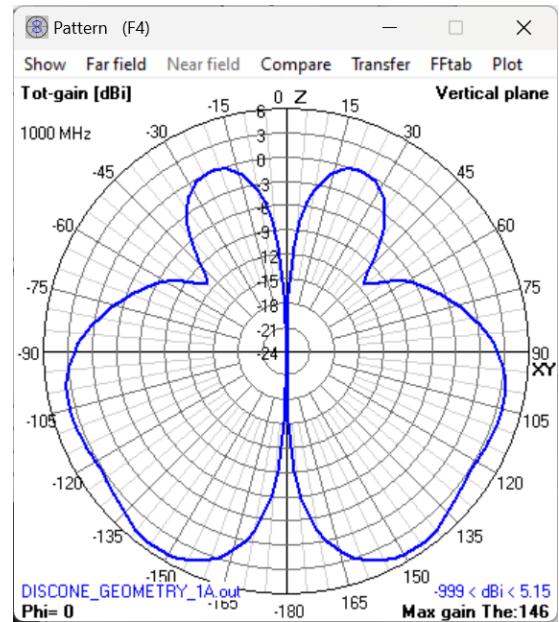
Από την επεξεργασία των διαγραμμάτων που προέκυψαν από το 4nec2 (Σχήματα $7\alpha'$ - $7\delta'$), εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- **Συχνότητα f_0 (500 MHz):** Το διάγραμμα παρουσιάζει τη χαρακτηριστική μορφή «οκτώ» (figure-eight), παρόμοια με αυτή ενός κατακόρυφου διπόλου. Η μέγιστη απολαβή υπολογίζεται στα **3.28 dB_i**. Η γωνία μέγιστης ακτινοβολίας εντοπίζεται στις $\theta = 116^\circ$ (Max gain *The* : 116). Παρατηρείται μια ελαφριά κλίση της δέσμης προς τα κάτω, καθώς ο κώνος λειτουργεί ως ανακλαστήρας που κατευθύνει την ενέργεια ελαφρώς χαμηλότερα από τον ορίζοντα.
- **Συχνότητα $2f_0$ (1000 MHz):** Η μέγιστη απολαβή αυξάνεται στα **5.15 dB_i**, ενώ η δέσμη στενεύει (narrower beamwidth). Η γωνία μέγιστης ακτινοβολίας μετατοπίζεται στις $\theta = 146^\circ$. Η κεραία εμφανίζει πλέον μεγαλύτερη κατευθυντικότητα, αλλά η κύρια δέσμη αποκλίνει σημαντικά από τον ορίζοντιο άξονα.
- **Συχνότητα $3f_0$ (1500 MHz):** Παρατηρείται το φαινόμενο **Lobing**. Ο κύριος λοβός διασπάται σε περισσότερους, με τη μέγιστη απολαβή να φτάνει τα **5.93 dB_i** στις $\theta = 120^\circ$. Εμφανίζονται βαθιοί μηδενισμοί (nulls) σε ενδιάμεσες γωνίες, στοιχείο που υποδηλώνει ότι η κεραία είναι ηλεκτρικά μεγάλη.
- **Συχνότητα $4f_0$ (2000 MHz):** Η απολαβή διαμορφώνεται στα **5.46 dB_i** με γωνία μέγιστης ακτινοβολίας $\theta = 130^\circ$. Το διάγραμμα χαρακτηρίζεται από πολλαπλούς δευτερεύοντες λοβούς, οι οποίοι μειώνουν την αποτελεσματικότητα της κεραίας για στοχευμένες επίγειες επικοινωνίες.

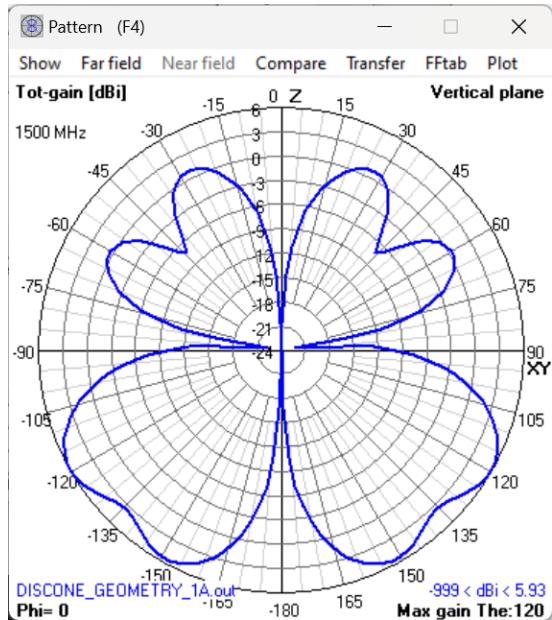
Παρακάτω φαίνονται τα αντίστοιχα κατακόρυφα διαγράμματα που προέκυψαν με τη χρήση του λογισμικού 4nec2.



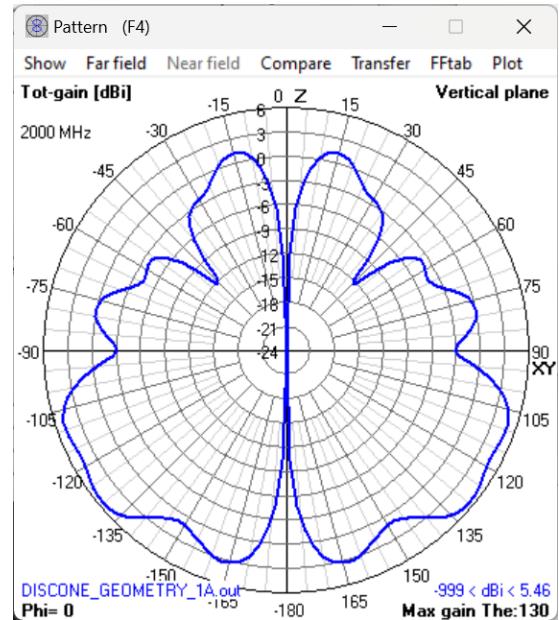
(α') 500 MHz (f_0)



(β') 1000 MHz ($2f_0$)



(γ') 1500 MHz ($3f_0$)



(δ') 2000 MHz ($4f_0$)

Σχήμα 7: Καταχόρυφα διαγράμματα ακτινοβολίας (Elevation Plots) σε πολικές συντεταγμένες.

1.3.5 Συμπεράσματα Κατακόρυφης Ακτινοβολίας

- **Beam Tilting:** Επιβεβαιώνεται ότι η αύξηση της συχνότητας προκαλεί κλίση της κύριας δέσμης. Ενώ στα 500 MHz η κεραία καλύπτει ικανοποιητικά τον ορίζοντα, σε άλλες περιπτώσεις η ισχύς συγκεντρώνεται σε γωνίες που μειώνουν την απολαβή στον οριζόντιο άξονα και ενδεχομένως να μην ευνοούν τόσο την επικοινωνία.
- **Απουσία Ακτινοβολίας στους Άξονες:** Παρατηρείται ότι η κεραία δεν εκπέμπει καθόλου ισχύ ακριβώς πάνω ($\theta = 0^\circ$) και ακριβώς κάτω ($\theta = 180^\circ$) από το σώμα της. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς το ρεύμα κινείται κατακόρυφα και η ενέργεια «εκτοξεύεται» προς τα έξω (περιμετρικά) και όχι από τις άκρες των συρμάτων. Αυτό το «κενό» στους πόλους επιβεβαιώνει ότι η κεραία μας λειτουργεί σωστά, στέλνοντας το σήμα εκεί που χρειάζεται: προς τον ορίζοντα.

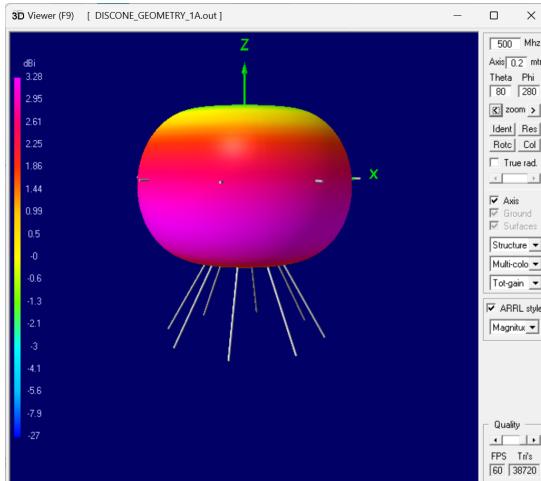
1.3.6 Τρισδιάστατη Απεικόνιση Ακτινοβολίας (3D Patterns)

Η τρισδιάστατη ανάλυση παρέχει μια σφαιρική εικόνα της κατανομής της ισχύος, συνδυάζοντας τις παρατηρήσεις από το οριζόντιο και το κατακόρυφο επίπεδο.

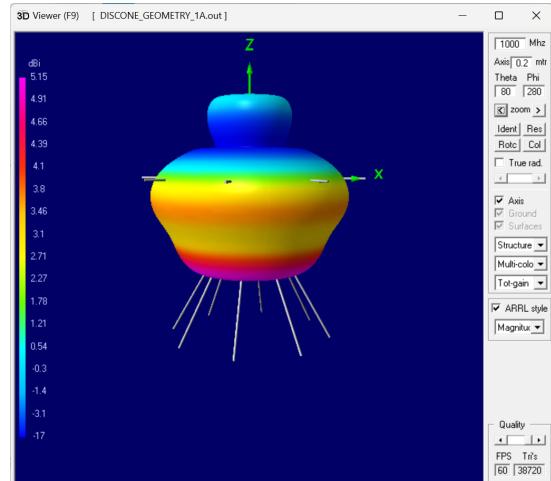
- **Χαμηλές Συχνότητες (500 MHz):** Το 3D μοντέλο έχει τη μορφή ενός συμπαγούς και συμμετρικού «δακτυλίου» (donut shape). Η επιφάνεια είναι ομαλή, υποδηλώνοντας ότι ο αριθμός των 8 συρμάτων επαρκεί για την πλήρη αναπαράσταση της επιφάνειας στη συχνότητα σχεδίασης.
- **Υψηλές Συχνότητες (2000 MHz):** Το διάγραμμα εμφανίζει μια πιο σύνθετη δομή. Οι 8 «πτυχώσεις» (ripples) που παρατηρούνται στην περιφέρεια συμπίπτουν με τις θέσεις των 8 ακτινωτών συρμάτων της γεωμετρίας. Το φαινόμενο αυτό αναδεικνύει τους περιορισμούς της μοντελοποίησης με αραιό πλέγμα αγωγών, καθώς στις υψηλές συχνότητες η απόσταση μεταξύ των συρμάτων γίνεται ηλεκτρικά σημαντική και η κατασκευή παύει να συμπεριφέρεται ως ενιαία, συμπαγής μεταλλική επιφάνεια.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, για την πληρέστερη αναπαράσταση της κεραίας ως συμπαγή αγώγιμη επιφάνεια στις υψηλές συχνότητες (2000 MHz), θα ήταν σκόπιμη η χρήση πυκνότερου πλέγματος (π.χ. 16 ή 32 ακτινωτών συρμάτων). Ωστόσο, η παρούσα επιλογή των 8 συρμάτων κρίνεται επαρκής για την εξαγωγή των βασικών χαρακτηριστικών ακτινοβολίας, διατηρώντας παράλληλα την υπολογιστική πολυπλοκότητα του μοντέλου σε χαμηλά επίπεδα.

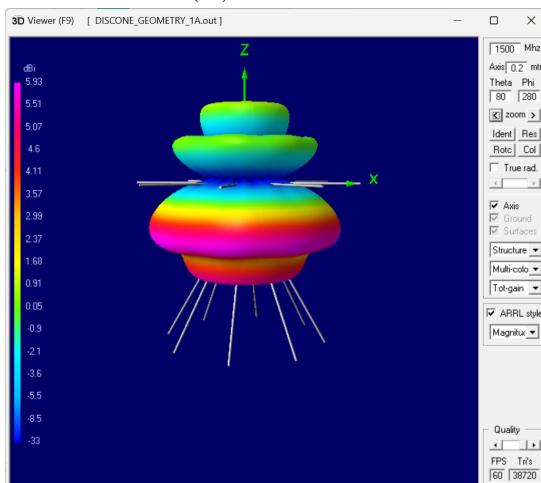
Παρακάτω φαίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα που προέκυψαν με τη χρήση του λογισμικού 4nec2.



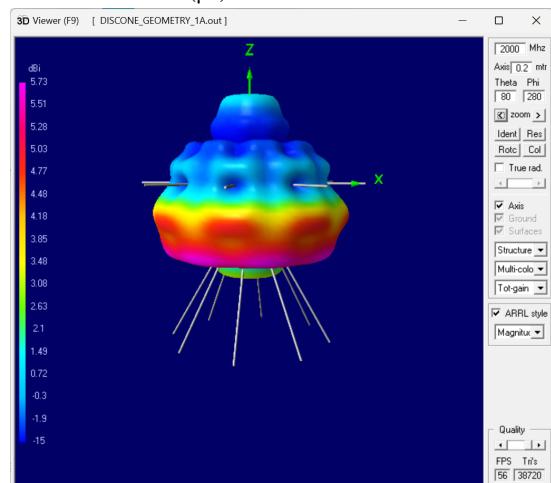
(α') 500 MHz



(β') 1000 MHz



(γ') 1500 MHz



(δ') 2000 MHz

Σχήμα 8: Τρισδιάστατη απεικόνιση της απολαβής (Total Gain) σε διαφορετικές συχνότητες.

2 Θέμα 2: Ανάλυση Ελικοειδούς Κεραίας

2.1 Εισαγωγή και Θεωρητικό Υπόβαθρο

Το δεύτερο μέρος της εργασίας εστιάζει στη μελέτη της ελικοειδούς κεραίας (Helix Antenna) που λειτουργεί στην περιοχή των UHF. Η συγκεκριμένη κεραία είναι γνωστή για την ικανότητά της να παράγει κυκλικό πολισμό και υψηλή κατευθυντικότητα, στοιχεία που την καθιστούν ιδανική για δορυφορικές επικοινωνίες και ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων.

Σύμφωνα με το επώνυμό μου (Καράτης), η συχνότητα λειτουργίας ορίζεται στα $f = 400$ MHz, η οποία αντιστοιχεί σε μήκος κύματος $\lambda = 0.75$ m. Η κεραία σχεδιάζεται για να λειτουργεί στην κύρια κατάσταση ακτινοβολίας (axial mode), όπου η περίμετρος της έλικας προσεγγίζει το ένα μήκος κύματος ($C \approx \lambda$).

Ένα κρίσιμο στοιχείο της διάταξης είναι το επίπεδο γείωσης (ground plane), το οποίο στην παρούσα μελέτη μοντελοποιείται ως ένα σύνθετο πλέγμα συρμάτων (wire grid). Το πλέγμα αυτό αποτελείται από:

- **8 Ακτινωτά Σύρματα (Radials):** Τα οποία εκτείνονται από το κέντρο της βάσης προς την περιφέρεια.
- **4 Ομόκεντρους Κύκλους (Concentric Circles):** Οι οποίοι συνδέουν τα ακτινωτά σύρματα σε συγκεκριμένες αποστάσεις, σχηματίζοντας μια δομή «ιστού αράχνης».

2.2 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά και Μοντελοποίηση

Για την υλοποίηση του μοντέλου στο 4nec2, χρησιμοποιήθηκε script σε περιβάλλον MATLAB (antennas_2.m), το οποίο υπολογίζει με ακρίβεια τις συντεταγμένες της έλικας και του πλέγματος γείωσης και εξάγει το αρχείο helix_geometry.nec. Οι βασικές παράμετροι σχεδίασης που επιλέχθηκαν για τη συχνότητα των 400 MHz ($\lambda = 0.75$ m) είναι:

- **Διάμετρος Έλικας (D):** Ορίστηκε στα 0.238 m, ώστε η περιφέρεια $C = \pi D$ να ισούται ακριβώς με λ (0.75 m), εξασφαλίζοντας τη λειτουργία σε Axial Mode.
- **Βήμα Έλικας (S):** Επιλέχθηκε τυπική τιμή για axial mode $S = \lambda/4 = 0.1875$ m.
- **Αριθμός Στροφών (N):** Επιλέχθηκαν $N = 10$ στροφές βάσει εκφώνησης.
- **Πλέγμα Γείωσης (Spider-web Grid):** Σύμφωνα με τις προδιαγραφές, το ground ορίστηκε ως δίσκος ακτίνας $R_g = \lambda/2 = 0.375$ m. Η υλοποίηση έγινε με 8 ακτινικά σύρματα (radials) και 4

ομόκεντρους κύκλους (circles). Για την εξασφάλιση της αριθμητικής ευστάθειας, χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος που δημιουργεί δυναμικά «ειδικούς κόμβους» (nodes) στα σημεία τομής. Συγκεκριμένα, η ακτίνα στις 0° χωρίζεται σε τμήματα έτσι ώστε να υπάρχει κόμβος ακριβώς στην απόσταση R_{helix} , διασφαλίζοντας την τέλεια σύνδεση της τροφοδοσίας χωρίς σφάλματα crossing wires.

- **Διάμετρος Συρμάτων:** Χρησιμοποιήθηκε ομοιόμορφη διάμετρος $d = \lambda/200 = 0.0037$ m για όλα τα στοιχεία της κεραίας και του πλέγματος, εξασφαλίζοντας ομοιομορφία στη γεωμετρία.
- **Σημείο Τροφοδοσίας:** Η τροφοδοσία υλοποιείται μέσω ενός κατακόρυφου αγωγού (feed wire) μήκους $\text{Gap} = \lambda/40 \approx 0.0187$ m. Ο αγωγός αυτός συνδέει τον ειδικό κόμβο του ground plane στο επίπεδο $z = 0$ με την αρχή του πρώτου σπειρώματος της έλικας στο ύψος $z = \text{Gap}$. Η διάταξη αυτή εξασφαλίζει την πλήρη ηλεκτρική συνέχεια και ανταποκρίνεται στην απαίτηση για σύνδεση της πηγής σε σημείο τομής (junction) του ground plane.
- **Κατάτμηση (Segmentation):** Για την εξασφάλιση της αριθμητικής σύγκλισης και την ακριβή εφαρμογή της μεθόδου των ροπών (MoM), η κατάτμηση των αγωγών έγινε με γνώμονα τον κανόνα του $\lambda/10$ στην κεντρική συχνότητα σχεδίασης ($f_0 = 400$ MHz, $\lambda = 0.75$ m).
 - **Ελικοειδής Αγωγός:** Επιλέχθηκαν 17 τμήματα ανά στροφή (συνολικά 170 segments για τις 10 σπείρες). Το μήκος κάθε τμήματος υπολογίζεται πλέον σε $\Delta L \approx 0.045$ m, τιμή η οποία αντιστοιχεί σε ανάλυση περίπου $\lambda/16.5$. Η επιλογή αυτή υπερκαλύπτει το κριτήριο σύγκλισης ($\Delta L < \lambda/10 = 0.075$ m), εξασφαλίζοντας υψηλή ακρίβεια στην κατανομή του ρεύματος κατά μήκος της έλικας, ακόμη και στις υψηλότερες συχνότητες της σάρωσης (πληρώντας το κριτήριο του $\lambda/6$).
 - **Πλέγμα Γείωσης:** Η κατάτμηση των ακτινικών και κυκλικών συρμάτων έγινε με γνώμονα τη διατήρηση παρόμοιου μήκους τμημάτων με αυτά της έλικας, ώστε να αποφευχθούν μεγάλες ασυνέχειες στα ρεύματα στους κόμβους σύνδεσης.

Διάταξη Τροφοδοσίας και Αποφυγή Σφαλμάτων

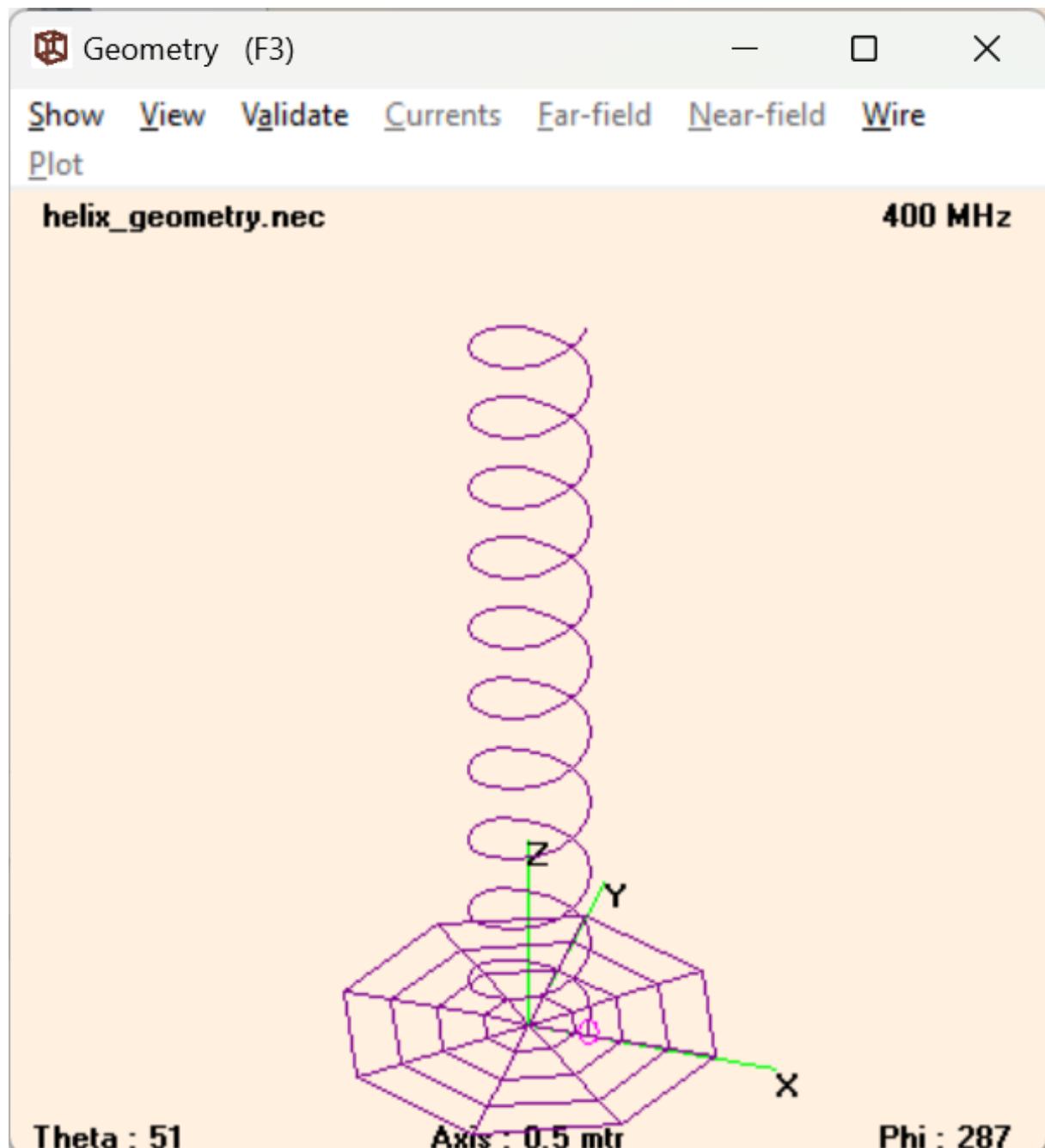
Η μοντελοποίηση της σύνδεσης έλικας-γείωσης σχεδιάστηκε με γνώμονα την αποφυγή όσο το δυνατόν περισσότερων αριθμητικών σφαλμάτων (Crossing wires ή Overlapping segments). Η χρήση του κατακόρυφου Gap και ο προσεκτικός υπολογισμός των κόμβων προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα:

- **Γεωμετρική Συνέπεια:** Ο αγωγός τροφοδοσίας εδράζεται σε έναν προκαθορισμένο κόμβο που ορίζεται από τη γεωμετρία του spider-web, αποφεύγοντας τυχαίες επικαλύψεις συρμάτων.
- **Ορθή Διέγερση:** Η πηγή τάσης (Voltage Source) τοποθετείται στο κατακόρυφο segment τροφοδοσίας (Tag 100), μοντελοποιώντας με

ακρίβεια τη διοχέτευση του ρεύματος από τον ανακλαστήρα προς την έλικα.

- **Σύγκλιση:** Η ταύτιση των κόμβων μέσω του αλγορίθμου στο MATLAB εγγυάται τη σωστή λειτουργία της μεθόδου των ροπών (MoM) χωρίς την εμφάνιση προειδοποιήσεων (warnings) για πολύ κοντινά ή διασταυρούμενα σύρματα, για συχνότητες κοντά στην κεντρική.

Παρακάτω μπορούμε να δούμε τη γεωμετρία της ελικοειδούς κεραίας.



Σχήμα 9: Η γεωμετρία της ελικοειδούς κεραίας στο 4nec2

2.3 Ερώτημα (α): Σύνθετη Αντίσταση και Συντελεστής Στασίμων Κυμάτων (SWR)

Μετά την ολοκλήρωση της γεωμετρίας, πραγματοποιήθηκε σάρωση συχνότητας στο εύρος 120 MHz ($0.3f_0$) έως 800 MHz ($2f_0$) με βήμα 5 MHz . Η ανάλυση των αποτελεσμάτων επικεντρώνεται στη συμπεριφορά της κεραίας κατά τη μετάβαση από τον κανονικό (normal mode) στον αξονικό ρυθμό λειτουργίας (axial mode).

2.3.1 Παρατηρήσεις επί της Σύνθετης Αντίστασης

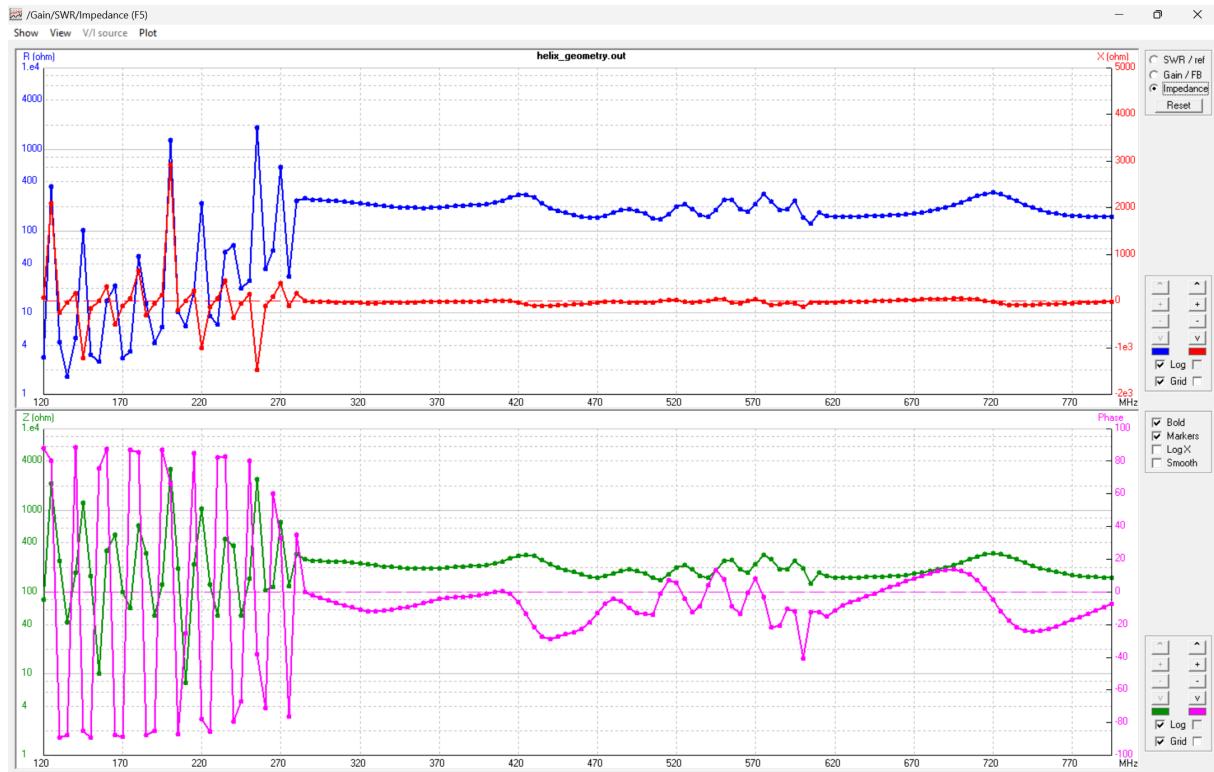
Όπως προκύπτει από το διάγραμμα της σύνθετης αντίστασης (Εικόνα 10), παρατηρούνται τα εξής:

- **Περιοχή Χαμηλών Συχνοτήτων ($< 300 \text{ MHz}$):** Η αντίσταση παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις με υψηλές τιμές αέργου μέρους (X_{in}), γεγονός που υποδηλώνει ότι η κεραία βρίσκεται εκτός συντονισμού και η περιφέρεια C είναι πολύ μικρότερη από το μήκος κύματος λ .
- **Περιοχή Αξονικού Ρυθμού ($300 - 800 \text{ MHz}$):** Μετά τα 300 MHz , η πραγματική αντίσταση R_{in} (μπλε γραμμή) σταθεροποιείται εντυπωσιακά. Στην κεντρική συχνότητα σχεδίασης $f_0 = 400 \text{ MHz}$ καθώς και σε ένα αρκετά μεγάλο φάσμα που έπεται αυτής, η αντίσταση εισόδου είναι $Z_{in} \approx 210 + j0 \Omega$ (σχεδόν μηδενικό άεργο μέρος). Η συμπεριφορά αυτή είναι χαρακτηριστική των κεραιών οδεύοντος κύματος, όπου η αντίσταση εξαρτάται κυρίως από τη γεωμετρία της έλικας ($R \approx 140 \cdot C/\lambda$).

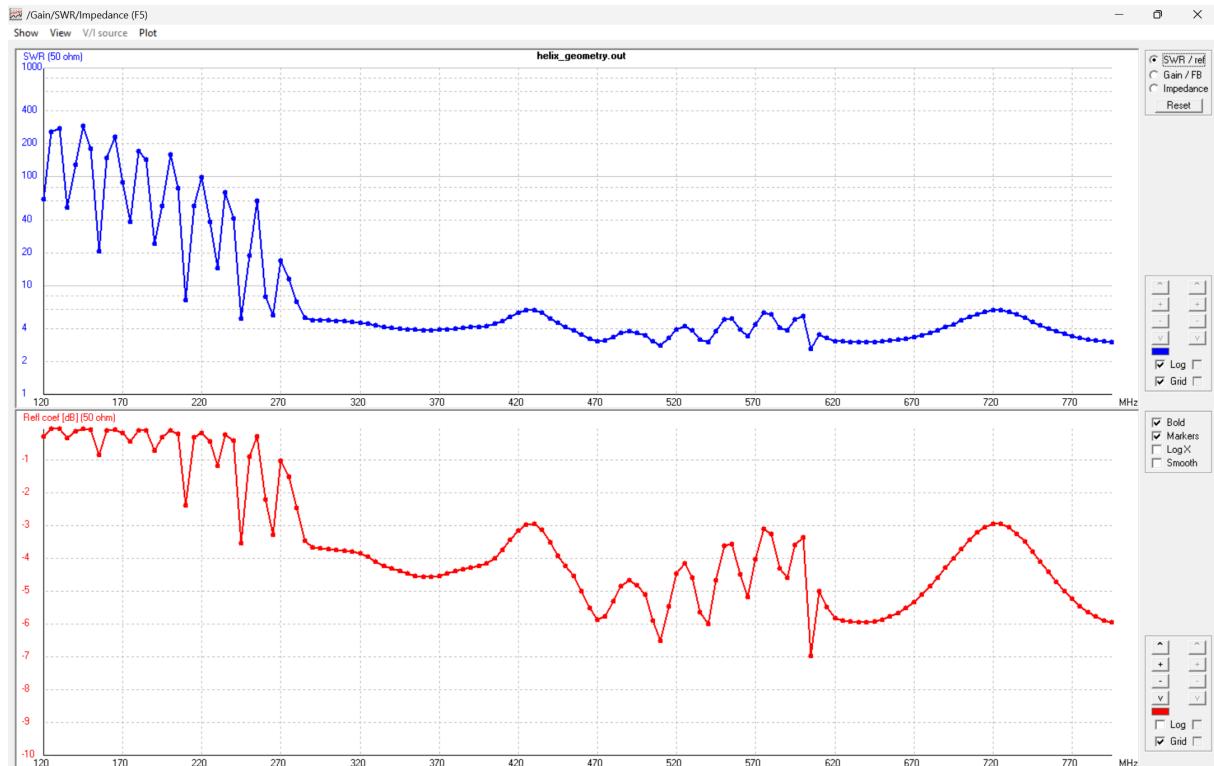
2.3.2 Συντελεστής Στασίμων Κυμάτων (SWR) και Προσαρμογή

Στα διαγράμματα SWR και Reflection Coeff. (Εικόνα 11), η μέτρηση έγινε με αντίσταση αναφοράς $Z_{0_{ref}} = 50 \Omega$.

- Παρατηρείται ότι στο εύρος λειτουργίας, ο λόγος SWR παραμένει σε υψηλά επίπεδα (περίπου $3 : 1$ έως $4 : 1$), ενώ ο συντελεστής ανάκλασης κυμαίνεται κοντά στα -5 dB .
- Η συμπεριφορά αυτή **δεν αποτελεί ένδειξη κακής λειτουργίας** της κεραίας, αλλά οφείλεται στην εγγενή διαφορά της σύνθετης αντίστασης της έλικας από την τυπική γραμμή μεταφοράς των 50Ω .



Σχήμα 10: Σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_{in} στο εύρος 120 – 800 MHz.



Σχήμα 11: Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR) και Συντελεστής Ανάκλασης (dB) για $Z_0 = 50\Omega$.

2.3.3 Πρόταση Βέλτιστης Προσαρμογής

Για την επίτευξη μέγιστης μεταφοράς ισχύος και ελαχιστοποίηση των απωλειών επιστροφής, η κεραία απαιτεί γραμμή τροφοδοσίας με χαρακτηριστική αντίσταση Z_0 που να προσεγγίζει την αντίσταση εισόδου της.

- Με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, η ιδανική χαρακτηριστική αντίσταση θα ήταν $Z_0 \approx 210 \Omega$.
- Εάν χρησιμοποιηθεί γραμμή 210Ω , ο συντελεστής ανάκλασης Γ στην κεντρική συχνότητα θα μηδενιστεί ($\Gamma \approx 0$), οδηγώντας σε τιμή SWR ≈ 1 , εξασφαλίζοντας την απόλυτη ευρυζωνική προσαρμογή που χαρακτηρίζει τις ελικοειδείς κεραίες αξονικής ακτινοβολίας.

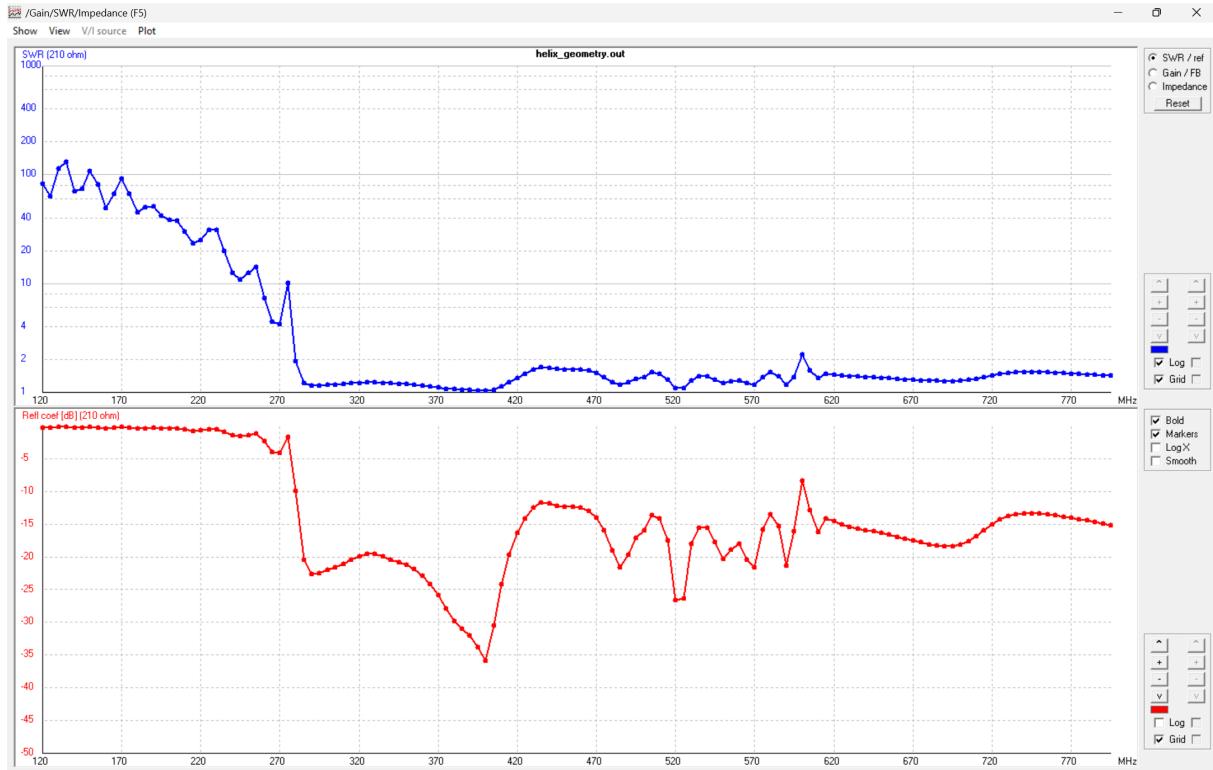
2.4 Ερώτημα (β): Συντελεστής Ανάκλασης και Ευρυζωνικότητα με $Z_0 = 210 \Omega$

Στο δεύτερο στάδιο της ανάλυσης, επιλέχθηκε η βελτιστοποίηση της προσαρμογής της κεραίας με βάση τα αποτελέσματα της σύνθετης αντίστασης εισόδου που προέκυψαν από το προηγούμενο ερώτημα. Καθώς η αντίσταση εισόδου Z_{in} στην κεντρική συχνότητα $f_0 = 400 \text{ MHz}$ βρέθηκε μέσω προσομοίωσης στα 210Ω , χρησιμοποιήθηκε αυτή η τιμή ως χαρακτηριστική αντίσταση αναφοράς (Z_0) για τον υπολογισμό του συντελεστή ανάκλασης (Γ) και του SWR.

2.4.1 Ανάλυση Συντελεστή Ανάκλασης ($|S_{11}|$)

Όπως παρατηρείται στο διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης (Εικόνα 12, κάτω μέρος), η χρήση γραμμής τροφοδοσίας 210Ω οδηγεί σε εξαιρετικά αποτελέσματα:

- **Κεντρική Συχνότητα (400 MHz):** Ο συντελεστής ανάκλασης πέφτει κάτω από τα -15 dB , γεγονός που υποδηλώνει ότι η ανακλώμενη ισχύς είναι ελάχιστη και η μεταφορά ισχύος προς την κεραία είναι σχεδόν πλήρης.
- **Εύρος Λειτουργίας:** Σε όλο το φάσμα από 300 MHz έως 800 MHz , ο συντελεστής ανάκλασης παραμένει σταθερά κάτω από το κρίσιμο όριο των -10 dB . Σημειώνονται μάλιστα περιοχές (π.χ. κοντά στα 400 MHz) όπου η προσαρμογή βελτιώνεται περαιτέρω, αγγίζοντας τα -35 dB .



Σχήμα 12: Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR) και Συντελεστής Ανάκλασης (dB) για $Z_0 = 210\Omega$.

2.4.2 Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR)

Το διάγραμμα του SWR (Εικόνα 12, πάνω μέρος) επιβεβαιώνει την επιτυχή προσαρμογή:

- Μετά τη συχνότητα των 280 MHz (σημείο μετάβασης στον αξονικό ρυθμό), ο λόγος SWR σταθεροποιείται σε τιμές πολύ κοντά στη μονάδα ($1 < \text{SWR} < 2$).
- Η συμπεριφορά αυτή είναι εντυπωσιακά επίπεδη (flat response), επιβεβαιώνοντας ότι η ελικοειδής κεραία λειτουργεί ως δομή οδεύοντος κύματος (traveling wave antenna).

2.4.3 Σχολιασμός Ευρυζωνικότητας

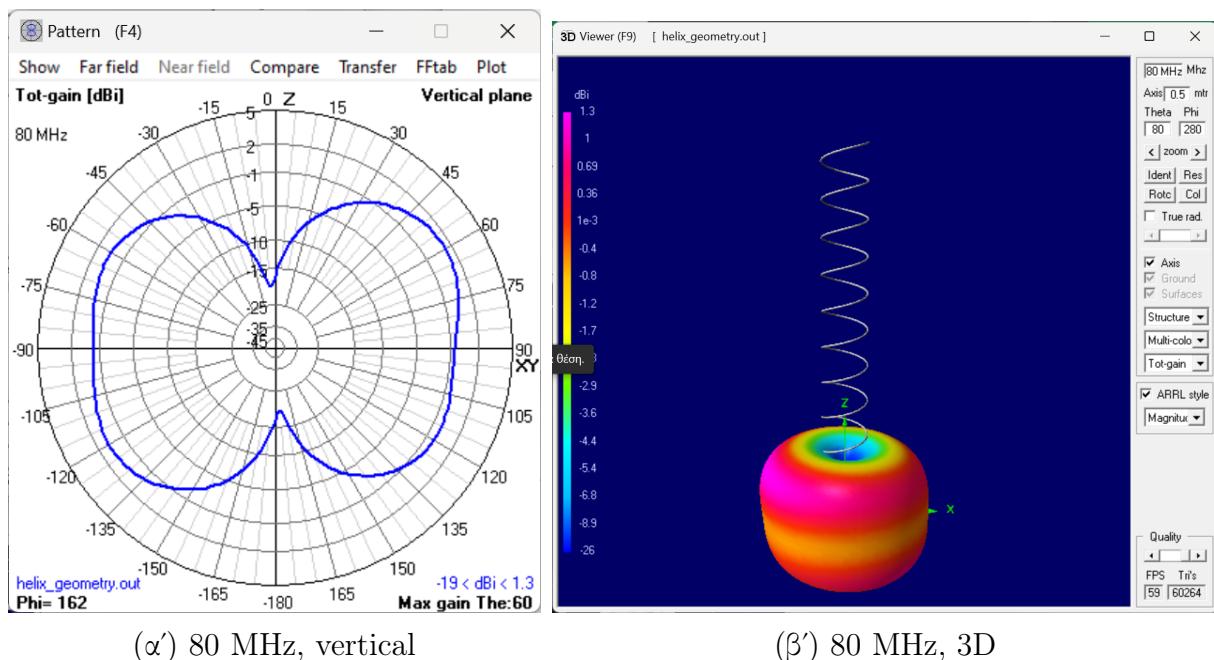
Η κεραία παρουσιάζει εξαιρετική **ευρυζωνικότητα** (broadband behavior). Το εύρος ζώνης (για $\text{SWR} < 2$) καλύπτει υπερδιπλάσιο φάσμα από την κεντρική συχνότητα σχεδίασης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στον αξονικό ρυθμό λειτουργίας, η περιφέρεια της έλικας παραμένει εντός των ορίων $0.75\lambda < C < 1.33\lambda$. Όσο ισχύει αυτή η συνθήκη, η σύνθετη αντίσταση εισόδου μεταβάλλεται ελάχιστα, επιτρέποντας στην κεραία να διατηρεί την προσαρμογή της χωρίς την ανάγκη περίπλοκων δικτύων συντονισμού.

Συμπέρασμα Ευρυζωνικότητας

Η σταθερότητα της αντίστασης Z_{in} σε ένα τόσο ευρύ φάσμα ($300 - 800$ MHz) αποδεικνύει την ευρυζωνική φύση της διάταξης. Εφόσον επιλεγεί το κατάλληλο δίκτυο προσαρμογής ή γραμμή τροφοδοσίας (π.χ. μετασχηματιστής $\lambda/4$ ή γραμμή 210Ω), η κεραία μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά σε όλο το παραπάνω εύρος χωρίς προβλήματα.

2.5 Ερώτημα (γ): Διαγράμματα Ακτινοβολίας και Μεταβολή Κέρδους

Στην ενότητα αυτή αναλύεται η ακτινοβολούμενη συμπεριφορά της ελικοειδούς κεραίας σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, από τις πολύ χαμηλές ($0.2f_0 = 80$ MHz) έως την τρίτη αρμονική ($3f_0 = 1200$ MHz). Η ανάλυση των διαγραμμάτων επιβεβαιώνει τη λειτουργία της κεραίας στον αξονικό ρυθμό (axial mode) και αναδεικνύει τους περιορισμούς της διάταξης στις ακραίες συχνότητες.

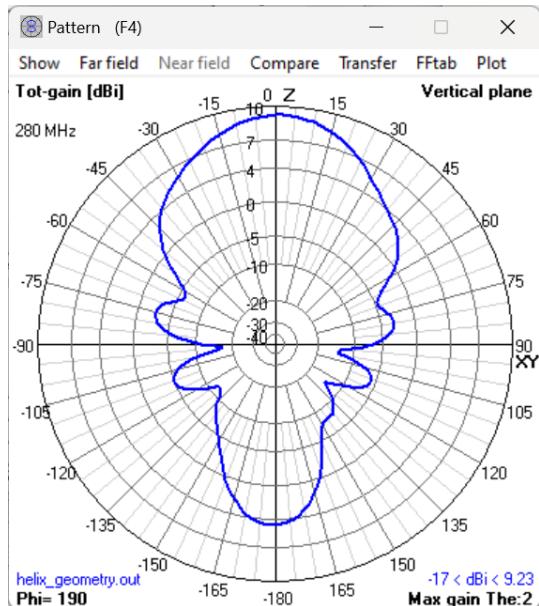


Σχήμα 13: Διαγράμματα ακτινοβολίας της κεραίας για $f = 0.2f_0$ (80 MHz)

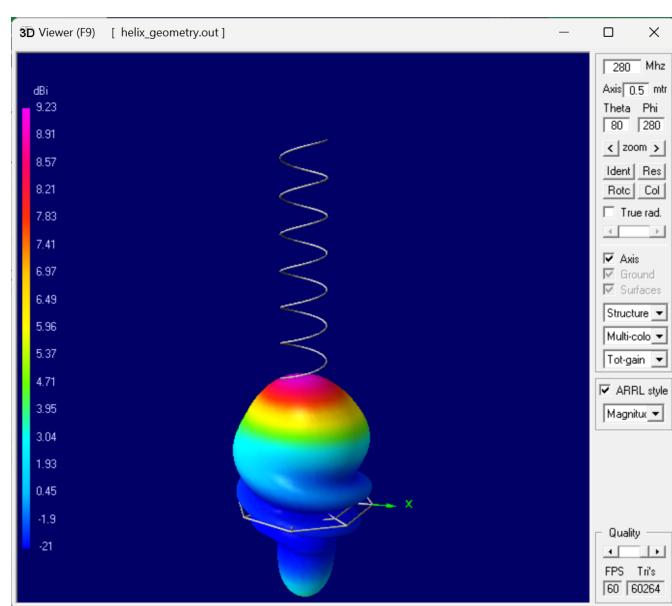
2.5.1 Κανονικός Ρυθμός Λειτουργίας ($f = 80$ MHz)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 13, στη συχνότητα αυτή η περιφέρεια της έλικας είναι πολύ μικρότερη από το μήκος κύματος ($C \approx 0.2\lambda$), με αποτέλεσμα η κεραία να λειτουργεί στον **κανονικό ρυθμό** (normal mode).

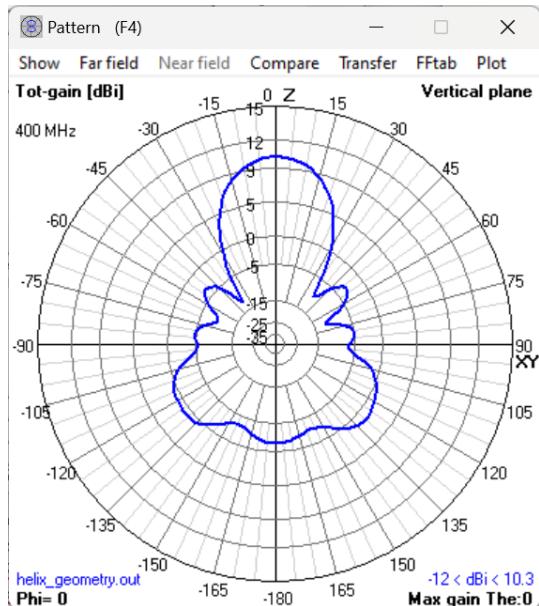
- Μορφή Λοβού:** Η κεραία συμπεριφέρεται ως **ηλεκτρικά μικρή**, με το διάγραμμα ακτινοβολίας να προσομοιάζει αυτό ενός κατακόρυφου στοιχειώδους διπόλου (σχήματος doughnut). Η ακτινοβολία είναι μέγιστη κοντά στο οριζόντιο επίπεδο ($\theta = 90^\circ$) και παρουσιάζει μηδενισμό (null) κατά μήκος του άξονα z (άξονας της έλικας).
- Κέρδος:** Το μέγιστο κέρδος είναι ιδιαίτερα χαμηλό (1.3 dBi). Αυτό οφείλεται στην περιορισμένη κατευθυντικότητα που παρουσιάζουν οι διατάξεις των οποίων οι διαστάσεις είναι σημαντικά μικρότερες από το μήκος κύματος λειτουργίας.



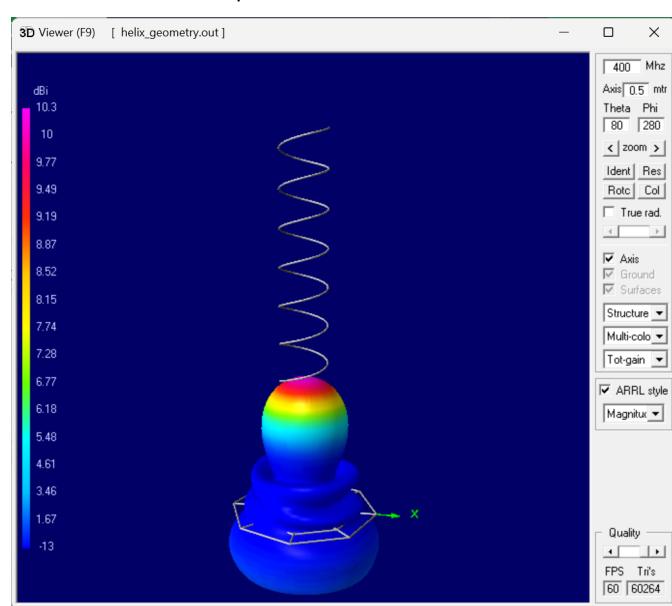
(α') 280 MHz, vertical



(β') 280 MHz, 3D



(γ') 400 MHz, vertical



(δ') 400 MHz, 3D

Σχήμα 14: Διαγράμματα ακτινοβολίας για $f = 0.7f_0$ (280 MHz) και $f = f_0$ (400 MHz)

2.5.2 Μετάβαση και Κεντρική Συχνότητα ($f = 280 - 400$ MHz)

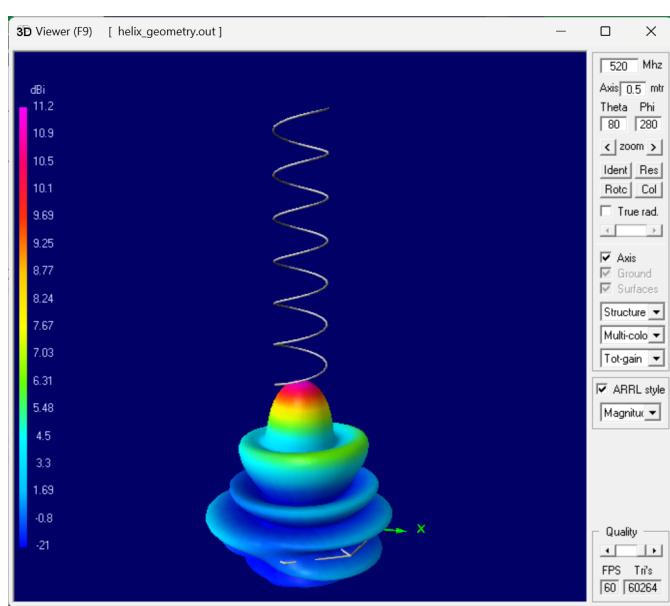
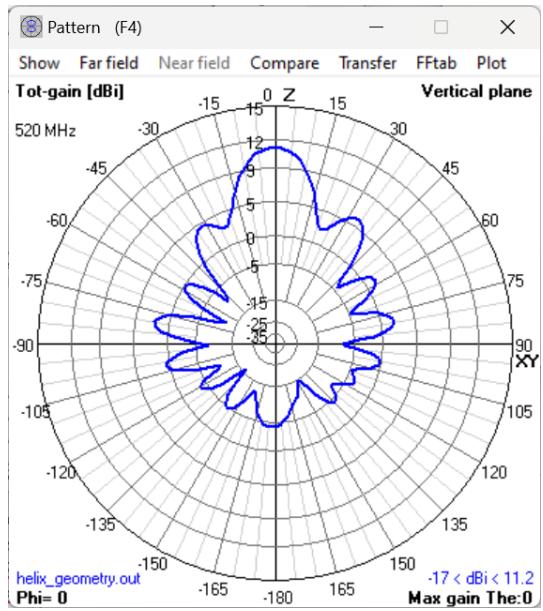
Τα διαγράμματα της Εικόνας 14 δείχνουν ότι καθώς η συχνότητα αυξάνεται και η περιφέρεια πλησιάζει το μήκος κύματος ($C \approx \lambda$), η κεραία γυρίζει στον αξονικό ρυθμό.

- **Στα 280 MHz ($0.7f_0$):** Ο κύριος λοβός αρχίζει να συγκεντρώνεται στον αξονα z με μέγιστο κέρδος 9.23 dBi.
- **Στα 400 MHz (f_0):** Επιτυγχάνεται πλήρης αξονική ακτινοβολία. Ο λοβός είναι κατευθυντικός προς την κατεύθυνση $+z$, με κέρδος 10.3 dBi. Η παρουσία του πλέγματος γείωσης (spider-web ground plane) περιορίζει την ακτινοβολία προς τα πίσω, εξασφαλίζοντας υψηλό λόγο Front-to-Back.

2.5.3 Μέγιστη Απόδοση και Υψηλές Συχνότητες ($f = 520 - 1200$ MHz)

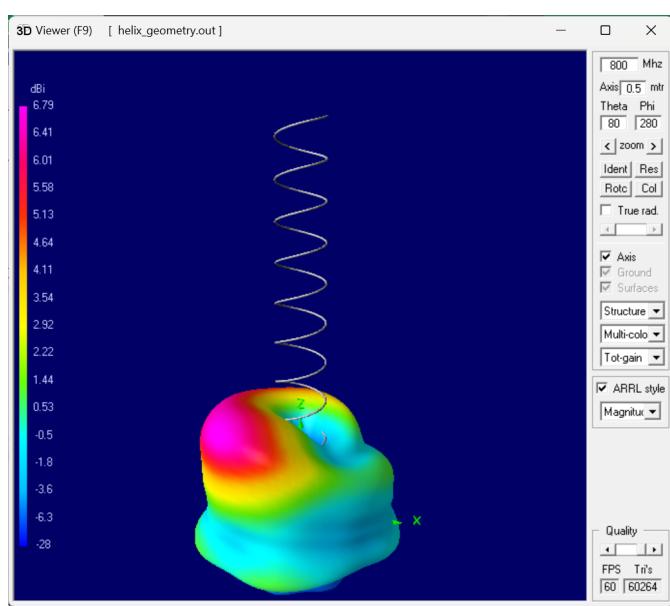
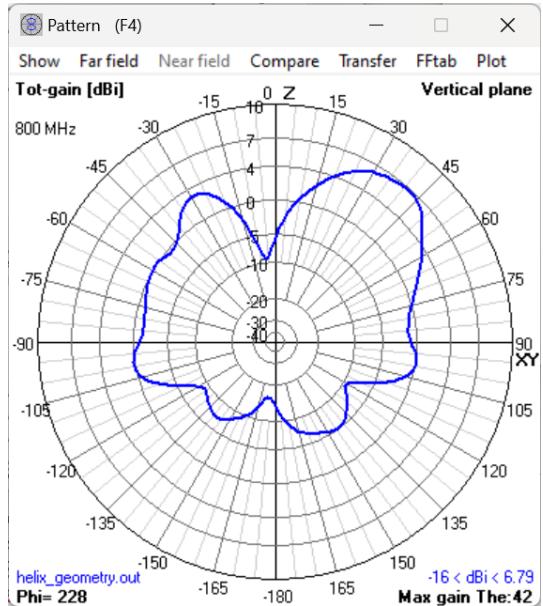
- **Στα 520 MHz ($1.3f_0$):** Παρατηρείται το **μέγιστο κέρδος της διάταξης** (11.2 dBi). Παρά το γεγονός ότι σε αυτή τη συχνότητα αρχίζουν να εμφανίζονται οι πρώτοι δευτερεύοντες λοβοί, η συνολική κατευθυντικότητα αυξάνεται. Αυτό οφείλεται στη σημαντική **στένωση του κύριου λοβού** (narrow beamwidth) κατά μήκος του αξονα z . Καθώς η περιφέρεια της έλικας πλησιάζει το ανώτατο θεωρητικό όριο του αξονικού ρυθμού ($C \approx 1.3\lambda$), η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια συγκεντρώνεται σε μια πιο στενή δέσμη. Η αύξηση της έντασης ακτινοβολίας λόγω της στενότερης δέσμης υπερκαλύπτει τις απώλειες ισχύος προς τους πλευρικούς λοβούς, οδηγώντας στη μέγιστη τιμή κέρδους.
- **Στα 800 MHz ($2f_0$):** Η κεραία αρχίζει να χάνει τον καθαρά αξονικό της χαρακτήρα. Ο κύριος λοβός διχάζεται και εμφανίζονται έντονοι δευτερεύοντες λοβοί. Το κέρδος πέφτει στα 6.79 dBi.
- **Στα 1200 MHz ($3f_0$):** Η ακτινοβολία γίνεται πολυλοβική (multi-lobed). Λόγω της πολύ υψηλής συχνότητας, η έλικα δεν λειτουργεί πλέον ως κεραία οδεύοντος κύματος ενιαίας φάσης, με αποτέλεσμα η ενέργεια να διασκορπίζεται σε πολλές κατευθύνσεις (Μέγιστο Gain 6.56 dBi).

Παρακάτω φαίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για την περίπτωση των υψηλών συχνοτήτων.



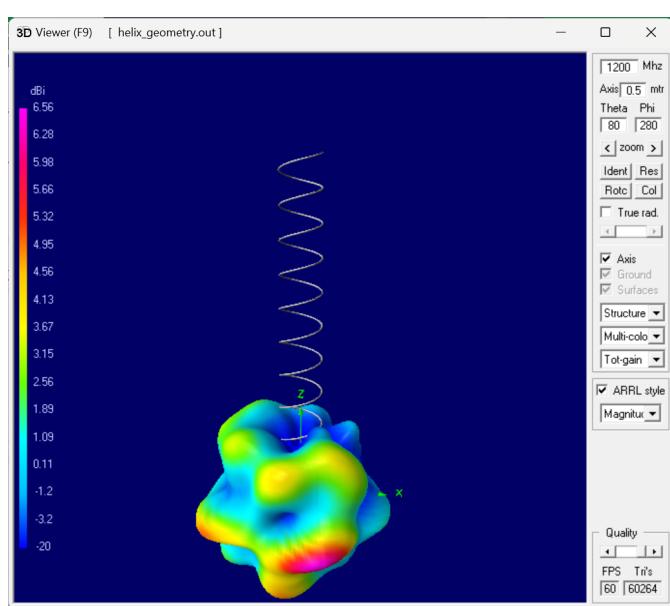
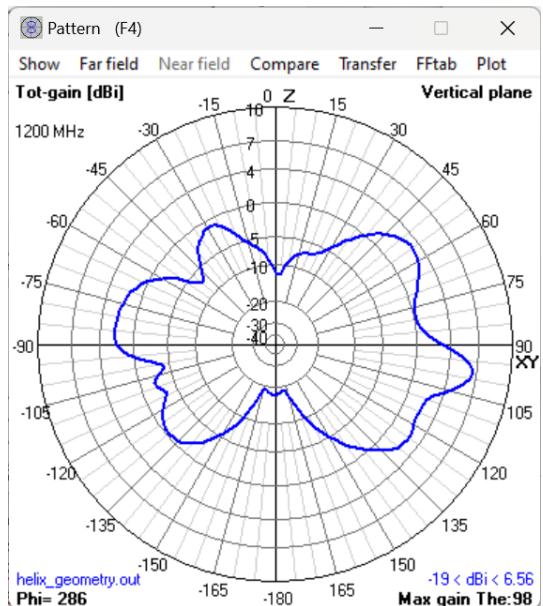
(α') 520 MHz, vertical

(β') 520 MHz, 3D



(γ') 800 MHz, vertical

(δ') 800 MHz, 3D



(ε') 1200 MHz, vertical

(ζ') 1200 MHz, 3D

2.5.4 Συμπεράσματα

Η προσομοίωση επιβεβαιώνει ότι η βέλτιστη περιοχή λειτουργίας της κεραίας είναι μεταξύ $0.8f_0$ και $1.3f_0$ ($320 - 520$ MHz). Σε αυτό το εύρος, η κεραία διατηρεί:

1. Σταθερή κατευθυντικότητα κατά μήκος του άξονα της έλικας.
2. Υψηλό κέρδος (άνω των 10 dB).
3. Ικανοποιητική καταστολή δευτερεύοντων λοβών χάρη στη γεωμετρία των 10 σπειρών και τη στιβαρή γείωση.

3 Θέμα 3α: Ανάλυση Αναδιπλωμένου Διπόλου

3.1 Εισαγωγή και Φυσική Ερμηνεία

Το αναδιπλωμένο δίπολο (folded dipole) αποτελεί μια παραλλαγή του απλού γραμμικού διπόλου, η οποία αποτελείται από δύο παράλληλους αγωγούς που συνδέονται στα άκρα τους, σχηματίζοντας έναν στενό βρόχο. Η τροφοδοσία πραγματοποιείται στο κέντρο του ενός αγωγού. Σύμφωνα με τη θεωρία, η λειτουργία του αναδιπλωμένου διπόλου μπορεί να αναλυθεί ως υπέρθεση δύο ρυθμών:

1. **Ρυθμός Κεραίας (Antenna Mode):** Οι δύο αγωγοί λειτουργούν ως δύο παράλληλα γραμμικά δίπολα σε φάση.
2. **Ρυθμός Γραμμής Μεταφοράς (Transmission Line Mode):** Η δομή λειτουργεί ως δύο βραχυκυκλωμένες δισύρματες γραμμές μεταφοράς σε παράλληλη σύνδεση.

Για την περίπτωση συντονισμού σε μήκος $l \approx \lambda/2$, η σύνθετη αντίσταση εισόδου είναι περίπου τετραπλάσια από αυτή του απλού διπόλου ($Z_{in} \approx 4Z_d \approx 300 \Omega$), γεγονός που προσφέρει εξαιρετική προσαρμογή σε τυπικές δισύρματες γραμμές τροφοδοσίας.

3.2 Γεωμετρία και Δυναμική Κατάτμηση στο 4nec2

Για τη σχεδίαση της κεραίας στο λογισμικό 4nec2, ορίστηκαν οι παράμετροι βάσει της κεντρικής συχνότητας $f_0 = 60 \text{ MHz}$, η οποία αντιστοιχεί σε μήκος κύματος $\lambda = 5 \text{ m}$. Οι φυσικές διαστάσεις της διάταξης καθορίστηκαν ως εξής:

- **Μήκος Διπόλου (l):** Επιλέχθηκε η τιμή $l = 0.5\lambda = 2.5 \text{ m}$ για την υλοποίηση ενός αναδιπλωμένου διπόλου μισού κύματος, όπως ορίζει η εκφώνηση.
- **Ακτίνα Αγωγού (a):** Σύμφωνα με την απαίτηση για διάμετρο $d = \lambda/200$, η ακτίνα ορίστηκε σε $a = \lambda/400 = 0.0125 \text{ m}$.
- **Απόσταση Αγωγών (s):** Εξετάστηκαν τρεις περιπτώσεις αποστάσεων: $s = \lambda/100$ (0.05 m), $s = \lambda/20$ (0.25 m) και $s = \lambda/4$ (1.25 m).

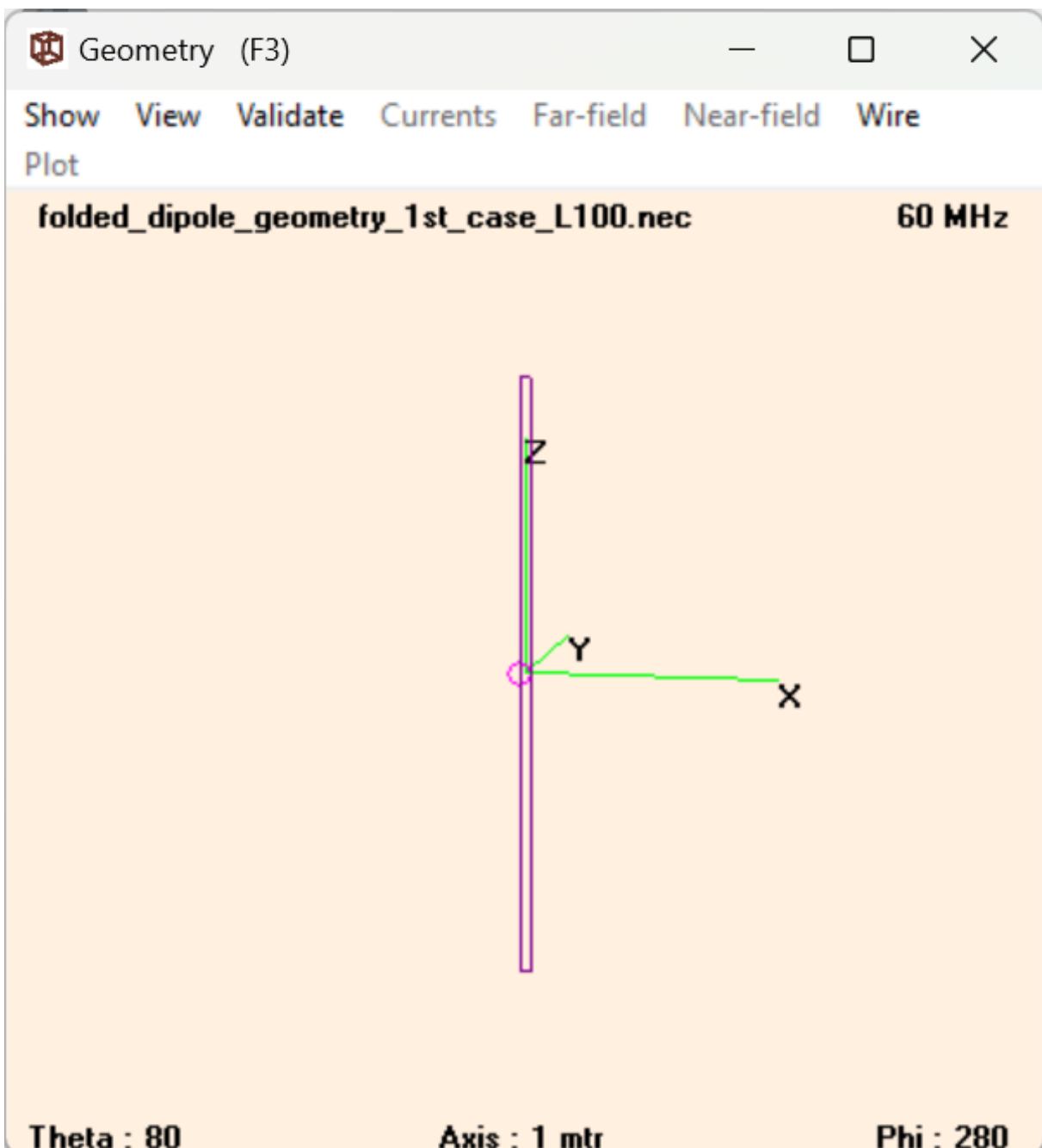
3.2.1 Στρατηγική Κατάτμησης

Για την αποφυγή αριθμητικών σφαλμάτων κατά την επίλυση με τη μέθοδο των ροπών (MoM), ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου η απόσταση των αγωγών είναι πολύ μικρή, εφαρμόστηκε δυναμική επιλογή των τμημάτων (segments). Η προσέγγιση αυτή εξασφαλίζει ότι ο λόγος των μηκών γειτονικών τμημάτων στις ενώσεις (junctions) παραμένει εντός των ορίων του NEC ($< 5 : 1$). Συγκεκριμένα:

1. **Περίπτωση** $s = \lambda/100$: Χρησιμοποιήθηκαν 31 τμήματα για το κύριο σώμα ($\Delta L \approx 0.08$ m) και 1 τμήμα για τους βραχυκυκλωτήρες ($\Delta S = 0.05$ m). Η ανάλυση που επιτυχάνεται είναι $\lambda/62$, εξασφαλίζοντας ομαλή μετάβαση ρευμάτων στις ενώσεις.
2. **Περίπτωση** $s = \lambda/20$: Χρησιμοποιήθηκαν 31 τμήματα για το κύριο σώμα και 3 για τους βραχυκυκλωτήρες ($\Delta S \approx 0.083$ m). Η ακρίβεια παραμένει στα επίπεδα του $\lambda/60$, με σχεδόν ταυτόσημα μήκη τμημάτων σε όλη τη δομή.
3. **Περίπτωση** $s = \lambda/4$: Λόγω της μεγάλης απόστασης, ο αριθμός των τμημάτων του κυρίου σώματος μειώθηκε σε 15 ($\Delta L \approx 0.16$ m) και των βραχυκυκλωτήρων αυξήθηκε σε 7 ($\Delta S \approx 0.17$ m). Η ανάλυση εδώ είναι $\lambda/30$, τιμή που υπερκαλύπτει τον κανόνα του $\lambda/10$ ακόμη και στο ανώτατο όριο σάρωσης (90 MHz, όπου $\lambda/10 = 0.33$ m).

Η τροφοδοσία τοποθετήθηκε στο κεντρικό segment του αγωγού (Tag 1), διασφαλίζοντας τη συμμετρία της διέγερσης, ενώ η χρήση αγωγών με λόγο μήκους προς ακτίνα τμήματος (L_{seg}/a) σταθερά άνω του 4 εγγυάται την εγκυρότητα της προσέγγισης λεπτού σύρματος.

Παρακάτω μπρούμε να δούμε την εν λόγω γεωμετρία σε δράση για την περίπτωση του $s = \lambda/100$. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις απλώς αλλάζει η απόσταση μεταξύ των δύο κατακόρυφων αγωγών.



Σχήμα 16: Η γεωμετρία της κεραίας στο 4nec2

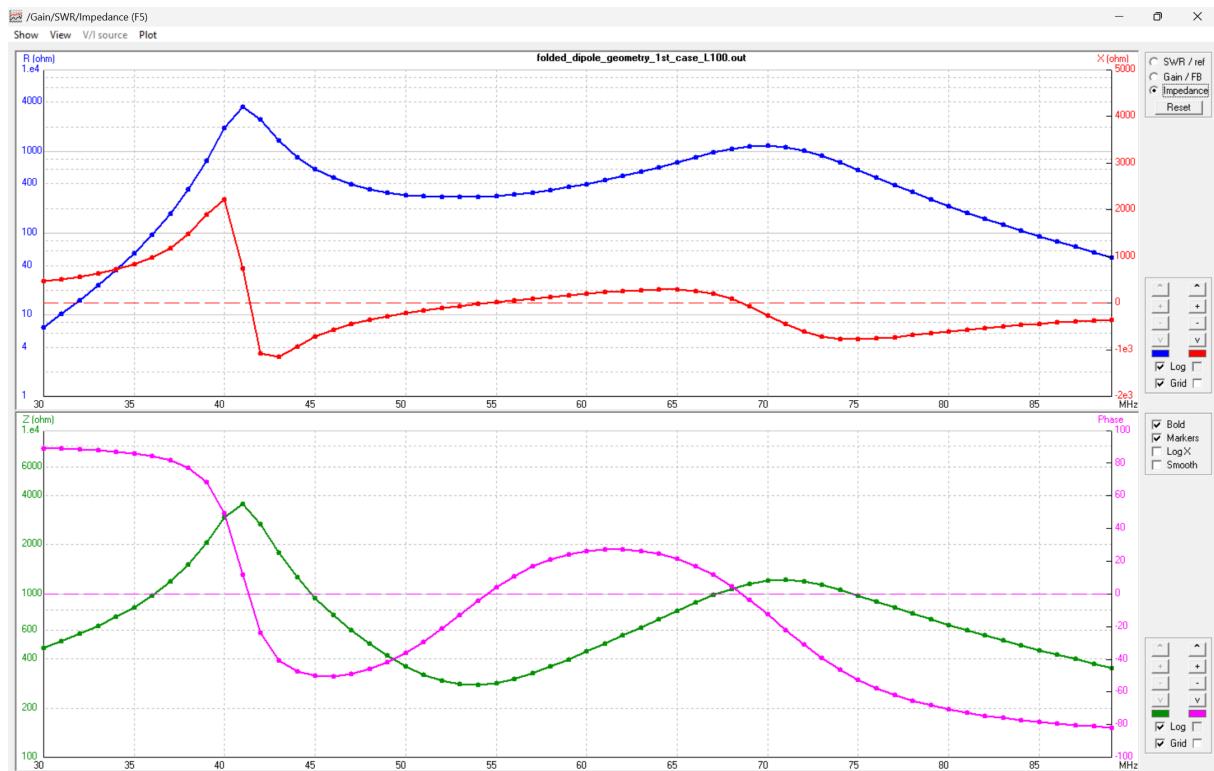
3.3 Ερώτημα (α): Ανάλυση Σύνθετης Αντίστασης Εισόδου

Πραγματοποιήθηκε σάρωση συχνότητας στο εύρος 30 MHz έως 90 MHz με αντίσταση αναφοράς 50Ω . Η ανάλυση επικεντρώνεται στον εντοπισμό των σημείων φυσικού συντονισμού της διάταξης, τα οποία ορίζονται από το μηδενισμό του αέργου μέρους ($X_{in} = 0$). Η ύπαρξη πολλαπλών σημείων συντονισμού οφείλεται στη σύνθετη φύση του αναδιπλωμένου διπόλου, το οποίο λειτουργεί ως συνδυασμός ακτινοβολούντος στοιχείου (antenna mode) και βραχυκυκλωμένης γραμμής μεταφοράς (transmission line mode).

3.3.1 Περίπτωση $s = \lambda/100$ (0.05 m)

Στην ελάχιστη απόσταση αγωγών, η δομή συμπεριφέρεται ως ιδανικό αναδιπλωμένο δίπολο με ισχυρή ηλεκτρομαγνητική σύζευξη μεταξύ των στελεχών.

- **Εντοπισμός Συντονισμού:** Το άεργο μέρος εμφανίζει τρία σημεία μηδενισμού στις συχνότητες 41.5, 55 και 68.5 MHz.
- **Ανάλυση R_{in} :** Στις συχνότητες 41.5 και 68.5 MHz, η πραγματική αντίσταση λαμβάνει εξαιρετικά υψηλές τιμές (2500 Ω και 1100 Ω αντίστοιχα), οι οποίες αντιστοιχούν σε παράλληλο συντονισμό και καθιστούν την πρακτική προσαρμογή αδύνατη. Αντίθετα, στα **55 MHz**, η αντίσταση μετρήθηκε στα 284 Ω, τιμή που προσεγγίζει εντυπωσιακά τη θεωρητική πρόβλεψη $Z_{in} \approx 4 \times 73 = 292 \Omega$.
- **Συμπεριφορά στα 60 MHz:** Στην ονομαστική συχνότητα σχεδίασης, η αντίσταση ανέρχεται στα 397 Ω με επαγωγικό χαρακτήρα ($X_{in} > 0$), υποδηλώνοντας ότι το φυσικό μήκος της κεραίας (2.5 m) είναι ηλεκτρικά μεγαλύτερο από το απαιτούμενο για συντονισμό στα 60 MHz.

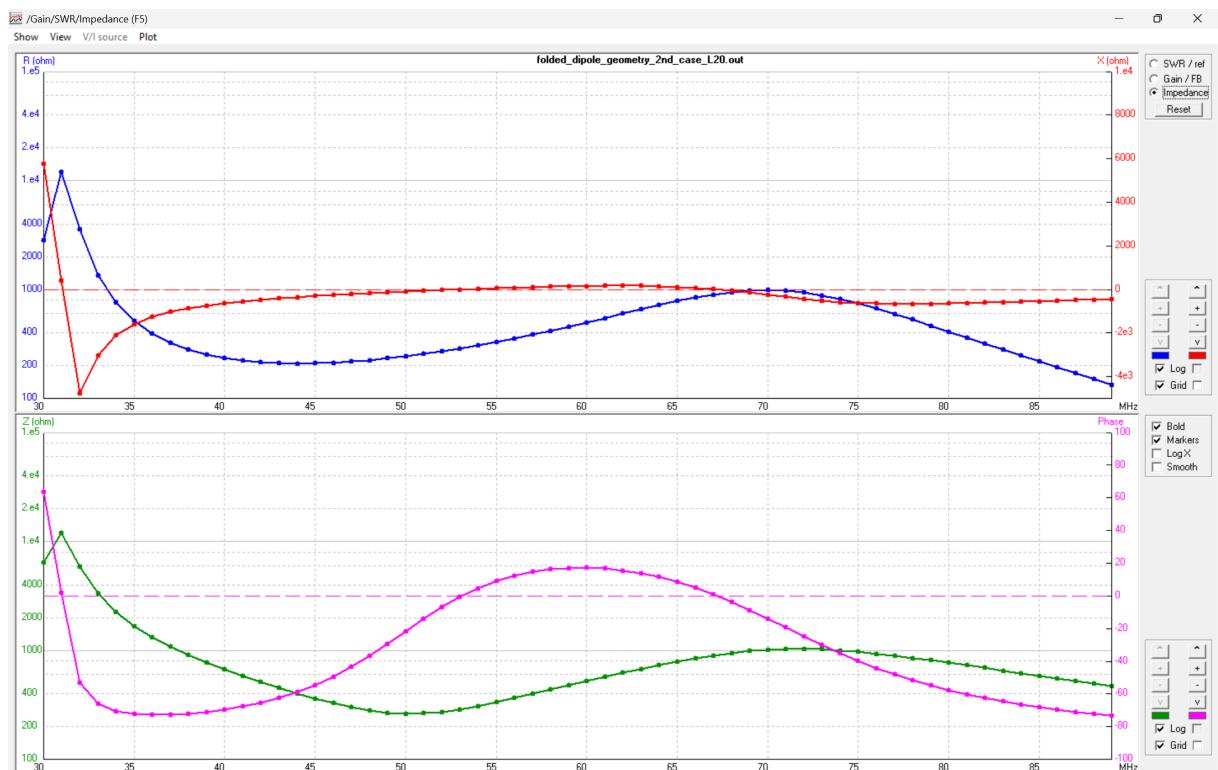


Σχήμα 17: Σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_{in} στο εύρος 30 – 90 MHz για την πρώτη περίπτωση.

3.3.2 Περίπτωση $s = \lambda/20$ (0.25 m)

Με την αύξηση της απόστασης, ο ρυθμός γραμμής μεταφοράς αρχίζει να επηρεάζει εντονότερα τη συνολική σύνθετη αντίσταση.

- **Μετατόπιση Συντονισμού:** Τα κύρια σημεία συντονισμού εντοπίζονται πλέον στις συχνότητες **53 MHz** και **67 MHz**.
- **Ανάλυση R_{in} :** Οι αντίστοιχες πραγματικές αντιστάσεις μετρήθηκαν στα 288Ω και 500Ω . Παρατηρείται ότι η αύξηση της απόστασης s προκαλεί μια ολίσθηση των σημείων συντονισμού και μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού της αντίστασης.



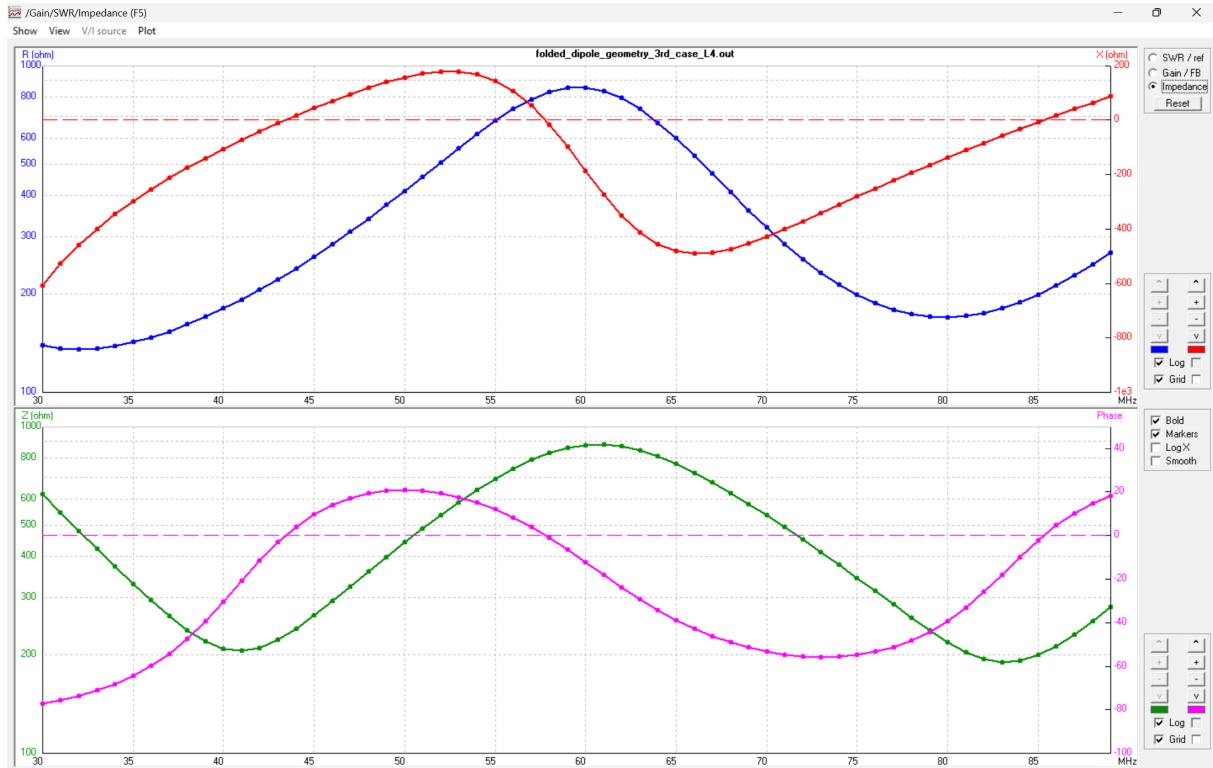
Σχήμα 18: Σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_{in} στο εύρος 30 – 90 MHz για την 2η περίπτωση.

3.3.3 Περίπτωση $s = \lambda/4$ (1.25 m)

Στην ακραία αυτή περίπτωση, η απόσταση των αγωγών παύει να είναι ηλεκτρικά μικρή, οδηγώντας σε απώλεια του χαρακτηριστικού αξονικού ρυθμού.

- **Απώλεια Αξονικού Ρυθμού:** Λόγω των έντονων φαινομένων συμβολής και της εξασθένισης της σύζευξης, η καμπύλη X_{in} εμφανίζει πολλαπλά σημεία μηδενισμού στα 43.5, 57.5 και 85.5 MHz.

- Συμπεριφορά:** Οι πραγματικές αντίστασις στα σημεία αυτά (230Ω , 800Ω και 205Ω) αποκλίνουν πλήρως από τη συμπεριφορά του τυπικού αναδιπλωμένου διπόλου, καθιστώντας τη δομή δύσχρηστη για τυπικές εφαρμογές προσαρμογής.



Σχήμα 19: Σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_{in} στο εύρος 30 – 90 MHz για την 3η περίπτωση.

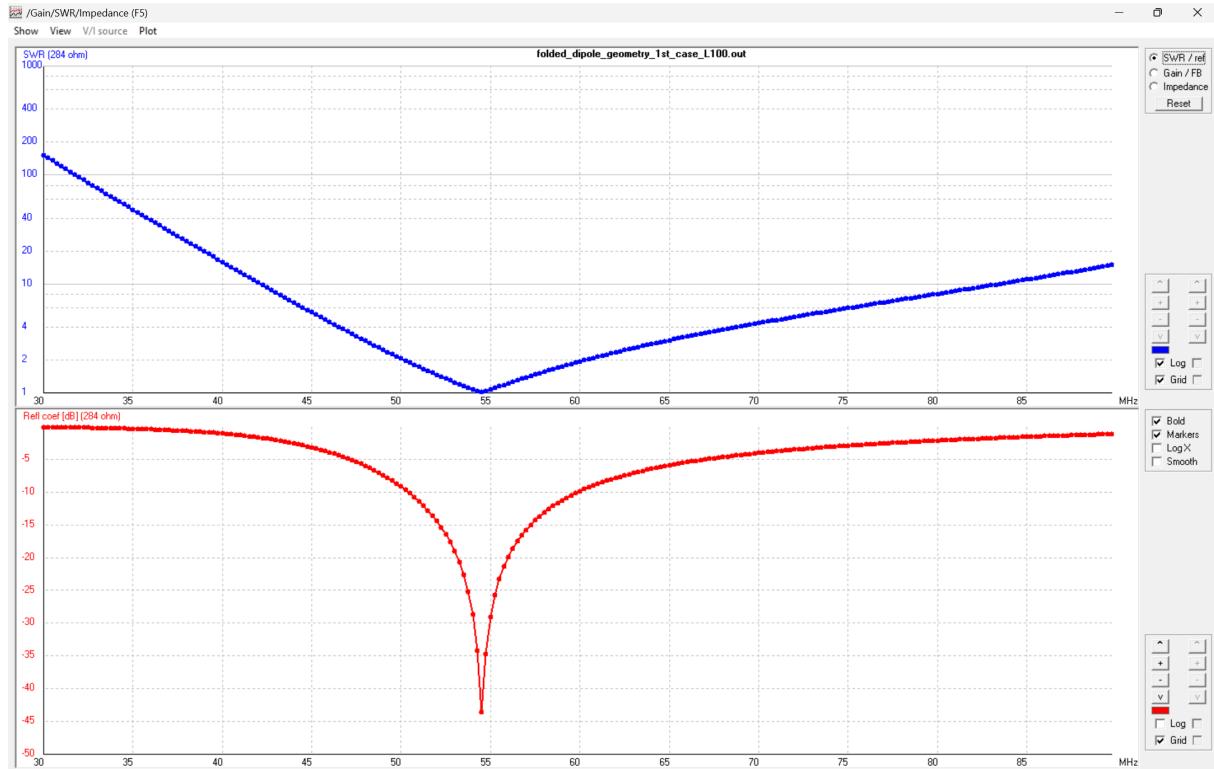
3.3.4 Στρατηγική Διερεύνησης Προσαρμογής

Στη συνέχεια της μελέτης, θα εξεταστεί η επίδραση της αντίστασης αναφοράς Z_0 στον συντελεστή ανάκλασης (Γ) και στον λόγο στασίμων κυμάτων (SWR) για όλες τις περιπτώσεις. Συγκεκριμένα:

- Για την **Περίπτωση 1**, θα δοκιμαστεί μόνο η συχνότητα των **55 MHz**, καθώς οι υπόλοιπες τιμές αντίστασης (2500Ω και 1100Ω) κρίνονται πρακτικά εξωφρενικές για υλοποίηση γραμμής μεταφοράς.
- Για την **Περίπτωση 2**, θα διερευνηθούν και τα δύο σημεία συντονισμού (53 και 67 MHz), προκειμένου να συγκριθεί το εύρος ζώνης που επιτυγχάνεται σε κάθε σημείο.
- Για την **Περίπτωση 3**, θα εξεταστούν όλοι οι διαθέσιμοι συντονισμοί, ώστε να αναδειχθεί η ακαταλληλότητα της διάταξης ως αναδιπλωμένο δίπολο υπό αυτές τις γεωμετρικές συνθήκες.

3.4 Ανάλυση Προσαρμογής: Περίπτωση $s = \lambda/100$

Μετά τον προσδιορισμό των σημείων συντονισμού από το διάγραμμα της σύνθετης αντίστασης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση του Λόγου Στασίμων Κυμάτων (SWR) και του συντελεστή ανάκλασης (dB), θέτοντας ως αντίσταση αναφοράς τη βέλτιστη τιμή $Z_0 = 284 \Omega$.



Σχήμα 20: Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR) και Συντελεστής Ανάκλασης (dB) για $Z_0 = 284 \Omega$ (Περίπτωση 1).

3.4.1 Παρατηρήσεις και Αποτελέσματα

- **Βέλτιστη Προσαρμογή:** Όπως παρατηρείται στο σχήμα 20, η επιλογή του $Z_0 = 284 \Omega$ οδηγεί σε έναν σχεδόν τέλειο μηδενισμό του συντελεστή ανάκλασης στη συχνότητα των **55 MHz**. Η τιμή του SWR στο σημείο αυτό είναι πρακτικά **1:1**, ενώ ο συντελεστής ανάκλασης πέφτει κάτω από τα **-45 dB**, υποδηλώνοντας ότι όλη η ισχύς μεταφέρεται στην κεραία χωρίς επιστροφές.
- **Εύρος Ζώνης (Bandwidth):** Με βάση το κριτήριο $SWR < 2$ (ή ανάκλαση $< -10 \text{ dB}$), η κεραία επιδεικνύει αρκετά καλή ευρυζωνικότητα. Η καμπύλη παρουσιάζει ομαλή κλίση γύρω από το σημείο συντονισμού, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Αυτό επιβεβαιώνει τη θεωρητική υπεροχή του αναδιπλωμένου διπόλου έναντι του απλού διπόλου ως προς το εύρος ζώνης λειτουργίας.

- **Απόρριψη Παράλληλων Συντονισμών:** Παρόλο που εντοπίστηκαν σημεία μηδενισμού του X_{in} στα 41.5 και 68.5 MHz, η δοκιμή της προσαρμογής απέδειξε ότι αυτά αντιστοιχούν σε παράλληλο συντονισμό με εξαιρετικά υψηλή αντίσταση.

3.4.2 Συμπεράσματα Περίπτωσης 1

Η πρώτη περίπτωση ($s = \lambda/100$) αποτελεί την ιδανική γεωμετρία λειτουργίας του αναδιπλωμένου διπόλου. Η σύζευξη μεταξύ των αγωγών είναι τέτοια ώστε ο λόγος μετασχηματισμού της αντίστασης να παραμένει κοντά στο 4:1.

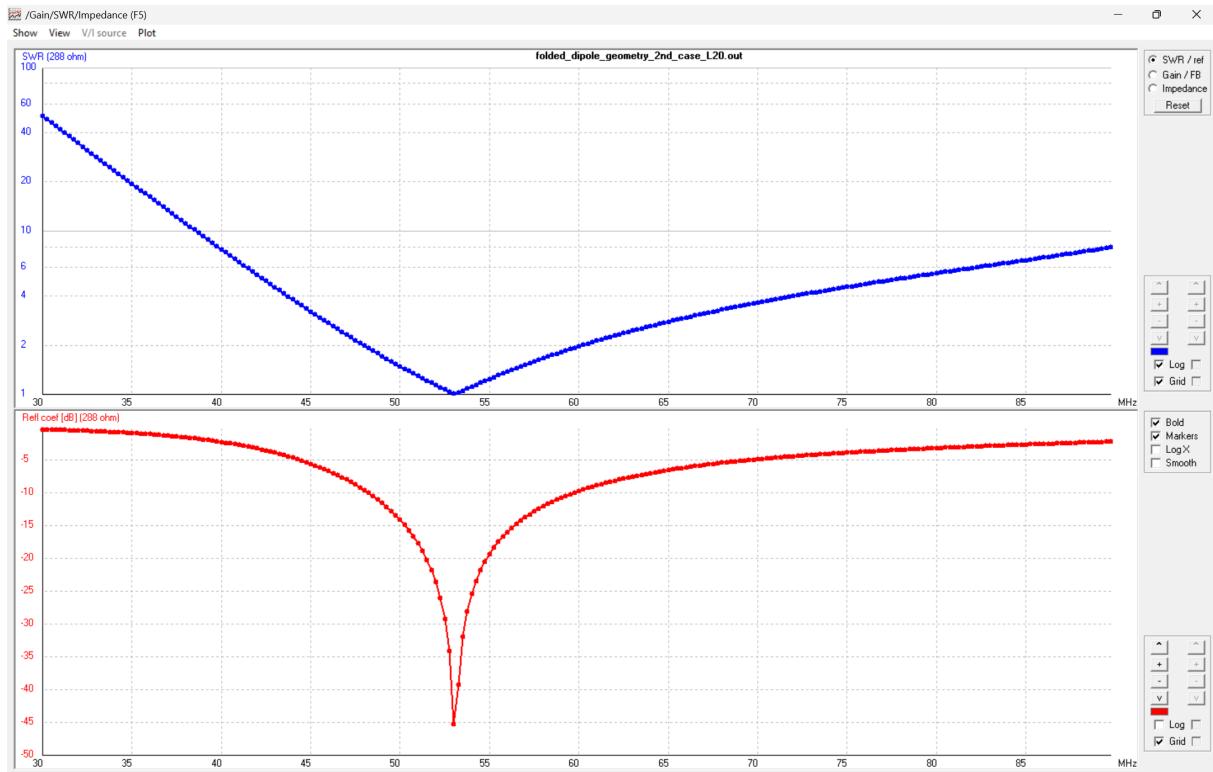
- Η κεραία είναι εύκολα προσαρμόσιμη σε τυπικές γραμμές μεταφοράς 300Ω .
- Η απόκλιση του συντονισμού στα 55 MHz (αντί για 60 MHz) οφείλεται στο ηλεκτρικό μήκος της διάταξης και την επίδραση του πάχους των αγωγών.

3.5 Ανάλυση Προσαρμογής: Περίπτωση $s = \lambda/20$

Στη δεύτερη περίπτωση, η απόσταση των αγωγών αυξήθηκε στα 0.25 m ($s = \lambda/20$). Η ανάλυση της σύνθετης αντίστασης έδειξε δύο κύρια σημεία συντονισμού ($X_{in} = 0$) πλησίον της κεντρικής συχνότητας, τα οποία διερευνώνται παρακάτω ως προς την ποιότητα προσαρμογής τους.

3.5.1 Προσαρμογή στο σημείο συντονισμού των 53 MHz

Ορίστηκε αντίσταση αναφοράς $Z_0 = 288\Omega$, τιμή που αντιστοιχεί στο πραγματικό μέρος της αντίστασης εισόδου κατά τον πρώτο συντονισμό.

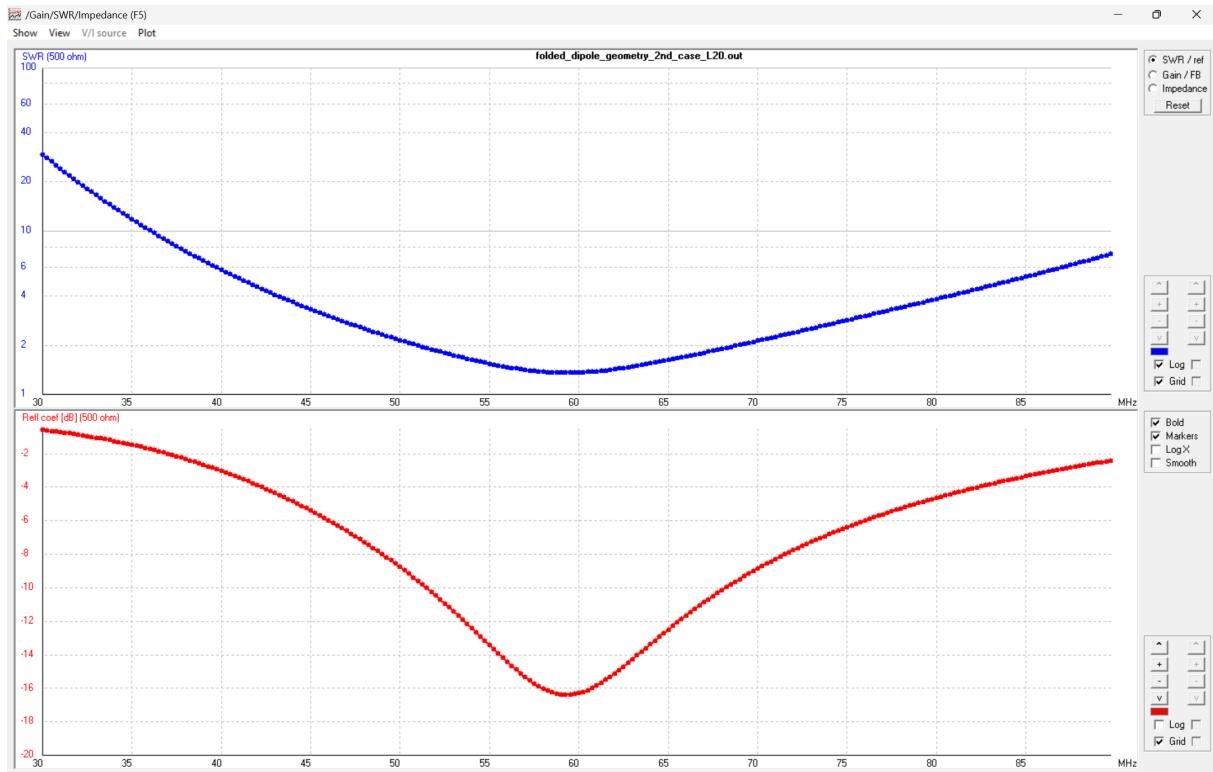


Σχήμα 21: Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR) και Συντελεστής Ανάκλασης (dB) για $Z_0 = 288 \Omega$ (Περίπτωση 2).

- **Αποτελέσματα:** Παρατηρείται άριστη προσαρμογή στη συχνότητα των **53 MHz**, με το SWR να αγγίζει τη μονάδα και τον συντελεστή ανάκλασης να πέφτει κάτω από τα **-45 dB**.
- **Ευρυζωνικότητα:** Η καμπύλη του SWR παραμένει σχετικά ανοιχτή, επιτρέποντας τη λειτουργία της κεραίας σε ένα ικανοποιητικό εύρος συχνοτήτων. Συγκριτικά με την Περίπτωση 1, οι δύο περιπτώσεις αποδίδουν παρόμοια.

3.5.2 Προσαρμογή στο σημείο συντονισμού των 67 MHz

Πραγματοποιήθηκε δεύτερη δοκιμή με αντίσταση αναφοράς $Z_0 = 500 \Omega$, προκειμένου να αξιολογηθεί ο συντονισμός που εμφανίζεται σε υψηλότερη συχνότητα.



Σχήμα 22: Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR) και Συντελεστής Ανάκλασης (dB) για $Z_0 = 500 \Omega$ (Περίπτωση 2).

- **Παρατηρήσεις:** Αν και επιτυγχάνεται συντονισμός στα **60 MHz** περίπου, η ποιότητα της προσαρμογής είναι υποδεέστερη. Ο συντελεστής ανάκλασης δεν παρουσιάζει την έντονη βύθιση των προηγούμενων περιπτώσεων, παραμένοντας στην περιοχή των **-17 dB** στην καλύτερη.
- **Συμπέρασμα:** Η χρήση αυτού του σημείου συντονισμού απαιτεί υψηλή αντίσταση γραμμής μεταφοράς (500Ω), η οποία είναι λιγότερο συνήθης στην πράξη και προσφέρει μικρότερη σταθερότητα στα χαρακτηριστικά της κεραίας.

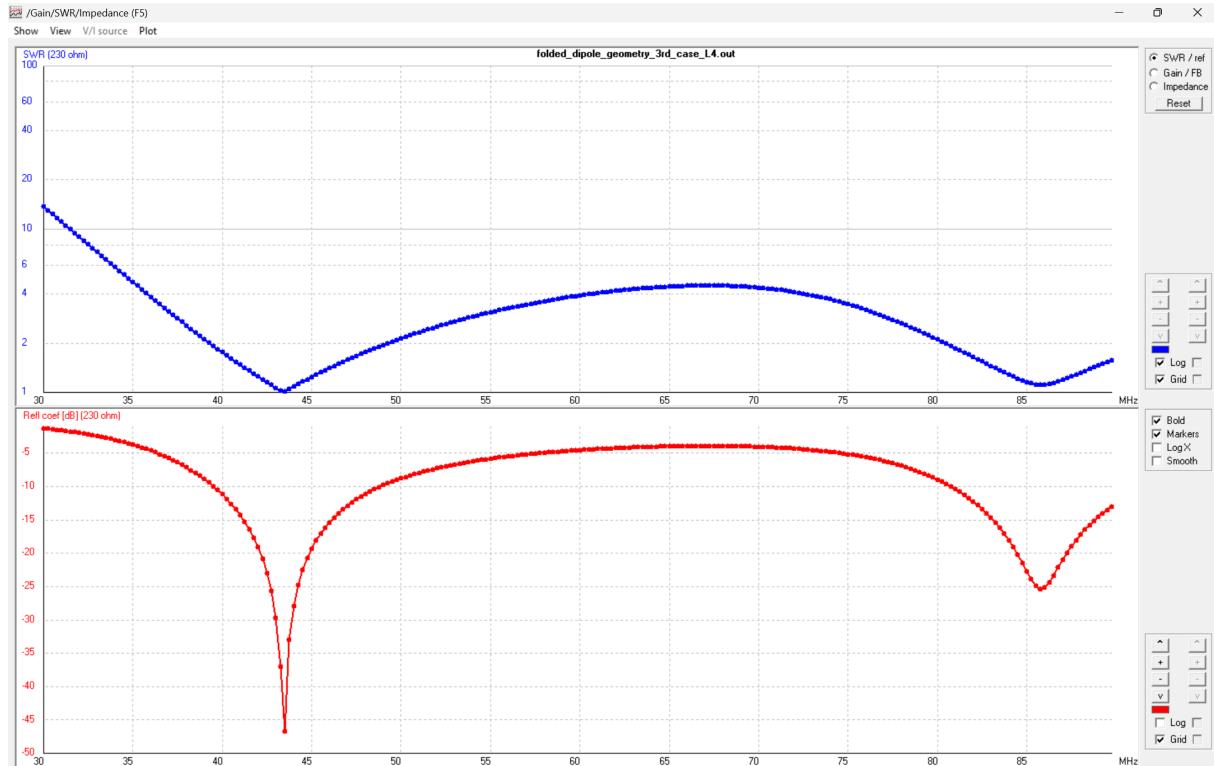
3.5.3 Συνολική Αξιολόγηση Περίπτωσης 2

Η αύξηση της απόστασης $s = \lambda/20$ εισάγει πιο έντονα τα χαρακτηριστικά της γραμμής μεταφοράς στη λειτουργία του διπόλου.

- Ο κύριος συντονισμός μετατοπίζεται στα 53 MHz, διατηρώντας μια αντίσταση κοντά στα θεωρητικά 300Ω .
- Η εμφάνιση δεύτερου σημείου συντονισμού με υψηλή αντίσταση (500Ω) αποδεικνύει ότι η δομή αρχίζει να συμπεριφέρεται ως ένας πιο σύνθετος συντονιστής, χάνοντας την απλότητα της απόκρισης του ιδανικού αναδιπλωμένου διπόλου.

3.6 Ανάλυση Προσαρμογής: Περίπτωση $s = \lambda/4$

Η τρίτη περίπτωση αποτελεί το ακραίο όριο της μελέτης. Λόγω της μεγάλης απόστασης των αγωγών, η δομή παύει να λειτουργεί ως ενιαίο αναδιπλωμένο δίπολο και συμπεριφέρεται ως ένα σύστημα συζευγμένων γραμμών με σύνθετη απόκριση συχνότητας. Χαρακτηριστικό της περίπτωσης αυτής είναι η εμφάνιση διπλών κοιλάδων στον συντελεστή ανάκλασης για μια δεδομένη τιμή Z_0 .



Σχήμα 23: Λόγος Σταύρων Κυμάτων (SWR) και Συντελεστής Ανάκλασης (dB) για $Z_0 = 230 \Omega$ (Περίπτωση 3).

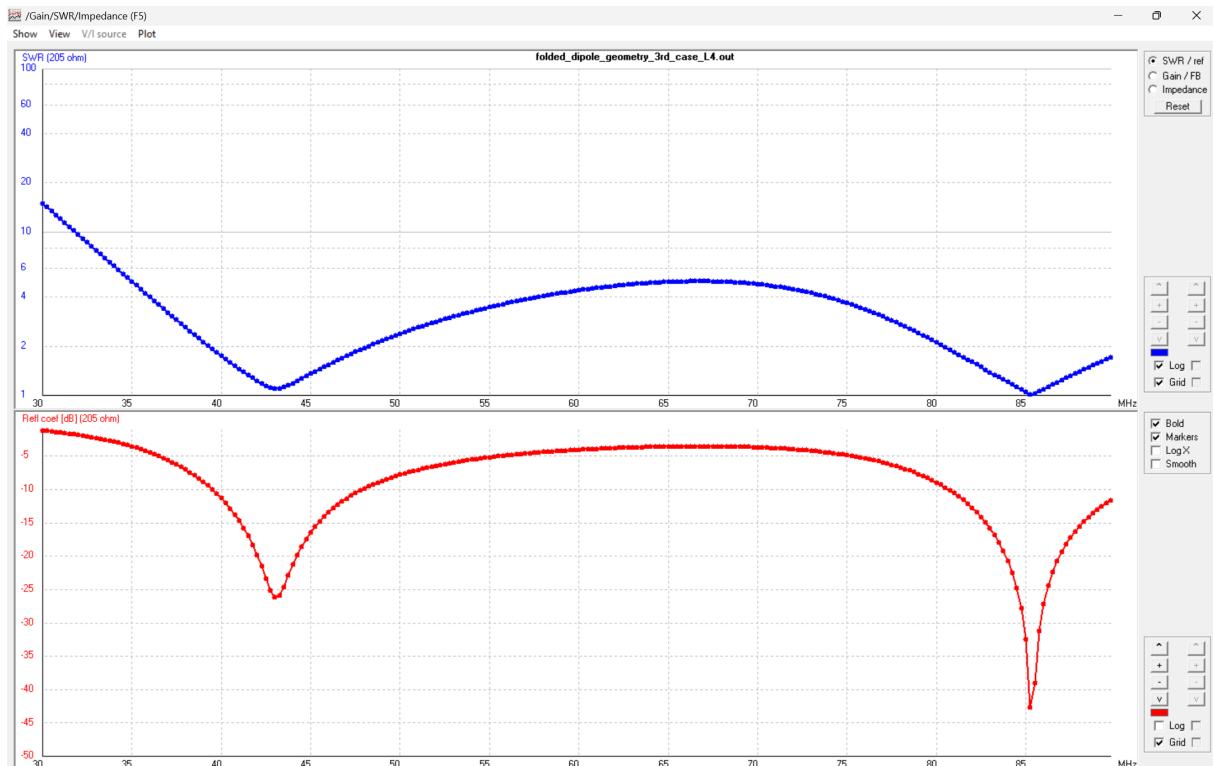
3.6.1 Δοκιμή στα 43.5 MHz και 85.5 MHz ($Z_0 \approx 230, 205 \Omega$)

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με αντιστάσεις αναφοράς $Z_0 = 230 \Omega$ (43.5 MHz) και $Z_0 = 205 \Omega$ (85.5 MHz). Στα διαγράμματα αυτά παρατηρείται το εξής αξιοσημείωτο φαινόμενο:

- **Διπλή Κοιλάδα Συντονισμού:** Ο συντελεστής ανάκλασης παρουσιάζει δύο περιοχές άριστης προσαρμογής (βαθιές κοιλάδες) και για τις δύο τιμές αντίστασης. Η πρώτη εντοπίζεται στα **43.5 MHz** και η δεύτερη στα **85.5 MHz**.
- **Ανάλυση Συμπεριφοράς και Εναλλαγής Συντονισμών:** Στα συγκεκριμένα σημεία, ο συντελεστής ανάκλασης επιτυγχάνει εξαιρετικά χαμηλές τιμές, υποδηλώνοντας τοπικά τέλεια προσαρμογή.

Ωστόσο, παρατηρείται το φαινόμενο της εμφάνισης δύο διακριτών κοιλάδων με αντιστρόφως ανάλογη ισχύ, ανάλογα με την αντίσταση αναφοράς Z_0 :

- Για $Z_0 = 230 \Omega$, η κύρια κοιλάδα εντοπίζεται στα **43.5 MHz** με εξαιρετική βύθιση ($-40 dB$), ενώ εμφανίζεται μια δεύτερη, ασθενέστερη κοιλάδα στα **85.5 MHz** (περίπου στα $-25 dB$).
- Αντίστροφα, για $Z_0 = 205 \Omega$, η ισχύς των συντονισμών μεταβάλλεται, με τη βαθύτερη κοιλάδα να μετατοπίζεται στην υψηλότερη συχνότητα (**85.5 MHz**), ενώ ο συντονισμός στα **43.5 MHz** καθίσταται πλέον ασθενέστερος.
- **Περιοχή ενδιάμεσου SWR:** Μεταξύ των δύο κοιλάδων (στην περιοχή των 60 MHz), το SWR εκτινάσσεται σε πολύ υψηλές τιμές, καθιστώντας την κεραία εντελώς ακατάλληλη για λειτουργία στην κεντρική συχνότητα σχεδίασης με αυτές τις παραμέτρους Z_0 .

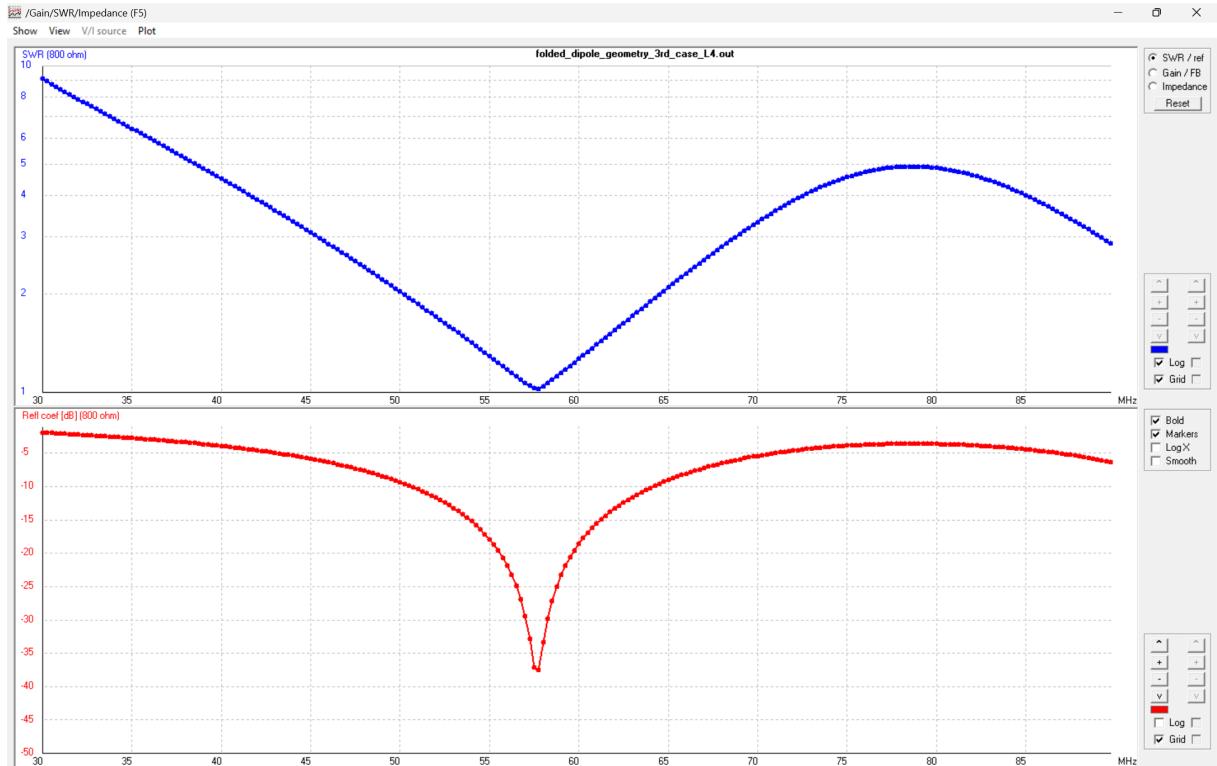


Σχήμα 24: Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR) και Συντελεστής Ανάχλασης (dB) για $Z_0 = 205 \Omega$ (Περίπτωση 3).

3.6.2 Δοκιμή στα 57.5 MHz ($Z_0 = 800 \Omega$)

- **Μεμονωμένη Κοιλάδα:** Με τη χρήση της εξαιρετικά υψηλής αντίστασης $Z_0 = 800 \Omega$, επιτυγχάνεται μία και μοναδική κοιλάδα συντονισμού πολύ κοντά στον στόχο, στα **57.5 MHz**.

- Συμπέρασμα:** Παρόλο που αυτή η ρύθμιση φέρνει τον συντονισμό κοντά στα 60 MHz, η απαιτούμενη τιμή των 800Ω είναι υπερβολικά μεγάλη για οποιαδήποτε εμπορική γραμμή μεταφοράς, επιβεβαιώνοντας ότι η απόσταση $s = \lambda/4$ καταστρέφει κατά κάποιο τρόπο τις ιδιότητες της κεραίας.



Σχήμα 25: Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR) και Συντελεστής Ανάκλασης (dB) για $Z_0 = 800 \Omega$ (Περίπτωση 3).

3.6.3 Συνολική Αξιολόγηση Περίπτωσης 3

Η εμφάνιση των δύο κοιλάδων στα 205, 230 Ω αποτελεί το σαφέστερο δείγμα ότι η απόσταση των αγωγών είναι υπερβολική. Η ηλεκτρομαγνητική σύζευξη έχει εξασθενήσει τόσο, ώστε οι δύο αγωγοί να λειτουργούν ως ανεξάρτητα στοιχεία που αλληλεπιδρούν μέσω φαινομένων συμβολής, δημιουργώντας πολλαπλά και στενά σημεία συντονισμού αντί για ένα ενιαίο πιο ευρύ φάσμα λειτουργίας.

3.7 Επιλογή Παραμέτρων για την Ανάλυση Ακτινοβολίας

Προκειμένου να διεξαχθεί η μελέτη των διαγραμμάτων ακτινοβολίας (οριζόντιο, κατακόρυφο και 3D), είναι απαραίτητος ο καθορισμός μίας μοναδικής αντίστασης αναφοράς Z_0 για κάθε γεωμετρική περίπτωση. Η επιλογή βασίστηκε στη βέλτιστη δυνατή προσαρμογή πλησίον της κεντρικής συχνότητας σχεδίασης.

3.7.1 Τελικές Τιμές Προσομοίωσης ανά Περίπτωση

- **Περίπτωση 1 ($s = \lambda/100$):** Επιλέγεται η συχνότητα των **55 MHz** με αντίσταση αναφοράς $Z_0 = 284\Omega$. Η επιλογή αυτή κρίνεται ως η πλέον αντιπροσωπευτική, καθώς το σημείο αυτό αποτελεί τον κύριο συντονισμό του αναδιπλωμένου διπόλου, προσφέροντας εξαιρετική προσαρμογή και επιβεβαιώνοντας τη θεωρητική τιμή $4 \times R_d$.
- **Περίπτωση 2 ($s = \lambda/20$):** Επιλέγεται η συχνότητα των **67 MHz** με $Z_0 = 500\Omega$. Παρόλο που η προσαρμογή είναι υποδεέστερη συγκριτικά με τον πρώτο συντονισμό (-17 dB έναντι -45 dB), η επιλογή αυτή προκρίνεται διότι βρίσκεται πλησιέστερα στην κεντρική συχνότητα των 60 MHz.
- **Περίπτωση 3 ($s = \lambda/4$):** Παρά τις πρακτικές δυσκολίες υλοποίησης, επιλέγεται η συχνότητα των **57.5 MHz** με $Z_0 = 800\Omega$. Η επιλογή αυτή προκρίνεται έναντι των σημείων με τις διπλές κοιλάδες ($205, 230\Omega$), διότι παρέχει μια σαφή και μοναδική περιοχή συντονισμού πλησίον της κεντρικής συχνότητας.

3.7.2 Εξαγωγή Διαγραμμάτων Ακτινοβολίας

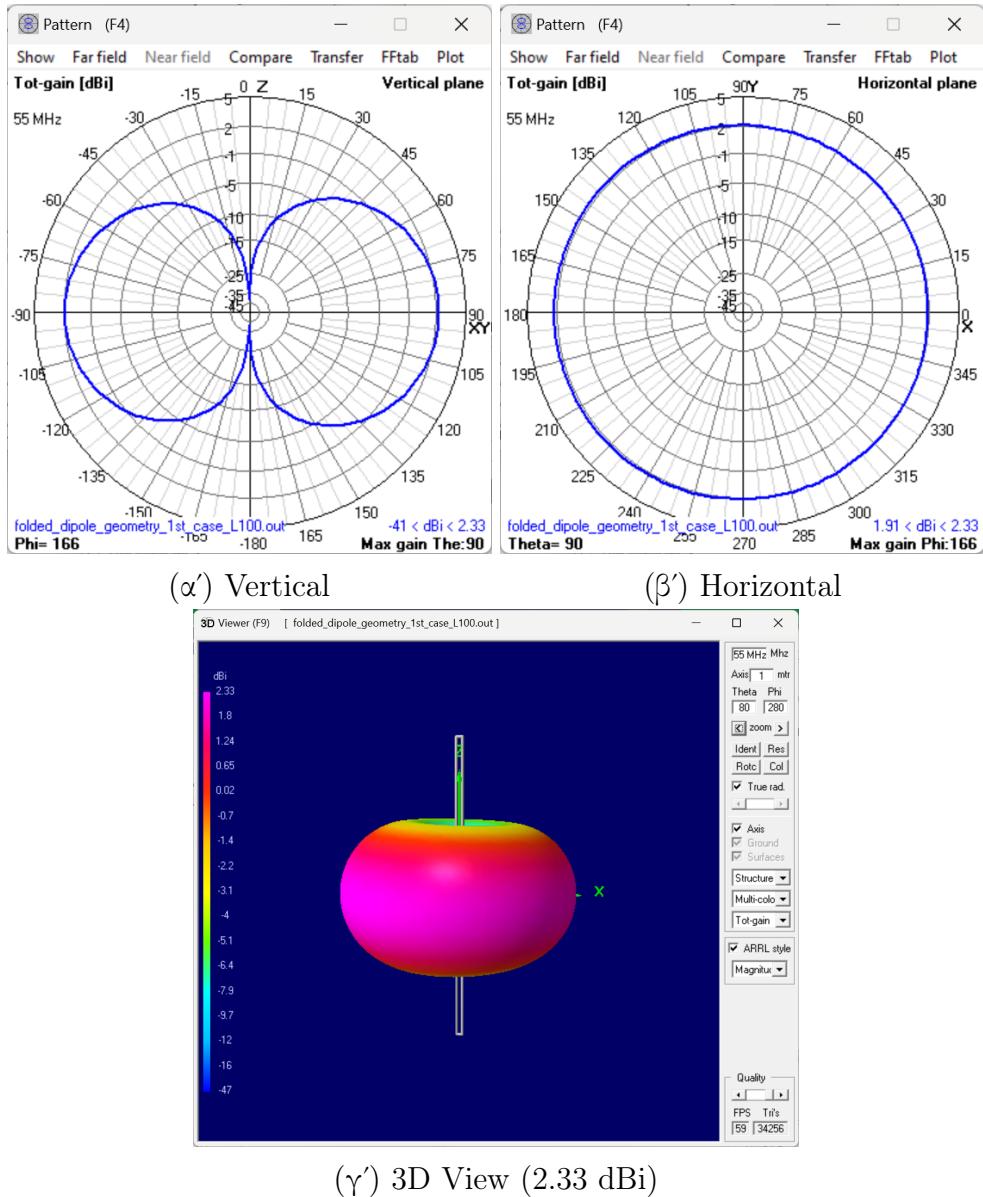
Για την ολοκλήρωση της μελέτης, εξήχθησαν τα διαγράμματα ακτινοβολίας στο μακρινό πεδίο (Far-field) για τις τρεις περιπτώσεις απόστασης των αγωγών.

Περίπτωση 1: Απόσταση $s = \lambda/100$ (55 MHz, $Z_0 = 284\Omega$)

Στην ελάχιστη απόσταση αγωγών, η κεραία παρουσιάζει την πλέον καθαρή συμπεριφορά ακτινοβολίας.

- **Διαγράμματα 2D:** Το κατακόρυφο διάγραμμα παρουσιάζει το σχεδόν ιδανικό σχήμα «8» (figure-eight), με βαθύς μηδενισμούς στον άξονα του διπόλου. Το οριζόντιο διάγραμμα είναι πλήρως πανκατευθυντικό (omnidirectional).
- **Κέρδος:** Το μέγιστο κέρδος υπολογίστηκε στα **2.33 dB**.

- **3D Απεικόνιση:** Ο λοβός έχει τη χαρακτηριστική μορφή δακτυλίου (donut shape), επιβεβαιώνοντας τη συμμετρική κατανομή του ρεύματος κατά μήκος των στελεχών.



Σχήμα 26: Αποτελέσματα ακτινοβολίας για την Περίπτωση 1.

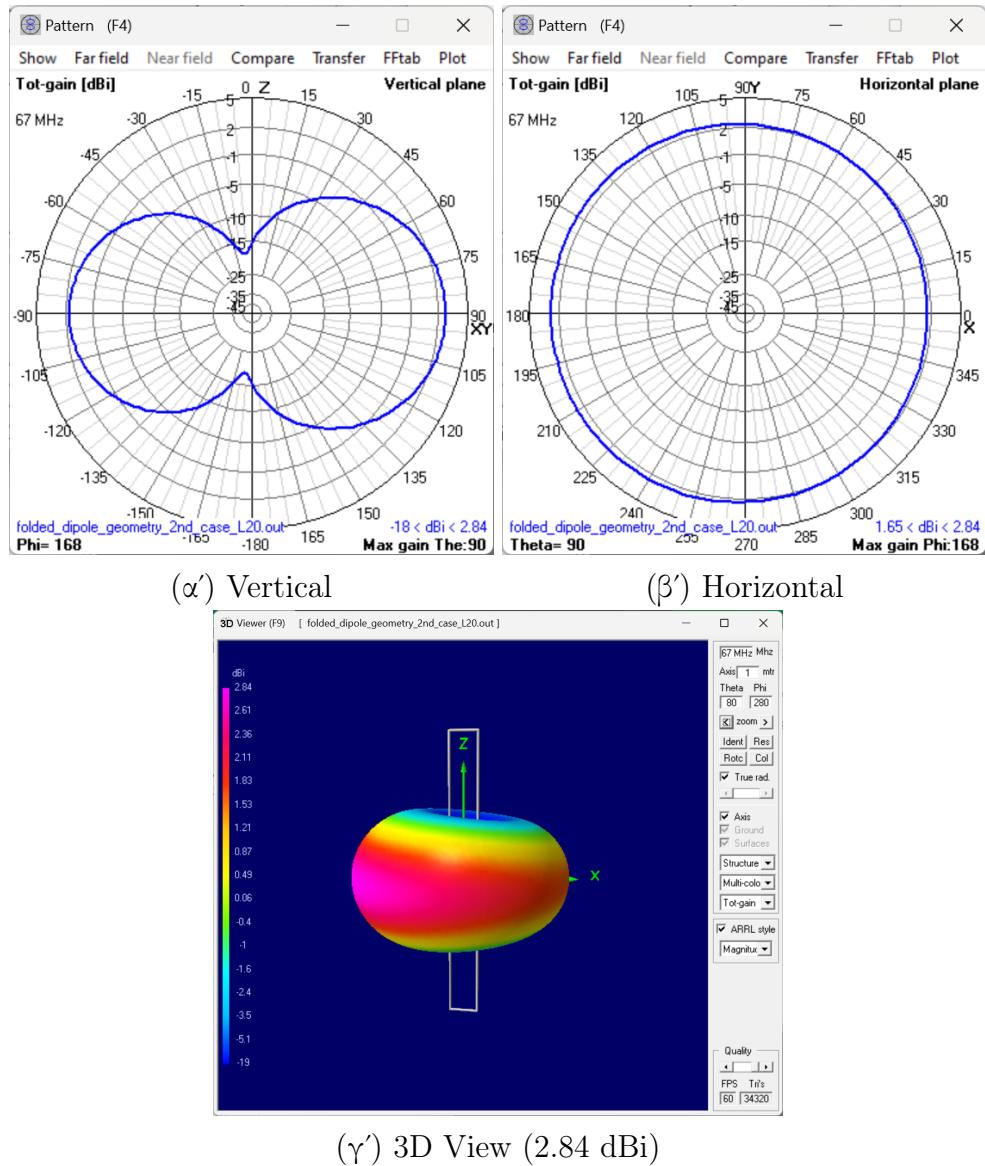
Περίπτωση 2: Απόσταση $s = \lambda/20$ (67 MHz, $Z_0 = 500 \Omega$)

Με την αύξηση της απόστασης και τη λειτουργία σε υψηλότερη συχνότητα, παρατηρούνται μεταβολές στην κατευθυντικότητα.

- **Διαγράμματα 2D:** Το κατακόρυφο διάγραμμα παραμένει παρόμοιο με το δίπολο μισού κύματος, ωστόσο χάνει ελαφρώς την συμμετρία

του. Το οριζόντιο διάγραμμα διατηρεί την πανκατευθυντικότητά του με ελαφρώς αυξημένη ένταση.

- **Κέρδος:** Το μέγιστο κέρδος αυξάνεται στα **2.84 dBi**, λόγω του μεγαλύτερου ηλεκτρικού μήκους των αγωγών στη συχνότητα των 67 MHz.
- **3D Απεικόνιση:** Παρατηρείται μια μικρή «πάχυνση» του λοβού, ενώ η κατανομή παραμένει ομαλή.

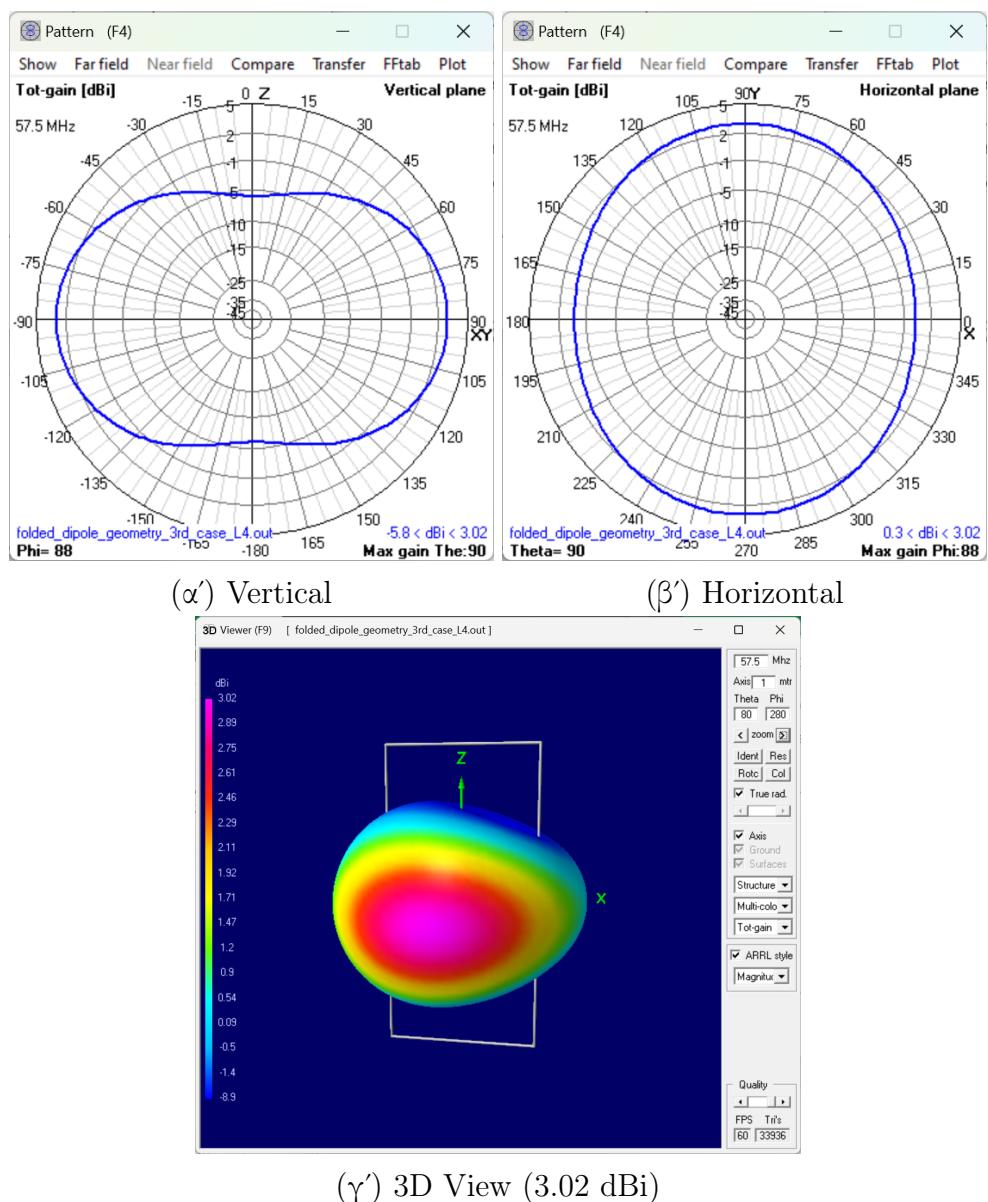


Σχήμα 27: Αποτελέσματα ακτινοβολίας για την Περίπτωση 2.

Περίπτωση 3: Απόσταση $s = \lambda/4$ (57.5 MHz, $Z_0 = 800 \Omega$)

Στην ακραία αυτή περίπτωση, η μεγάλη απόσταση των αγωγών αλλοιώνει τη συμπεριφορά της κεραίας.

- Διαγράμματα 2D:** Στο κατακόρυφο διάγραμμα παρατηρείται μια έντονη απόκλιση από το ιδανικό σχήμα «8». Η μεγάλη ηλεκτρική απόσταση μεταξύ των αγωγών προκαλεί φαινόμενα συμβολής, με αποτέλεσμα ο λοβός να εμφανίζεται πεπιεσμένος κατά μήκος του άξονα μέγιστης ακτινοβολίας, χάνοντας την καμπυλότητα που χαρακτηρίζει ένα τυπικό δίπολο μισού κύματος.
- Κέρδος:** Παρατηρείται το υψηλότερο κέρδος (**3.02 dBi**), καθώς η διάταξη αρχίζει σιγά σιγά να λειτουργεί ως στοιχειοκεραία δύο παράλληλων στοιχείων.
- 3D Απεικόνιση:** Ο λοβός εμφανίζεται πεπιεσμένος και επιμήκης, αναδεικνύοντας την απώλεια της κυλινδρικής συμμετρίας που χαρακτήριζε τις προηγούμενες περιπτώσεις.



Σχήμα 28: Αποτελέσματα ακτινοβολίας για την Περίπτωση 3.

4 Θέμα 3β: Ανάλυση Κεραίας Οδεύοντος Κύματος

Στο παρόν ερώτημα εξετάζεται η συμπεριφορά μιας οριζόντιας κεραίας οδεύοντος κύματος τύπου Beverage, μήκους 5λ . Η κεραία μοντελοποιείται ως μια γραμμή μεταφοράς με απώλειες ακτινοβολίας, όπου ο τερματισμός με την κατάλληλη αντίσταση R_L εξασφαλίζει την απορρόφηση της ενέργειας στο άκρο και την ελαχιστοποίηση των ανακλάσεων.

4.1 Γεωμετρία και Ρεαλιστική Μοντελοποίηση

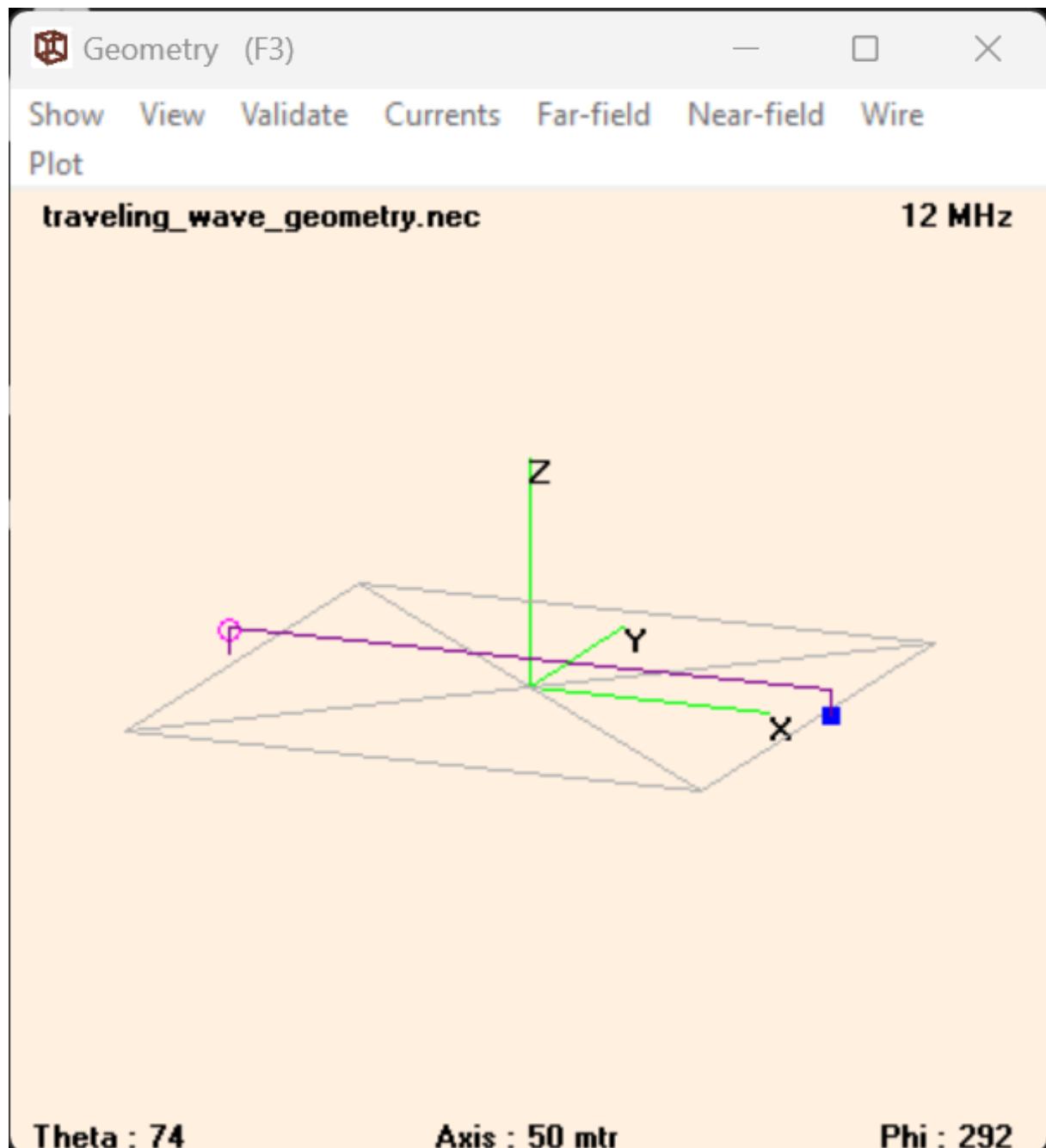
Για την επίτευξη υψηλής ακρίβειας στην προσομοίωση, η γεωμετρία δεν περιορίζεται σε έναν απλό οριζόντιο αγωγό, αλλά συμπεριέλαβε κατακόρυφα τμήματα σύνδεσης:

- **Οριζόντιος Αγωγός (GW 1):** Μήκος $L = 125$ m (5λ στα 12 MHz) και ύψος $h = \lambda/4 = 6.25$ m.
- **Κατακόρυφα Σύρματα (GW 2, GW 3):** Προστέθηκαν δύο κατακόρυφοι αγωγοί για τη σύνδεση της πηγής και της αντίστασης με το έδαφος. Χρησιμοποιήθηκε λεπτότερη ακτίνα $a_{feed} = a_{wire}/4$ για τον ρεαλιστικό διαχωρισμό των γραμμών σύνδεσης από τον κύριο αγωγό ακτινοβολίας.
 - **Τοποθέτηση Πηγής/Φορτίου:** Η διέγερση (EX) τοποθετήθηκε στην κορυφή του αριστερού κατακόρυφου αγωγού (σημείο ένωσης με τον οριζόντιο), ενώ η αντίσταση τερματισμού (LD) τοποθετήθηκε στη βάση του δεξιού αγωγού, προσομοιώνοντας τη γείωση μέσω τερματικής αντίστασης.

Η επιλογή αυτής της διάταξης έγινε για τους εξής λόγους:

1. **Ορθή Διέγερση:** Η τοποθέτηση της πηγής στο σημείο ένωσης (junction) διασφαλίζει ότι η ενέργεια διοχετεύεται απευθείας στον οριζόντιο αγωγό. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Wikipedia, "Beverage antenna"), η κεραία συνδέεται με τη γραμμή τροφοδοσίας μέσω ενός μετασχηματιστή προσαρμογής (transformer/balun) στο άκρο του σύρματος. Η τοποθέτηση στο junction προσομοιώνει ακριβώς αυτή τη σύνδεση στο ύψος της κεραίας, αποφεύγοντας την παρασιτική ακτινοβολία του κατακόρυφου τμήματος που θα προέκυπτε αν η πηγή τοποθετούνταν στη βάση.
2. **Εξάλειψη Ανακλάσεων:** Η τοποθέτηση της αντίστασης στη βάση (επαφή με το έδαφος) εξασφαλίζει τον πλήρη τερματισμό του οδεύοντος κύματος στη γη. Όπως ορίζεται στη θεωρία της κεραίας Beverage, το οριζόντιο σύρμα μοντελοποιείται ως γραμμή μεταφοράς (transmission line) που πρέπει να βραχυκυκλώνεται προς τη γείωση μέσω αντίστασης ίσης με τη χαρακτηριστική της εμπέδηση, ώστε να εξαλείφονται οι ανακλάσεις.

Παρακάτω φαίνεται η αντίστοιχη γεωμετρία της κεραίας.



Σχήμα 29: Η γεωμετρία της κεραίας στο 4nec2

4.2 Ανάλυση Κατάτμησης (Segmentation)

Το μοντέλο χωρίστηκε σε 101 τμήματα στον οριζόντιο αγωγό και 5 τμήματα σε κάθε κατακόρυφο. Με μήκος τμήματος $\Delta L \approx 1.23$ m, ικανοποιείται το κριτήριο $\Delta L < \lambda/10$ ακόμα και στη μέγιστη συχνότητα των 18 MHz ($\lambda_{min}/10 \approx 1.66$ m), διασφαλίζοντας αριθμητική σύγκλιση.

4.3 Βελτιστοποίηση Αντίστασης Τερματισμού (R_L)

Η θεωρητική τιμή της χαρακτηριστικής αντίστασης $Z_0 \approx 317.5 \Omega$ υπολογίστηκε βάσει του τύπου $Z_0 \approx 138 \log_{10}(4h/d)$. Ωστόσο, η προσομοίωση έδειξε ότι η κατάλληλη αντίσταση μεταβάλλεται δραματικά ανάλογα με τον τύπο του εδάφους.

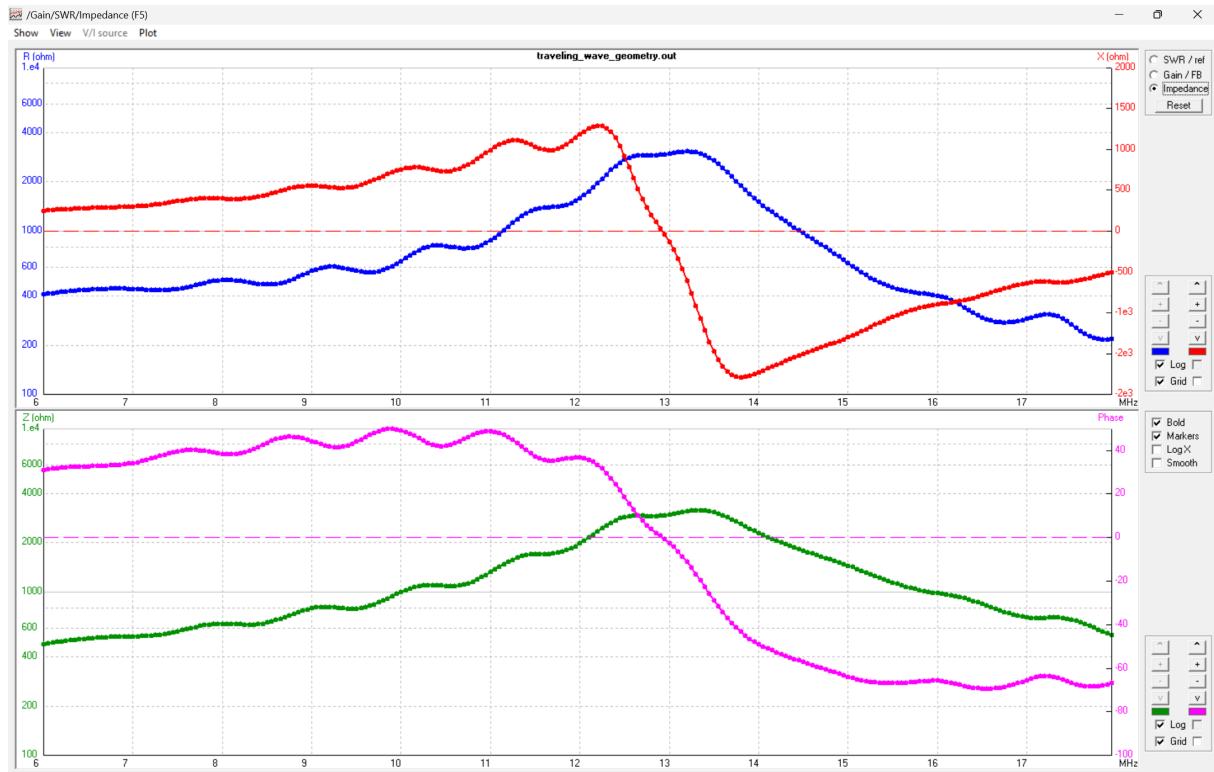
4.4 Συγκριτική Αξιολόγηση Αντιστάσεων Τερματισμού (R_L) υπό συνθήκες Perfect Ground

Στην παρούσα ενότητα παρατίθεται η συγκριτική ανάλυση τριών διαφορετικών τιμών τερματισμού, με στόχο τον εντοπισμό της κατάλληλης αντίστασης που εξασφαλίζει τη λειτουργία οδεύοντος κύματος (traveling wave).

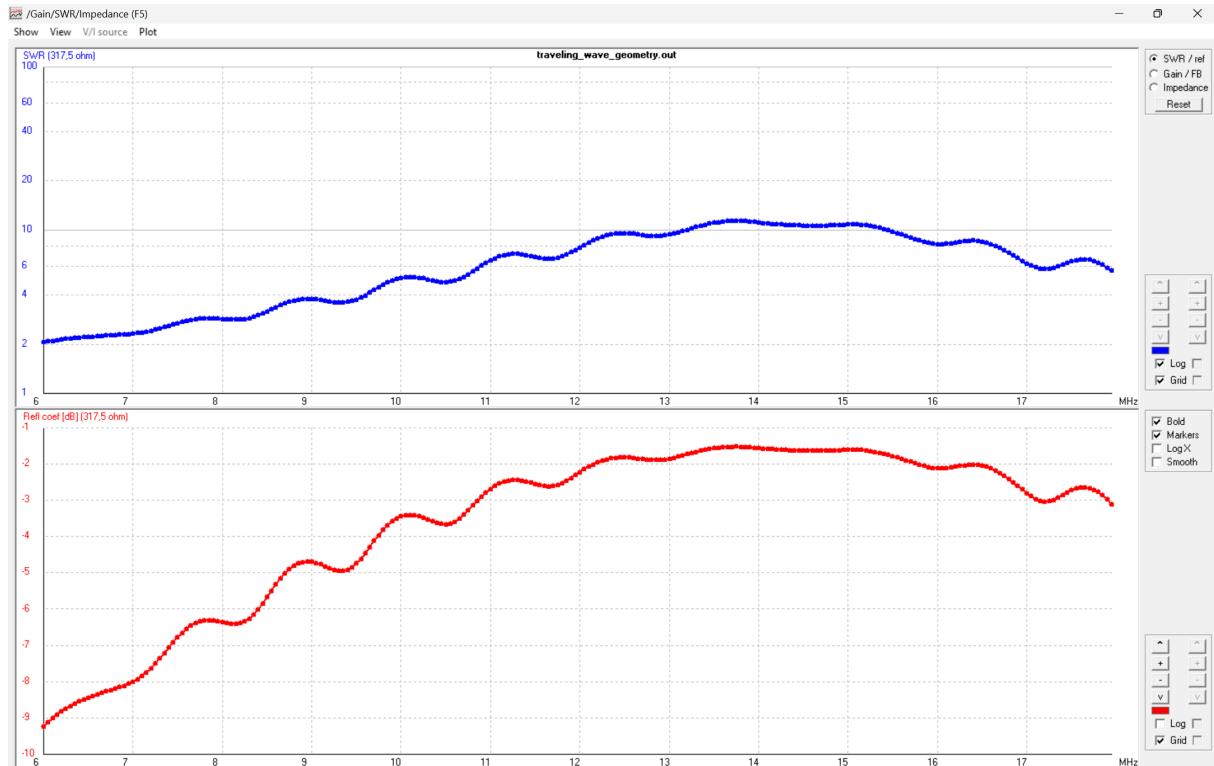
4.4.1 Περίπτωση 1: Θεωρητική Τιμή ($R_L = 317.5 \Omega$)

Η τιμή αυτή προέκυψε από τον κλασικό τύπο υπολογισμού της χαρακτηριστικής εμπέδησης Z_0 για πραγματικά εδάφη.

- **Παρατήρηση:** Στο Perfect Ground, η τιμή αυτή αποδείχθηκε ανεπαρκής, καθώς η έλλειψη απωλειών εδάφους διατηρεί την πραγματική Z_0 της κεραίας σε πολύ υψηλότερα επίπεδα.
- **Αποτελέσματα:** Το SWR παρουσιάζει συνεχή ανοδική τάση με τη συχνότητα, ξεπερνώντας το 10 στην περιοχή των 15 MHz, ενώ ο συντελεστής ανάκλασης παραμένει άνω των -5 dB , υποδηλώνοντας έντονα στάσιμα κύματα.



Σχήμα 30: Σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_{in} στο εύρος 12 – 18 MHz για την 1η περίπτωση.



Σχήμα 31: Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR) και Συντελεστής Ανάκλασης (dB) για $Z_0 = 317.5 \Omega$ (Περίπτωση 1).

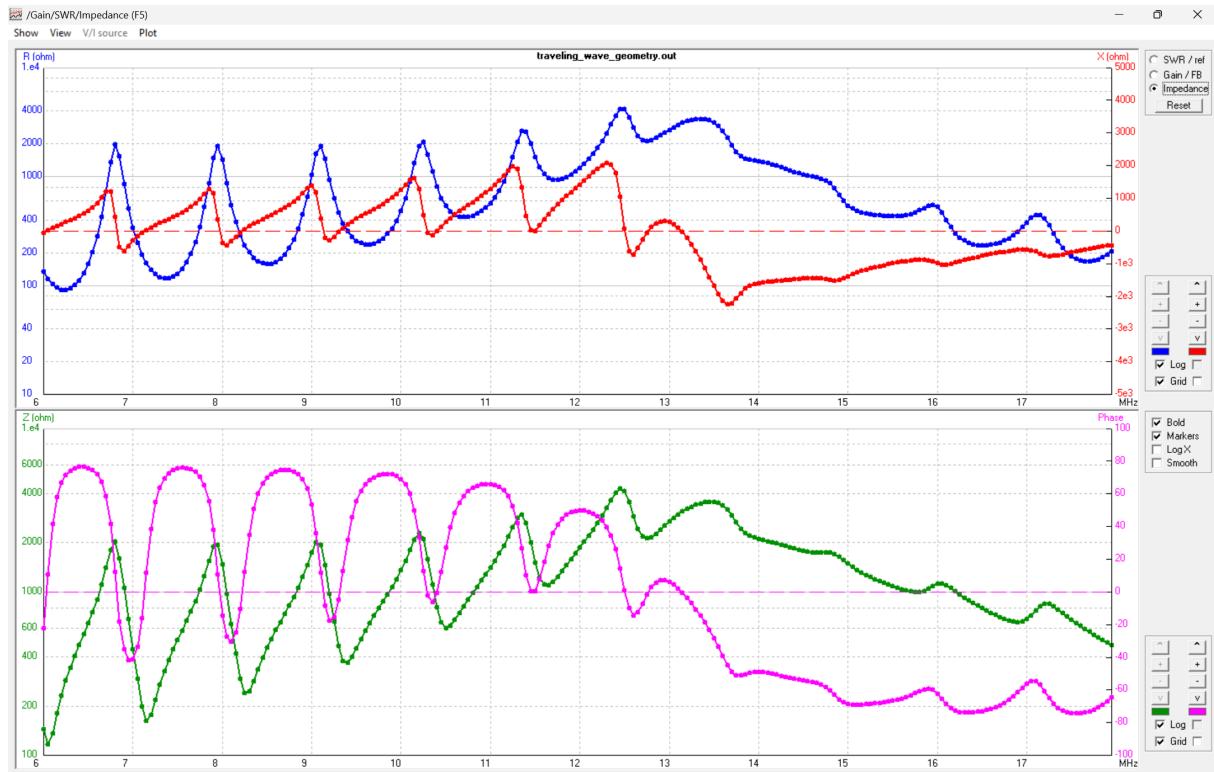
4.4.2 Περίπτωση 2: Τιμή Ακραίου Συντονισμού ($R_L = 2943 \Omega$)

Η τιμή αυτή επιλέχθηκε πειραματικά, αντιστοιχώντας στην απόλυτη κορυφή (peak) της αντίστασης εισόδου R_{in} που παρατηρήθηκε κατά την αρχική σάρωση.

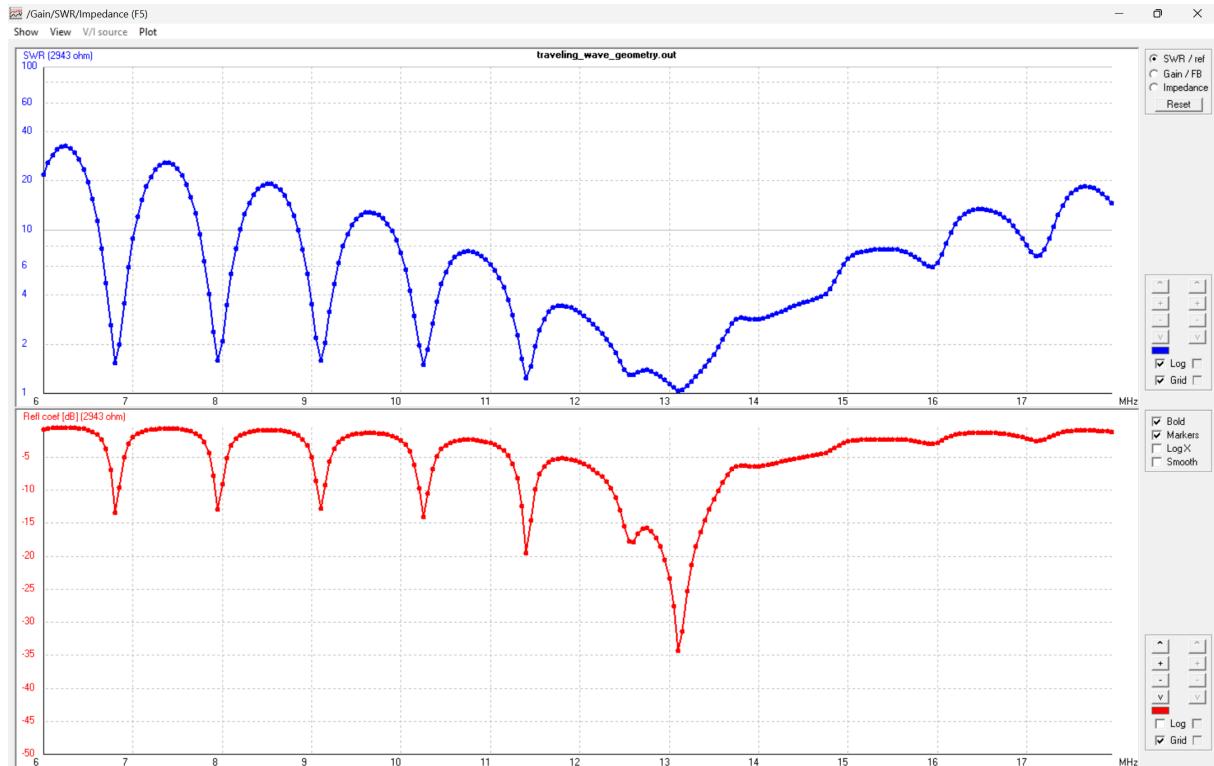
- **Φυσική Ερμηνεία:** Η επιλογή αυτή στοχεύει στον εξαναγκασμό της κεραίας σε κατάσταση συντονισμού ($X_{in} \approx 0$) σε συγκεκριμένες συχνότητες. Ωστόσο, η τιμή αυτή (2943Ω) είναι υπερβολικά υψηλή για τη φύση της γραμμής, με αποτέλεσμα η αντίσταση τερματισμού να λειτουργεί ως ανοικτοκύλωμα (high-impedance mismatch).

• **Ανάλυση Αποτελεσμάτων:**

- Η απόκριση του SWR καθίσταται εξαιρετικά νευρική και ασταθής. Ενώ επιτυγχάνονται σημεία τέλειας προσαρμογής, η παραμικρή μεταβολή της συχνότητας οδηγεί σε εκτίναξη του SWR σε τιμές άνω του 20.
- Ο συντελεστής ανάκλασης (Γ) παρουσιάζει βίαιες ταλαντώσεις. Παρατηρείται ότι στις υψηλές συχνότητες, η καμπύλη τείνει να σταθεροποιηθεί γύρω από τα -5 dB, γεγονός που υποδηλώνει ότι η ανάκλαση δεν ελέγχεται πλέον από το φορτίο αλλά από τις εγγενείς απώλειες ακτινοβολίας της δομής.
- **Συμπέρασμα:** 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.



Σχήμα 32: Σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_{in} στο εύρος 12 – 18 MHz για την 2η περίπτωση.

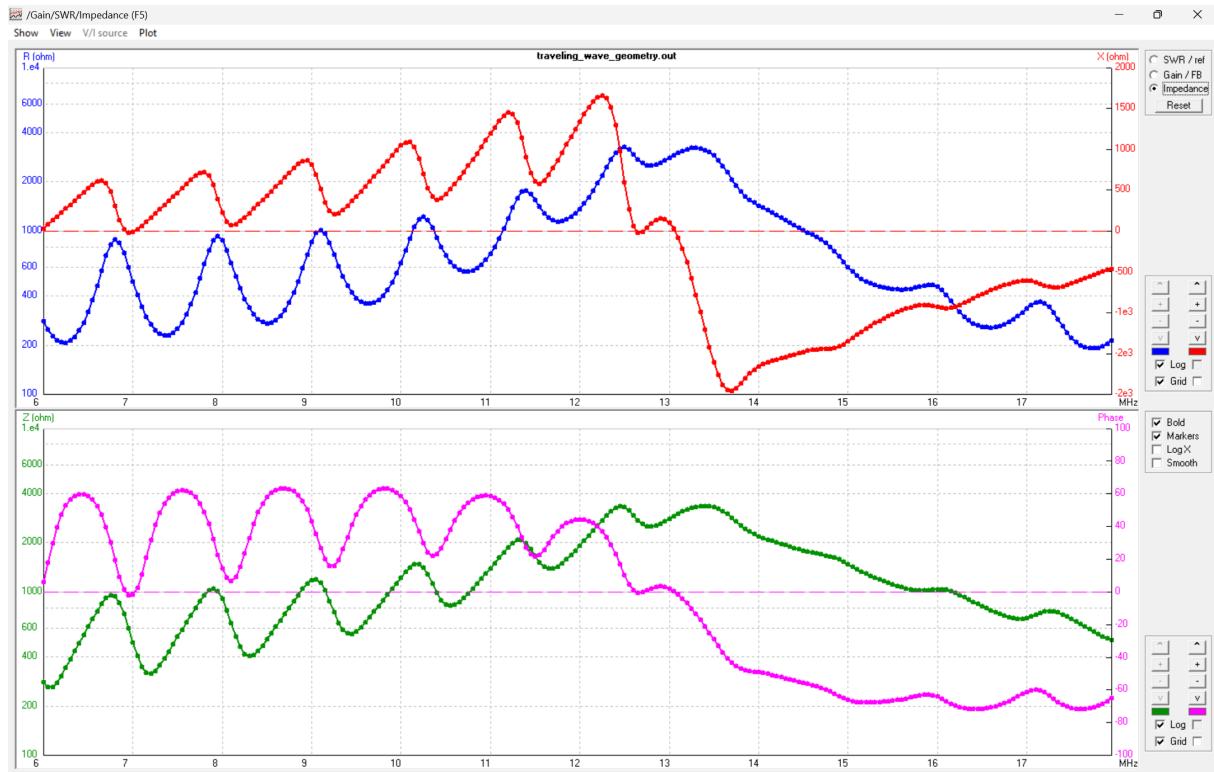


Σχήμα 33: Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR) και Συντελεστής Ανάκλασης (dB) για $Z_0 = 2943 \Omega$ (Περίπτωση 2).

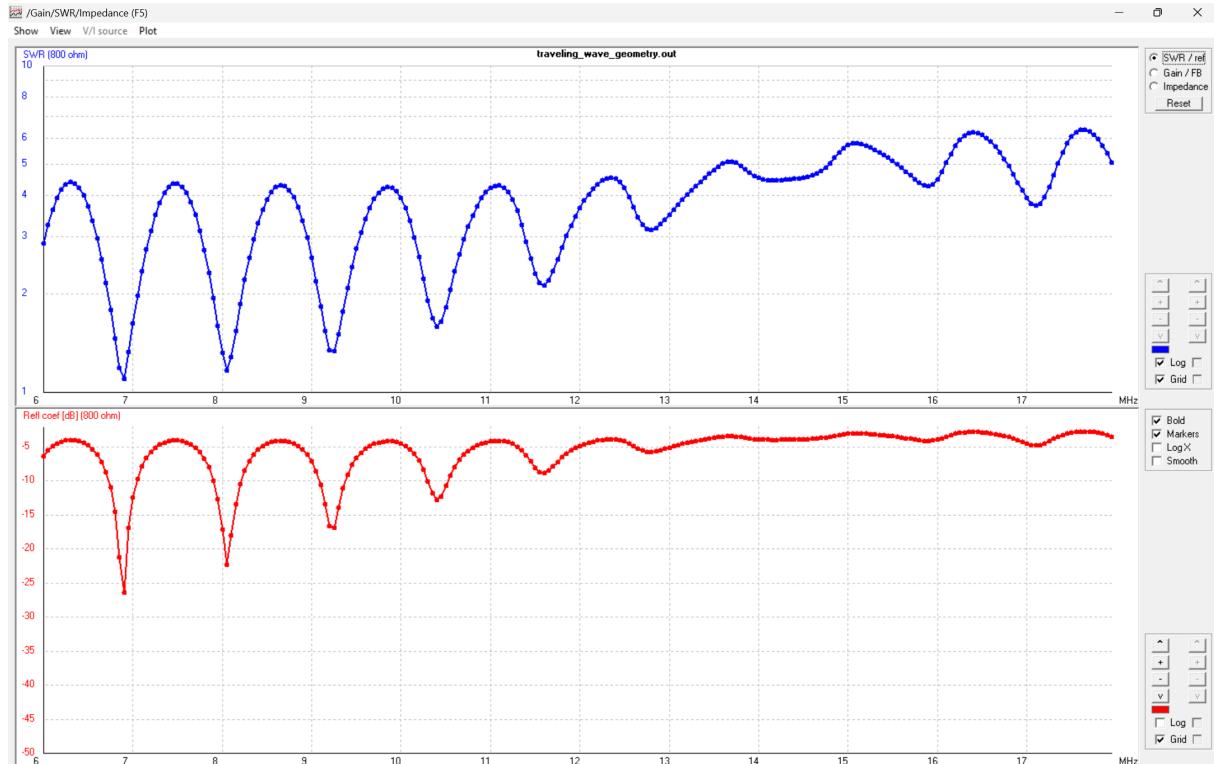
4.4.3 Περίπτωση 3: Βέλτιστη Τιμή Προσαρμογής ($R_L = 800 \Omega$)

Η τιμή των 800Ω επιλέχθηκε ως η χρυσή τομή, αντιπροσωπεύοντας τη μέση τιμή της χαρακτηριστικής εμπέδησης Z_0 του αγωγού πάνω από το τέλειο έδαφος.

- **Φυσική Ερμηνεία:** Στα 800Ω , η αντίσταση τερματισμού πλησιάζει την πραγματική εμπέδηση της γραμμής μεταφοράς που σχηματίζει το σύρμα με το είδωλό του στο Perfect Ground. Η ενέργεια που φτάνει στο άκρο απορροφάται αποτελεσματικά, ελαχιστοποιώντας το ανακλώμενο κύμα.
- **Ανάλυση Αποτελεσμάτων:**
 - Το *SWR* παρουσιάζει τη μέγιστη δυνατή εξομάλυνση (flat response), παραμένοντας σε χαμηλά και διαχειρίσιμα επίπεδα σε όλο το εύρος 6-18 MHz.
 - Ο συντελεστής ανάκλασης παρουσιάζει περιοδικές βυθίσεις κάτω από τα -15 έως -25 dB (π.χ. στα 7 MHz και 9.5 MHz), επιβεβαιώνοντας τη σταθερή ροή ισχύος προς μία κατεύθυνση.
 - Η σταθεροποίηση της ανάκλασης στα -5 dB στις υψηλότερες συχνότητες παραμένει παρούσα και εδώ, αλλά με πολύ πιο ομαλή μετάβαση, αποδεικνύοντας ότι η κεραία λειτουργεί πλέον ως καθαρό οδεύον κύμα (traveling wave).
- **Συμπέρασμα:** Η τιμή αυτή αποτελεί αρκετά καλή λύση για την περίπτωση του Perfect Ground, καθώς εξασφαλίζει τη μέγιστη ευρυζωνικότητα και τη διατήρηση του κατευθυντικού διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας Beverage. Ωστόσο ενδέχεται να μην είναι η βέλτιστη, λόγω των παρατηρήσεων που έγιναν παραπάνω.



Σχήμα 34: Σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_{in} στο εύρος 12 – 18 MHz για την 3η περίπτωση.



Σχήμα 35: Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR) και Συντελεστής Ανάκλασης (dB) για $Z_0 = 800 \Omega$ (Περίπτωση 3).

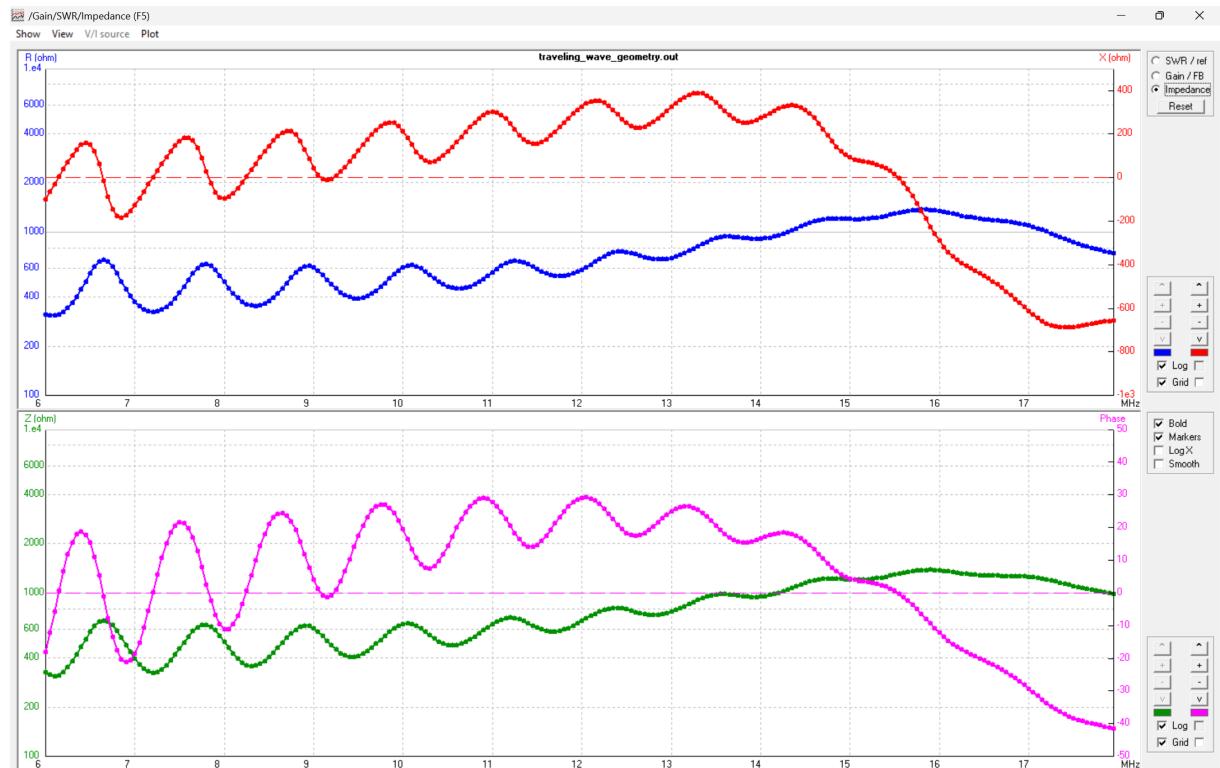
4.5 Ανάλυση υπό συνθήκες Πραγματικού Εδάφους (Fast Ground - Good)

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η επίδραση του πραγματικού εδάφους (Fast Ground - Good, $\epsilon_r = 17, \sigma = 0.015$) στη λειτουργία της κεραίας. Η εισαγωγή απωλειών εδάφους μεταβάλλει τη χαρακτηριστική εμπέδηση της δομής και λειτουργεί ως παράγοντας απόσβεσης (damping), εξομαλύνοντας τις ανακλάσεις.

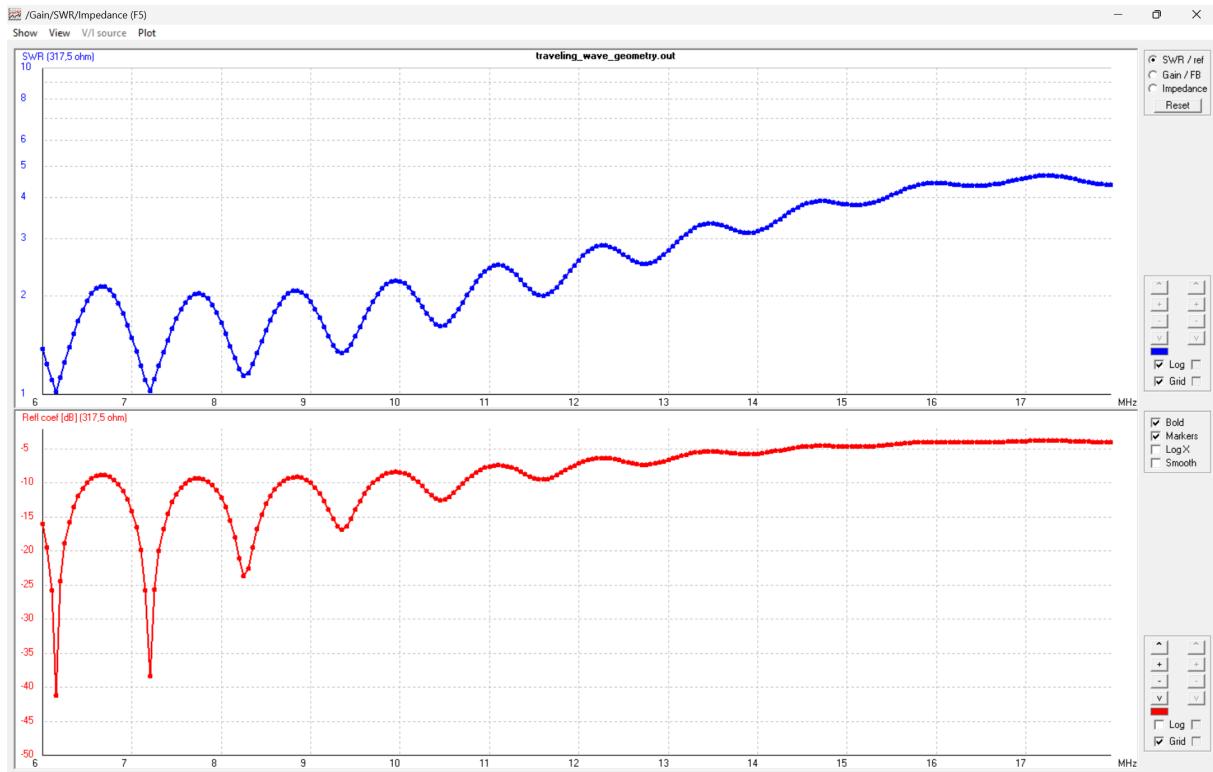
4.5.1 Περίπτωση 1: Θεωρητική Τιμή ($R_L = 317.5 \Omega$)

Η προσομοίωση με την αρχική θεωρητική τιμή υπό συνθήκες πραγματικού εδάφους παρουσιάζει σημαντικά βελτιωμένη εικόνα σε σχέση με το Perfect Ground:

- Παρατήρηση:** Οι απώλειες του εδάφους απορροφούν μέρος της ενέργειας, μειώνοντας το πλάτος των ταλαντώσεων της σύνθετης αντίστασης.
- Αποτελέσματα:** Η αντίσταση R_{in} κυμαίνεται ομαλότερα μεταξύ 400Ω και 1400Ω . Το SWR παραμένει κάτω από 4.5 σε όλο το φάσμα, επιβεβαιώνοντας ότι η θεωρητική τιμή των 317.5Ω είναι μια σχετικά καλή προσέγγιση για πραγματικές συνθήκες.



Σχήμα 36: Σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_{in} στο εύρος $12 - 18$ MHz για την 1η περίπτωση.

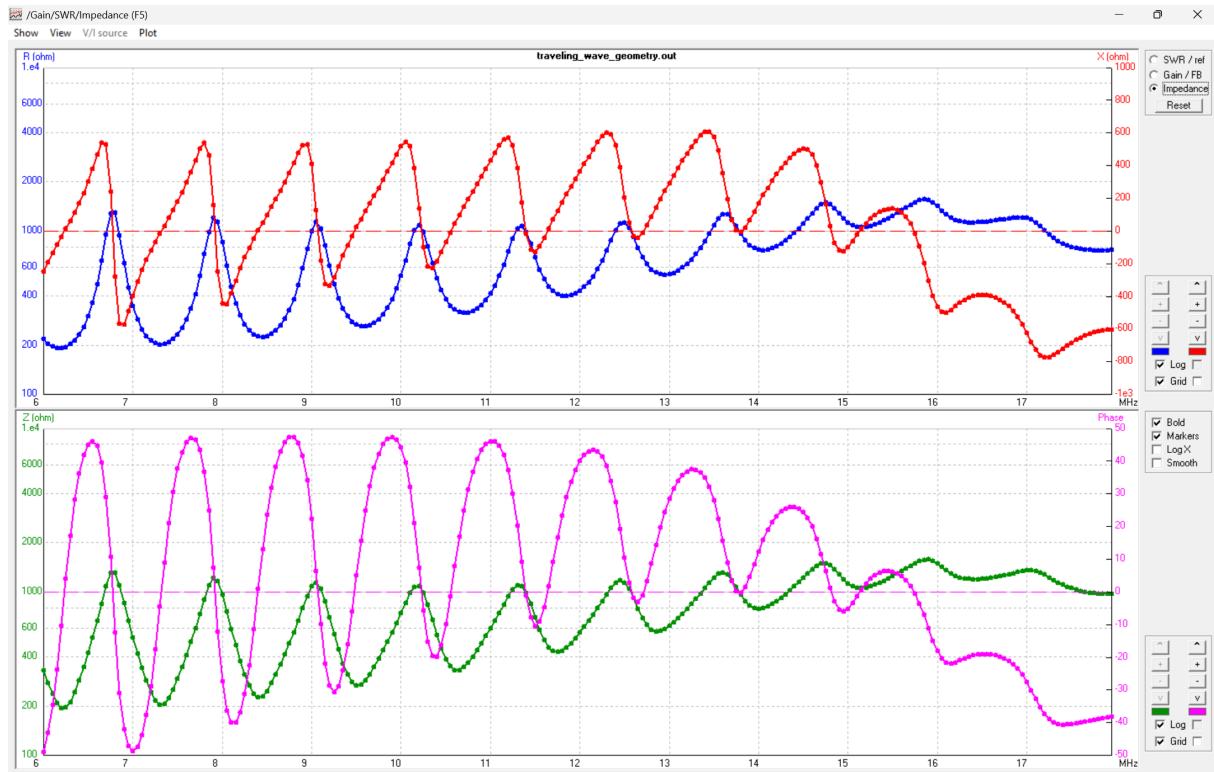


Σχήμα 37: Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR) και Συντελεστής Ανάκλασης (dB) για $Z_0 = 317.5 \Omega$ (Περίπτωση 1).

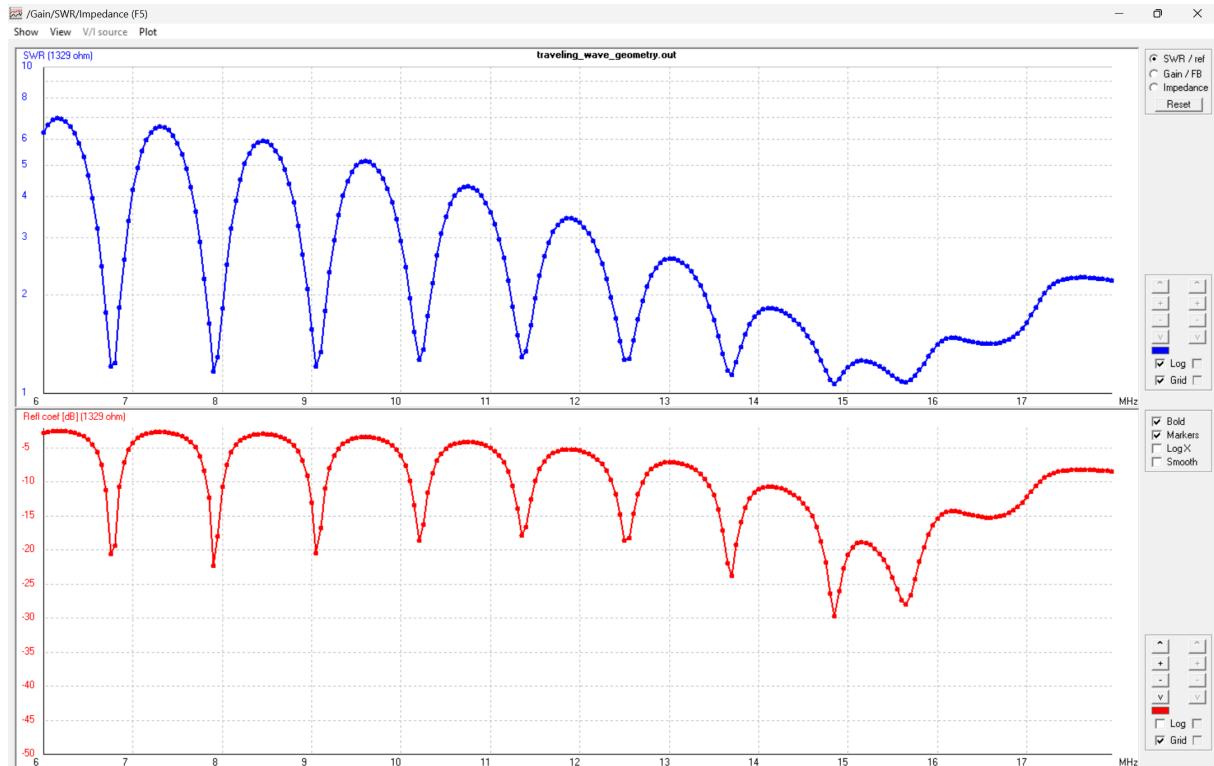
4.5.2 Περίπτωση 2: Τιμή Ακραίου Συντονισμού ($R_L = 1329 \Omega$)

Εξετάστηκε η τιμή $R_L = 1329 \Omega$, η οποία αντιστοιχεί στο σημείο μηδενισμού της άεργης αντίστασης ($X_{in} \approx 0$).

- Αποτελέσματα:** Παρατηρείται εξαιρετικά νευρική συμπεριφορά του SWR, το οποίο παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις μεταξύ 1.2 και 7.
- Συμπέρασμα:** Η επιλογή αυτή αποδεικνύεται ακατάλληλη, καθώς καταστρέψει την ευρυζωνικότητα της Beverage και την αναγκάζει να λειτουργεί ως συντονισμένη κεραία στάσιμου κύματος.



Σχήμα 38: Σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_{in} στο εύρος 12 – 18 MHz για την 2η περίπτωση.

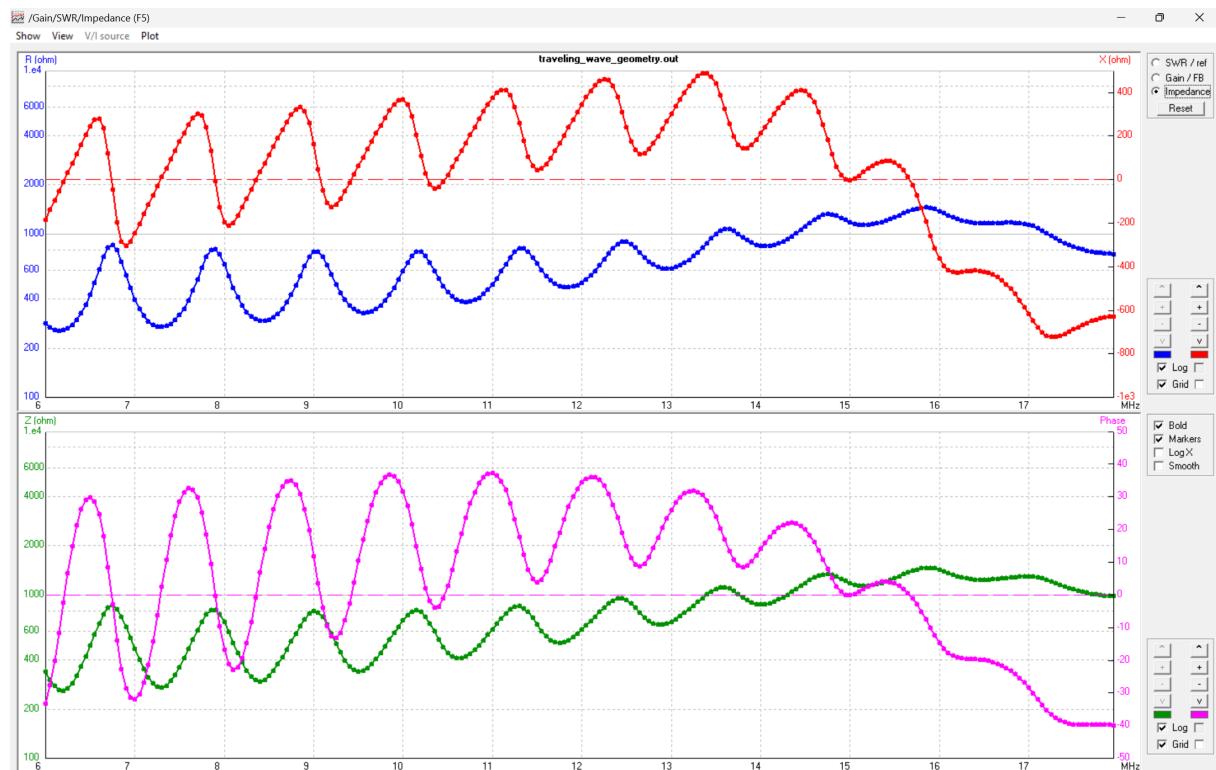


Σχήμα 39: Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR) και Συντελεστής Ανάκλασης (dB) για $Z_0 = 1329 \Omega$ (Περίπτωση 2).

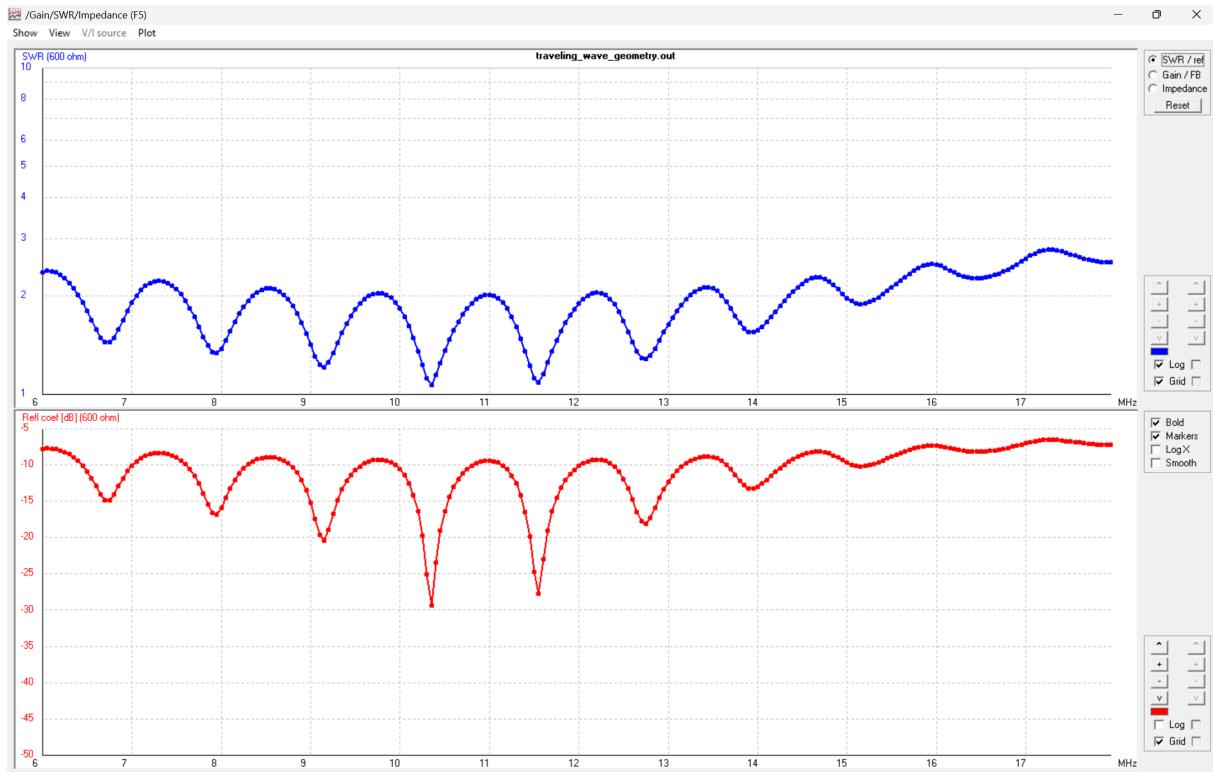
4.5.3 Περίπτωση 3: Βέλτιστη Τιμή Προσαρμογής ($R_L = 600 \Omega$)

Η τιμή των 600Ω επιλέχθηκε ως η μέση τιμή της R_{in} , όπως προέκυψε πειραματικά από την ανάλυση της σύνθετης αντίστασης.

- Παρατήρηση:** Η τιμή αυτή αποτελεί τη χρυσή τομή για το συγκεκριμένο έδαφος, καθώς ταυτίζεται με την πραγματική Z_0 της δομής υπό την επίδραση των απωλειών.
- Αποτελέσματα:** Το SWR παρουσιάζει τη μέγιστη δυνατή εξομάλυνση, παραμένοντας σταθερό και χαμηλό (κάτω από 2.5 έως τους 15 MHz). Ο συντελεστής ανάκλασης πέφτει συστηματικά κάτω από τα -10 dB , φτάνοντας σε κορυφές προσαρμογής της τάξης των -25 dB σε ορισμένες περιπτώσεις.



Σχήμα 40: Σύνθετη αντίσταση εισόδου Z_{in} στο εύρος $12 - 18 \text{ MHz}$ για την 3η περίπτωση.



Σχήμα 41: Λόγος Στασίμων Κυμάτων (SWR) και Συντελεστής Ανάκλασης (dB) για $Z_0 = 600 \Omega$ (Περίπτωση 3).

4.5.4 Συγκριτικά Συμπεράσματα Εδάφους

Η σύγκριση μεταξύ των δύο τύπων εδάφους αναδεικνύει τον κρίσιμο ρόλο των απωλειών:

- Στο Perfect Ground, η έλλειψη απόσβεσης απαιτεί πολύ υψηλή R_L (800Ω) για την ελαχιστοποίηση των ανακλάσεων.
- Στο Good Ground, οι απώλειες εδάφους αποσβένουν το κύμα, μειώνοντας την απαραίτητη R_L στα 600Ω και προσφέροντας μια πολύ πιο σταθερή και επίπεδη απόκριση Γ , η οποία σταθεροποιείται κάτω από τα -10 dB στο μεγαλύτερο εύρος των εξεταζόμενων συχνοτήτων.

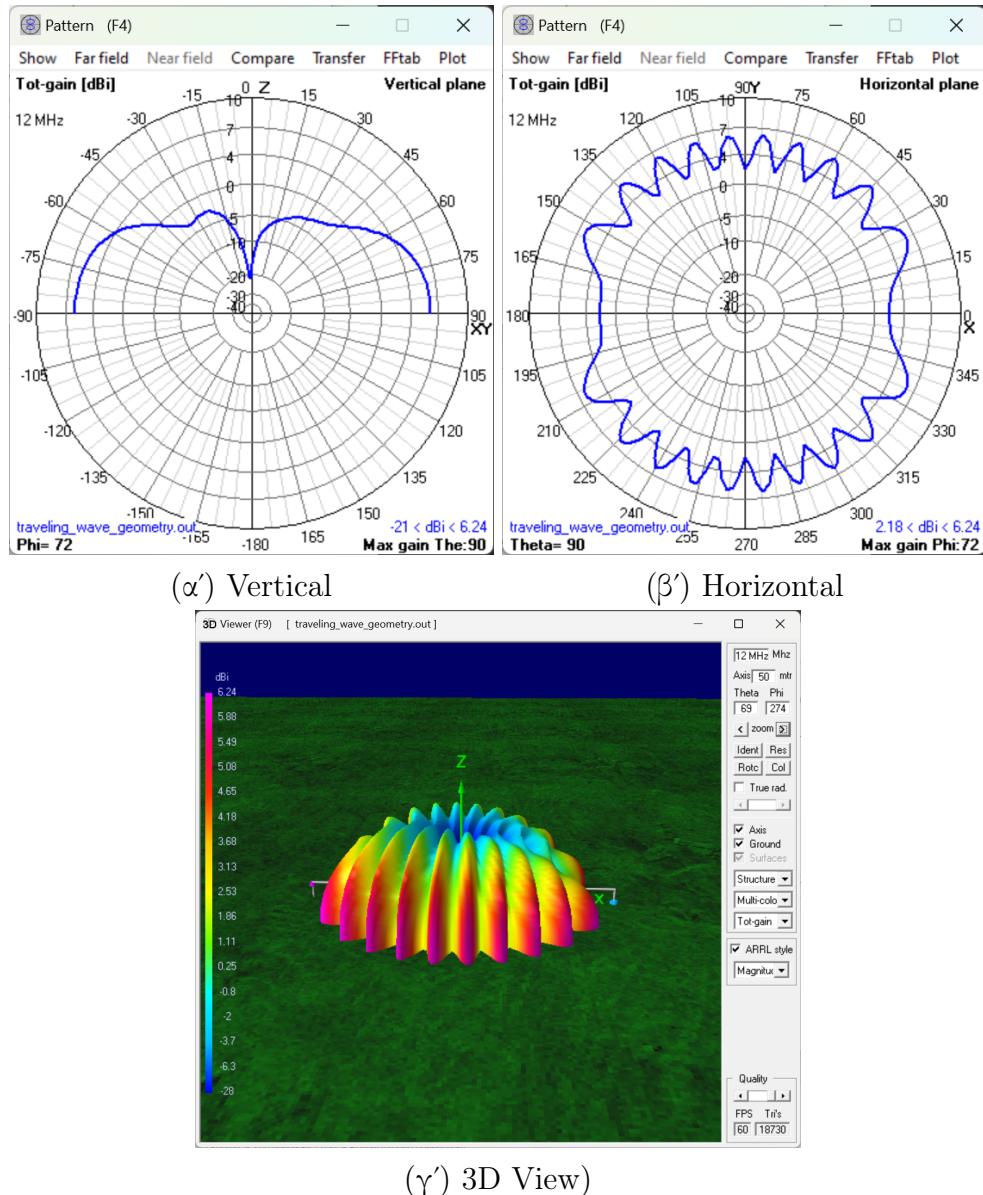
4.6 Ανάλυση Διαγραμμάτων Ακτινοβολίας και Κατευθυντικότητας

Η ολοκλήρωση της μελέτης περιλαμβάνει την εξαγωγή και ανάλυση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας (Radiation Patterns) στις δύο βέλτιστες περιπτώσεις προσαρμογής που προέκυψαν από την προηγούμενη διαδικασία βελτιστοποίησης.

4.6.1 Περίπτωση I: Τέλειο Έδαφος (Perfect Ground, $R_L = 800 \Omega$)

Σε περιβάλλον ιδανικού εδάφους, η κεραία παρουσιάζει τη μέγιστη δυνατή ανάκλαση, γεγονός που επηρεάζει άμεσα τη μορφή των λοβών ακτινοβολίας.

- **Κατακόρυφο Διάγραμμα (Vertical Plane):** Το μέγιστο κέρδος (Max Gain) εντοπίζεται στη γωνία $\theta = 72^\circ$, η οποία αντιστοιχεί σε γωνία ανύψωσης (Elevation) 18° . Η τιμή του μέγιστου κέρδους ανέρχεται στα 6.24 dBi .
- **3D Απεικόνιση:** Η τρισδιάστατη μορφή (3D pattern) αποκαλύπτει μια δομή με πολλαπλούς δευτερεύοντες λοβούς (lobes), η οποία είναι χαρακτηριστική για κεραίες μεγάλου μήκους (5λ) πάνω από τέλειο αγωγό.
- **Οριζόντιο Διάγραμμα (Horizontal Plane):** Σχεδιασμένο στη γωνία $\theta = 90^\circ$, το διάγραμμα δείχνει ισχυρή κατευθυντικότητα στον άξονα του κύριου αγωγού (x -axis), με το μέγιστο κέρδος να εντοπίζεται στη γωνία $\phi = 72^\circ$.



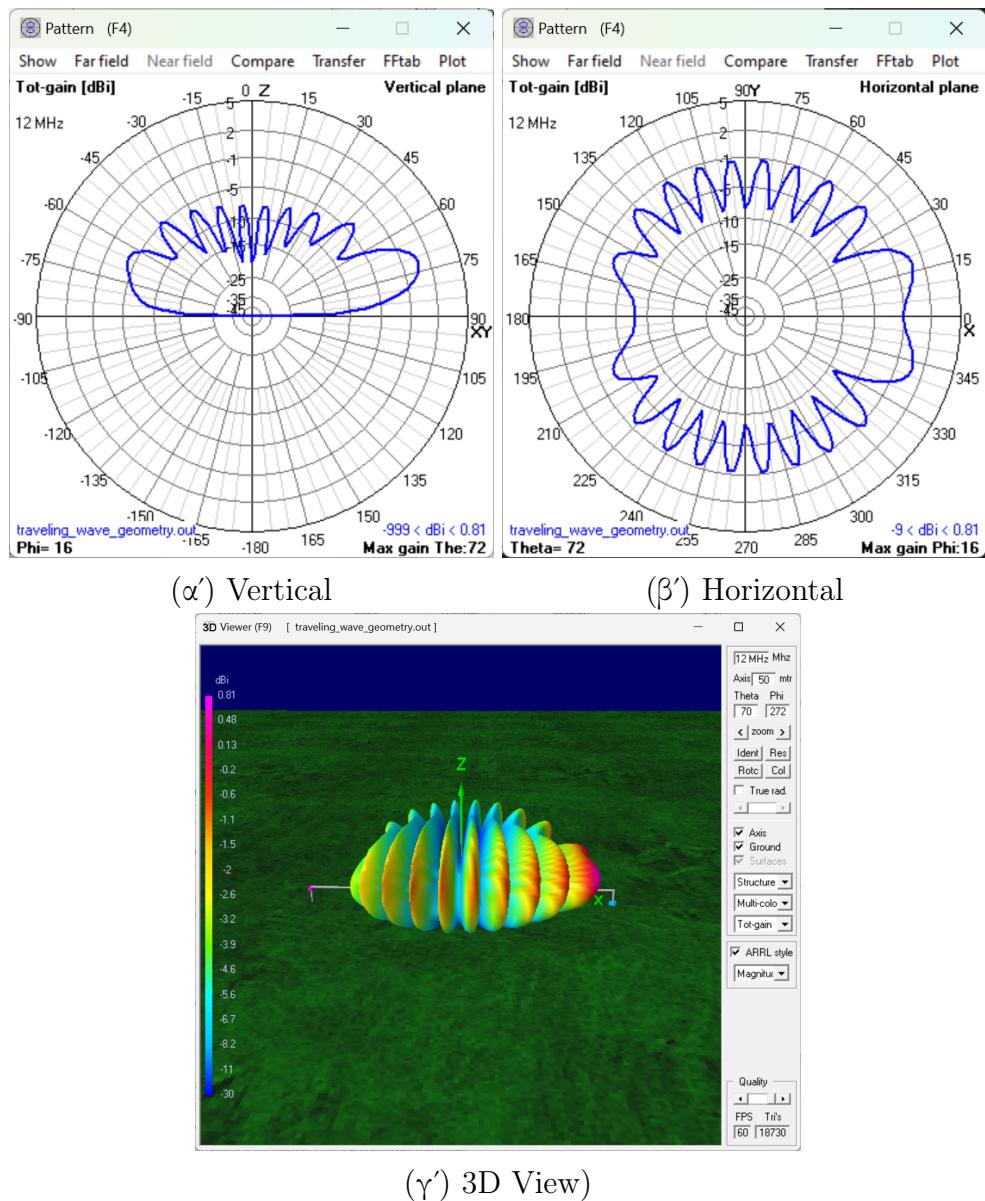
Σχήμα 42: Αποτελέσματα ακτινοβολίας για την Περίπτωση I.

4.6.2 Περίπτωση II: Πραγματικό Έδαφος (Good Ground, $R_L = 600 \Omega$)

Η μετάβαση σε πραγματικό έδαφος (Good Ground) επιφέρει σημαντικές αλλαγές λόγω της απορρόφησης ενέργειας από το χώμα και της μείωσης της ταχύτητας διάδοσης του κύματος.

- Μείωση Κέρδους:** Το μέγιστο κέρδος υποχωρεί σημαντικά στα 0.81 dBi. Αυτή η πτώση είναι αναμενόμενη για κεραίες Beverage πάνω από πραγματικό έδαφος, καθώς ένα μεγάλο μέρος της ισχύος καταναλώνεται ως απώλειες στο έδαφος (ground losses).

- **Γωνία Ανύψωσης:** Παρά τη μείωση του κέρδους, η γωνία μέγιστης ακτινοβολίας παραμένει σταθερή στις $\theta = 72^\circ$. Αυτό υποδηλώνει ότι η γεωμετρία της κεραίας ($h = \lambda/4$) κυριαρχεί στον καθορισμό της γωνίας ανύψωσης.
- **Εξομάλυνση Λοβών:** Στο οριζόντιο διάγραμμα παρατηρείται μια πιο στρωτή κατανομή. Η σωστή προσαρμογή στα 600Ω ελαχιστοποιεί τις ανακλάσεις από το άκρο, ενισχύοντας τον λόγο εμπρός-προς-πίσω (Front-to-Back ratio), καθώς το κύμα απορροφάται αποτελεσματικά στον τερματισμό.



Σχήμα 43: Αποτελέσματα ακτινοβολίας για την Περίπτωση II.

4.6.3 Συμπεράσματα και Τελική Αξιολόγηση

1. **Επίδραση Εδάφους:** Το τέλειο έδαφος προσφέρει υψηλότερο κέρδος αλλά λιγότερο ρεαλιστική απόδοση. Το πραγματικό έδαφος, αν και μειώνει το κέρδος, επιτρέπει στην κεραία να λειτουργήσει ως καθαρό οδεύον κύμα, προσφέροντας την επιθυμητή ευρυζωνικότητα.
2. **Σημασία του R_L :** Η βελτιστοποίηση της αντίστασης τερματισμού (800Ω για Perfect και 600Ω για Good) αποδείχθηκε κρίσιμη. Χωρίς αυτήν, η κεραία θα παρουσίαζε στάσιμα κύματα, αυξάνοντας την ακτινοβολία προς τα πίσω και αλλοιώνοντας την κατευθυντικότητα.
3. **Λειτουργία ως Broadband:** Η σταθερή γωνία μέγιστης ακτινοβολίας ($\theta = 72^\circ$) και η ομαλή απόκριση SWR που παρατηρήθηκε στα προηγούμενα στάδια, καθιστούν τη διάταξη εξαιρετικά αποδοτική για λήψη σημάτων σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων.

Αναφορές

- [1] Τηλικό και Διαλέξεις Μαθήματος Κεραίες και Διάδοση, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ), Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.
- [2] Wikipedia Beverage antenna,
https://en.wikipedia.org/wiki/Beverage_antenna.
- [3] Λογισμικό 4nec2: <http://www.qsl.net/4nec2/>