



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών
—ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837—
Διατμηματικό Πρόγραμμα
Μεταπτυχιακών Σπουδών
Ραδιοηλεκτρολογία και Ηλεκτρονική

Διπλωματική Εργασία

Μελέτη παρασιτικών επιστρεφόντων κυμάτων
(backward waves) σε κοιλότητες γυροτρονίων
υψηλής ισχύος

Κατσάρα Έλενα

A.M. 7110132100105

Τριμελής επιτροπή:

Κ. Αβραμίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής (Κύριος επιβλέπων)

Γ. Λάτσας, Επίκουρος Καθηγητής

Ζ. Ιωαννίδης, Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα 2023

Πρόλογος

Μια πιθανή πηγή ενέργειας που μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές απαιτήσεις του αυξανόμενου πληθυσμού της Γης στο μέλλον βασίζεται στη θερμοπυρηνική σύντηξη μαγνητικά περιορισμένου πλάσματος. Η πυρηνική σύντηξη είναι η συνένωση ελαφριών πυρήνων σε βαρύτερους με ταυτόχρονη απελευθέρωση ενέργειας. Για να επιτευχθεί πυρηνική σύντηξη, πρέπει να ξεπεραστεί ένα ουσιαστικό ενεργειακό φράγμα (φράγμα Coulomb) ηλεκτροστατικών δυνάμεων. Η υπέρβαση του ενεργειακού φράγματος μπορεί να συμβεί με θέρμανση του πλάσματος σε θερμοκρασία πολλών εκατομμυρίων βαθμών Kelvin, που έχει ως αποτέλεσμα τον διαχωρισμό των ηλεκτρονίων από τους πυρήνες τους. Το πλάσμα στους αντιδραστήρες σύντηξης μπορεί να θερμανθεί αποτελεσματικά από μικροκύματα. Η απορρόφηση της ενέργειας των μικροκυμάτων είναι πιο αποτελεσματική όταν η συχνότητα είναι κοντά στην κυκλοτρονική συχνότητα των ηλεκτρονίων στο μαγνητικά περιορισμένο πλάσμα (~100 GHz - 200 GHz).

Μέχρι σήμερα τα γυροτρόνια είναι η μόνη πηγή υψηλής μικροκυματικής ισχύος που μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά και αξιόπιστα σε αυτές τις συχνότητες με ισχύ της τάξης των MW. Η μικροκυματική ισχύς στα γυροτρόνια παράγεται με τη μετατροπή κινητικής ενέργειας μιας δέσμης ηλεκτρονίων σε ηλεκτρομαγνητική. Τα ηλεκτρόνια, αφού επιταχυνθούν από κάποια αξιόλογη διαφορά δυναμικού, εκτελούν κυκλοτρονική περιστροφή γύρω από τις δυναμικές γραμμές ενός εξωτερικά επιβαλλόμενου ισχυρού μόνιμου μαγνητικού πεδίου και διεγείρουν (μέσα σε κάποιο κατάλληλο ηλεκτροδυναμικό σύστημα) ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας παραπλήσιας με την ηλεκτρονική κυκλοτρονική συχνότητα.

Έρευνες σε γυροτρόνια ισχύος της τάξης των MW έδειξε την ύπαρξη παρασιτικών ρυθμών, οι οποίοι μειώνουν την παραγόμενη ισχύ της διάταξης. Οι ρυθμοί αυτοί έχειδειχθεί ότι οδεύουν αντίθετα από την ηλεκτρονική δέσμη και γι' αυτό χαρακτηρίζονται ως επιστρέφοντες ρυθμοί (backward modes). Οι επιστρέφοντες ρυθμοί αλληλεπιδρούν με τη δέσμη, μειώνοντας έως και 10% την παραγόμενη ισχύ. Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό την περαιτέρω μελέτη των ρυθμών και την εξάρτησή τους από φυσικές και αριθμητικές παραμέτρους μέσω προσομοιώσεων. Η μελέτη της εξάρτησης από αριθμητικές παραμέτρους αποσκοπεί στο να δείξει πόσο αξιόπιστο είναι το μοντέλο αλληλεπίδρασης σε ό,τι αφορά τη σωστή προσομοίωση παρασιτικών επιστρεφόντων κυμάτων, τα οποία μέχρι τώρα αγνοούνταν, κατά κανόνα, στις πολυρρυθμικές προσομοιώσεις. Η μελέτη της εξάρτησης από φυσικές παραμέτρους βοηθά στην κατανόηση των αιτιών της διέγερσης των παρασιτικών.

Ο κώδικας αλληλεπίδρασης που χρησιμοποιείται στην εργασία ονομάζεται EURIDICE και είναι ένας κώδικας προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης δέσμης - πεδίου. Στην διπλωματική γίνεται μια εισαγωγή στην αρχή λειτουργίας των γυροτρονίων και στη συνέχεια ακολουθεί μια σειρά προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων καθώς και τα φυσικά συμπεράσματα που έχουν εξαχθεί παρουσιάζονται αναλυτικά.

Abstract

One potential source of energy that may be able to meet the demands of the growing population in the future is thermonuclear fusion of magnetically confined plasma. Nuclear fusion is the fusion of light nuclei into heavier ones with the simultaneous release of energy. To achieve nuclear fusion, a substantial energy barrier (Coulomb barrier) of electrostatic forces must be overcome. Overcoming the energy barrier can occur by heating the plasma to a temperature of about one million degrees Kelvins, which results in the separation of the electrons from their nuclei. The plasma in fusion reactors can be efficiently heated by microwaves. Absorption of microwave energy is most efficient when the frequency is close to the cyclotron frequency of electrons in the magnetically confined plasma (~100 GHz – 200 GHz).

To date, gyrotrons are the only source of high, MW-level microwave power that can operate efficiently and reliably at this range of frequencies. Microwave power in gyrotrons is generated by converting the kinetic energy of an electron beam into electromagnetic energy. The electrons, after being accelerated by some appreciable potential difference, perform cyclotron rotation around the field lines of an externally imposed strong magnetostatic field and excite (within some suitable electrodynamic system) an electromagnetic wave of frequency close to the electron cyclotron frequency.

Research on MW-class gyrotrons has shown the existence of parasitic modes, which reduce the generated power of the device. These modes have been shown to travel opposite to the electron beam and are therefore characterized as backward waves. These backward waves interact with the beam, reducing the output power by up to 10%. This thesis aims to further study the backward waves and their dependence on physical and numerical parameters through simulations. The study of the numerical parameters' dependence is intended to show how reliable the interaction model is in correctly simulating parasitic backward waves, which until now have typically been ignored in multi-mode simulations. The study on the dependence on physical parameters helps to understand the causes of parasitic excitation.

The software used in this work is called EURIDICE and is an “in-house” beam-field interaction simulation code. In this thesis there is an introduction to the principle of operation of gyrotrons and then follows a series of simulations that were done. The results of the simulations, as well as the physical conclusions, are presented in detail. To strengthen the reliability of the results, further simulations are carried out that more closely approximate the physical problem and evaluate the validity of the code. Finally, the causes of stimulation of backward waves are studied with the ultimate aim of suppressing them.

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Δ.Π.Μ.Σ “ΜΔΕ στη Ραδιοηλεκτρολογία και στην Ηλεκτρονική” των Τμημάτων Φυσικής και Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών του ΕΚΠΑ.

Η ολοκλήρωσή της θα ήταν αδύνατη χωρίς τη συνεχή υποστήριξη και την πολύτιμη καθοδήγηση από τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής κ. Κωνσταντίνο Α. Αβραμίδα, τον οποίο ευχαριστώ θερμά.

Ευχαριστώ επίσης και τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής κ. Γεώργιο Λάτσα και τον Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Αεροδιαστημικής Επιστήμης και Τεχνολογίας του ΕΚΠΑ κ. Ζήση Ιωαννίδη για τις ουσιαστικές παρατηρήσεις τους και τη βοήθειά τους.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής κ. Ιωάννη Τίγκελη για τη συμβολή του στην ακαδημαϊκή μου πορεία.

Τέλος, ευχαριστώ τους διδάκτορες κ.κ. Ιωάννη Χέλη και Δημήτριο Πεπόνη, τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Αθανάσιο Ζέλκα, καθώς και τον Φυσικό Εμμανουήλ Δεληπρίμη για τις εύστοχες επισημάνσεις τους.

Αθήνα, Μάρτιος 2023

Έλενα Κατσάρα

Περιεχόμενα

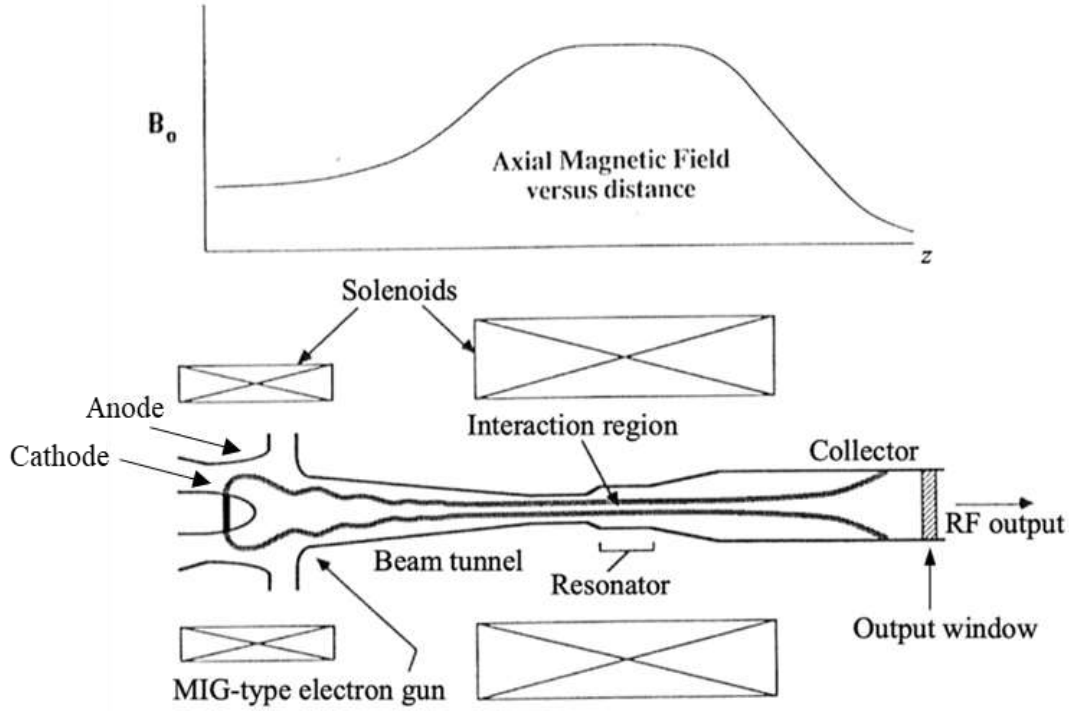
1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Τα γυροτρόνια.....	1
1.2	Αντικείμενο της εργασίας.....	7
2	Προσομοίωση αλληλεπίδρασης δέσμης – πεδίου με δύο ρυθμούς.....	9
2.1	Γυροτρόνιο 1.5 MW - 140 GHz	9
2.2	Γυροτρόνιο 1.0 MW-140 GHz	12
3	Αλλαγή αριθμητικών παραμέτρων στις προσομοιώσεις δύο ρυθμών.....	15
4	Πολυρρυθμικές προσομοιώσεις και μεταβολή αριθμητικών παραμέτρων	19
4.1	Πολυρρυθμικές προσομοιώσεις στο γυροτρόνιο 1.5 MW-140 GHz	20
4.2	Πολυρρυθμικές προσομοιώσεις με αλλαγή αριθμητικών παραμέτρων στο γυροτρόνιο 1.5 MW - 140 GHz.....	23
4.3	Πολυρρυθμικές προσομοιώσεις στο γυροτρόνιο 1 MW - 140 GHz	25
4.4	Πολυρρυθμικές προσομοιώσεις με αλλαγή αριθμητικών παραμέτρων στο γυροτρόνιο 1 MW - 140 GHz.....	26
4.5	Συμπεράσματα	28
5	Πολυρρυθμικές προσομοιώσεις και μεταβολή φυσικών παραμέτρων.....	30
5.1	Μεταβολή φυσικών παραμέτρων στο γυροτρόνιο 1.5 MW - 140 GHz	30
5.2	Μεταβολή φυσικών παραμέτρων στο γυροτρόνιο 1 MW - 140 GHz.....	32
5.3	Συμπεράσματα	35
6	Παράγοντας σύζευξης και συνθήκη συντονισμού επιστρεφόντων κυμάτων	36
6.1	Συνθήκη συντονισμού.....	36
6.2	Συντελεστής σύζευξης.....	42
6.3	Συμπεράσματα	44
7	Σύνοψη.....	45
	Βιβλιογραφία	47

1 Εισαγωγή

1.1 Τα γυροτρόνια

Τα γυροτρόνια ως πηγές υψηλής μικροκυματικής ισχύος διαδραματίζουν σπουδαίο ρόλο στην έρευνα γύρω από την παραγωγή ενέργειας μέσω ελεγχόμενης πυρηνικής σύντηξης. Οι υψηλής ισχύος δέσμες που παράγονται από αυτά έχουν αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματικές στη θέρμανση πλάσματος μέσω ηλεκτρονικού κυκλοτρονικού συντονισμού (Electron Cyclotron Resonance Heating, ECRH), καθώς και στον έλεγχο ασταθειών του πλάσματος. Για αυτές τις εφαρμογές έχουν σχεδιαστεί και χρησιμοποιηθεί με επιτυχία γυροτρόνια ικανά για παραγωγή ισχύος της τάξης των MW σε συχνότητες 100 GHz - 200 GHz. Τα γυροτρόνια μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης για την επεξεργασία υλικών, τη φασματοσκοπία και σε χιλιοστομετρικά ραντάρ [1].

Μια τυπική σχηματική διάρθρωση της δομής ενός γυροτρονίου φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Η κάθοδος της διάταξης είναι κάποιο μέταλλο το οποίο θερμαίνεται. Η θέρμανση δίνει ενέργεια στα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας και εφαρμόζοντας κατάλληλη διαφορά δυναμικού, είναι δυνατόν να προκληθεί επιτάχυνση αυτών προς την άνοδο. Με τη χρήση ενός μόνιμου μαγνητικού πεδίου, τα ηλεκτρόνια οδηγούνται να κινηθούν κατά μήκος του άξονα της διάταξης μέσα στον διάυλο δέσμης (beam tunnel). Κατά μήκος του διαύλου δέσμης το μαγνητικό πεδίο αυξάνεται, ελαττώνοντας την ακτίνα της δέσμης των ηλεκτρονίων και μεγιστοποιείται στην περιοχή αλληλεπίδρασης. Η περιοχή αλληλεπίδρασης (interaction region) είναι η αποκαλούμενη κοιλότητα (cavity) και είναι ένας κυλινδρικός κυματοδηγός μεταβλητής ακτίνας $R_o(z)$. Η ακτίνα είναι μειωμένη προς τη μεριά του διαύλου δέσμης, ώστε το υψίσυχο ηλεκτρομαγνητικό κύμα, που βρίσκεται εκεί, να έρχεται σε αποκοπή και να μην οδεύει προς την κάθοδο. Στο μέσο αυτής της κοιλότητας η ακτίνα είναι σταθερή ώστε να υποστηρίζονται στάσιμα κύματα. Στην πλευρά του συλλέκτη η ακτίνα αυξάνεται, ώστε το κύμα να γίνεται οδεύον προς την έξοδο και τελικά να εξέρχεται από τη διάταξη. Όταν τα ηλεκτρόνια εισέρχονται στην κοιλότητα αλληλεπιδρούν με το υψίσυχο κύμα, αποδίδοντάς του μέρος της κινητικής τους ενέργειας. Μετά την αλληλεπίδραση τα ηλεκτρόνια με μειωμένη κινητική ενέργεια καταλήγουν στον συλλέκτη, ενώ ταυτόχρονα το μαγνητικό πεδίο έχει μειωθεί, προκαλώντας το άνοιγμα της ακτίνας της δέσμης.



Σχήμα 1.1 (σχήμα 1.4 του [2]): Στο επάνω σχήμα φαίνεται η αξονική μεταβολή του μόνιμου αξονικού μαγνητικού πεδίου και στο κάτω σχήμα σχηματική δομή του συμβατικού γυροτρονίου.

Τα ηλεκτρόνια εκπέμπονται από την κάθοδο μέσω θερμιονικής εκπομπής και επιταχύνονται προς την άνοδο λόγω της διαφοράς δυναμικού (η κάθοδος έχει χαμηλότερο δυναμικό από την άνοδο). Η μεταβολή της κινητικής ενέργειας των σωματιδίων κατά την κίνησή τους από την κάθοδο προς την άνοδο είναι ίση με

$$E_{κιν2} = E_{κιν1} + eV_{12} \quad (1.1)$$

όπου V_{12} είναι η διαφορά δυναμικού ανόδου-καθόδου, $e > 0$ είναι το στοιχειώδες φορτίο του σωματιδίου (το φορτίο του ηλεκτρονίου είναι $q_e = -e$), ενώ η κινητική ενέργεια για ήπια σχετικιστική προσέγγιση, δίνεται από τη σχέση

$$E_{κιν} = (\gamma - 1)m_e c^2 \quad (1.2)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (1.1) και (1.2) και θεωρώντας ότι τα ηλεκτρόνια ξεκινούν από την ακινησία ($E_{κιν1} = 0$), ο σχετικιστικός παράγοντας είναι

$$\gamma_2 = 1 + \frac{V_{12}}{m_e c^2} \quad (1.3)$$

όπου m_e είναι η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου και $c = (\epsilon_0 \mu_0)^{-1/2}$ η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Το μόνιμο μαγνητικό πεδίο που εφαρμόζεται στα γυροτρόνια είναι αξονικό ($\mathbf{B}_0 = B_0 \hat{z}, B_0 > 0$) και επιβάλλει στα ηλεκτρόνια να εισέλθουν στο διάυλο δέσμης και να κινηθούν κατά μήκος του άξονα του γυροτρονίου, εκτελώντας κυκλοτρονική περιστροφή. Η απουσία ηλεκτρικού πεδίου, διατηρεί την κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων κατά την κίνησή τους. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ ανόδου-καθόδου στο

γυροτρόνιο είναι συγκεκριμένη ($V_{12} = V_0$) και ο σχετικιστικός παράγοντας γίνεται σταθερά της κίνησης

$$\gamma_2 = \gamma_0 = 1 + \frac{V_0}{511 \text{ kV}} \quad (1.4)$$

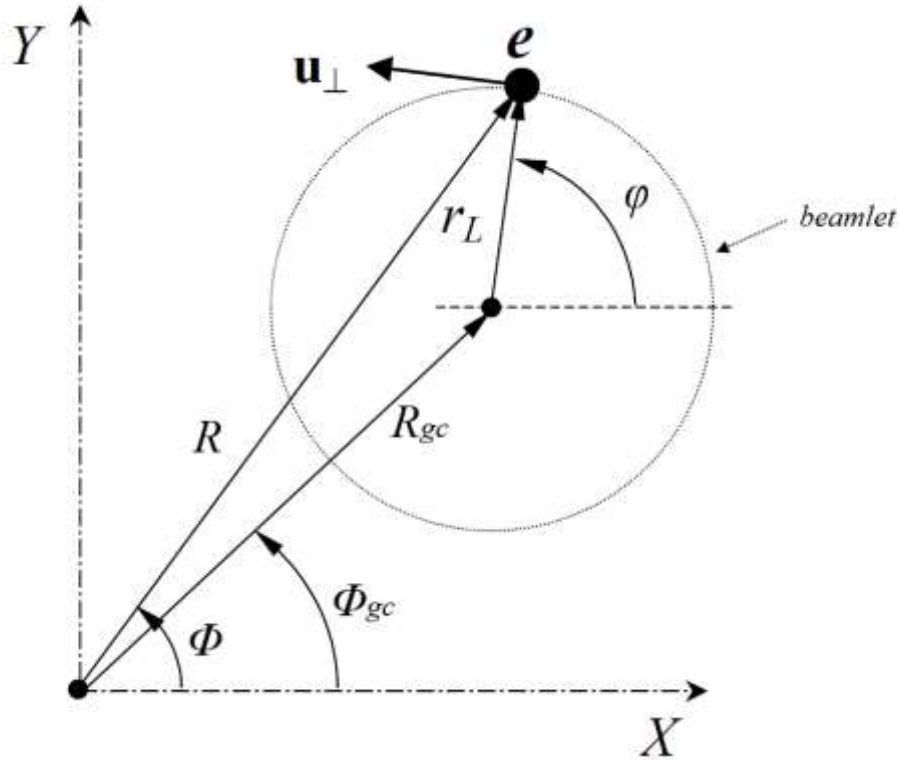
Κάθε ηλεκτρόνιο της δέσμης εκτελεί δύο ταυτόχρονες κινήσεις και χαρακτηρίζεται από ταχύτητα $\mathbf{v} = \mathbf{v}_\perp + \mathbf{v}_\parallel$, όπου \mathbf{v}_\parallel είναι η ταχύτητα κατά μήκος του z και περιγράφει την κίνηση κατά μήκος της διάταξης, ενώ \mathbf{v}_\perp η ταχύτητα στο εγκάρσιο επίπεδο $X - Y$ και περιγράφει την κυκλική κίνηση του ηλεκτρονίου με κυκλική συχνότητα [2]

$$\omega_{cycl} = \frac{eB_0(z)}{\gamma_0 m_e} \quad (1.5)$$

Το μαγνητικό πεδίο όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1 μεταβάλλεται κατά μήκος της διάταξης και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του στο μέσο της κοιλότητας αλληλεπίδρασης. Επομένως, η κυκλοτρονική συχνότητα κάθε ηλεκτρονίου έχει ανάλογη συμπεριφορά. Επίσης είναι αντιστρόφως ανάλογη του σχετικιστικού παράγοντα γ_0 .

Για να περιγραφεί η κίνηση ενός ηλεκτρονίου χρειάζονται έξι μεταβλητές (τρεις συνιστώσες ταχύτητας και τρεις χωρικές συνιστώσες). Σαν εναλλακτικές των έξι μεταβλητών περιγραφής της κίνησης ενός ηλεκτρονίου έχουν ορισθεί πέντε μεταβλητές που σκιαγραφούν την κίνησή τους και χρησιμοποιούνται σε αυτή την εργασία. Ο λόγος των ταχυτήτων $\alpha = v_\perp / v_\parallel$ είναι μια μεταβλητή που εκφράζει πόσο μεγαλύτερη είναι η εγκάρσια ταχύτητα των ηλεκτρονίων σχετικά με την αξονική. Η μεταφορά ενέργειας από τα ηλεκτρόνια στο πεδίο, που συζητήθηκε σε προηγούμενη παράγραφο γίνεται στο εγκάρσιο επίπεδο. Ιδανικά περιμένει κανείς ότι όσο μεγαλύτερο είναι το α , τόσο μεγαλύτερη ενέργεια μεταφέρεται στο πεδίο και επομένως λαμβάνεται μεγαλύτερη ισχύς στην έξοδο. Η επιδίωξη αυτού, θα δούμε ότι δεν είναι πάντοτε εφικτή στην πραγματικότητα.

Κάθε ηλεκτρόνιο στην ηλεκτρονική δέσμη κινείται σε μια απόσταση από τον άξονα συμμετρίας της δέσμης, αλλά εκτελεί και μια κυκλοτρονική κίνηση γύρω από ένα κέντρο (Σχήμα 1.2). Όσα ηλεκτρόνια κινούνται γύρω από το ίδιο τέτοιο κέντρο, ανήκουν στο ίδιο δεσμίδιο (beamlet). Για να περιγράψουμε αυτές τις δύο ταυτόχρονες θέσεις του ηλεκτρονίου, ορίζουμε την ακτίνα δέσμης R_{gc} , που περιγράφει την απόσταση του κέντρου κυκλοτρονικής περιστροφής του ηλεκτρονίου (κέντρο του beamlet) από τον άξονα συμμετρίας της ηλεκτρονικής δέσμης, τη γωνία Φ_{gc} του κέντρου περιστροφής στο αζιμούθιο και τη φάση της εγκάρσιας ταχύτητας του ηλεκτρονίου, που περιγράφει τη θέση του ως προς το κέντρο του beamlet, αντίστοιχα. Έτσι, μπορούμε να περιγράψουμε πλήρως την κίνηση ενός ηλεκτρονίου.



Σχήμα 1.2 (σχήμα 3.1 του [2]): Κυκλοτρονική περιστροφή κάθε ηλεκτρονίου στο εγκάρσιο επίπεδο.

Συζητήθηκε λοιπόν, ότι στην κοιλότητα του γυροτρονίου, η δέσμη ηλεκτρονίων αλληλεπιδρά με τον ρυθμό λειτουργίας. Εκτός από τον ρυθμό λειτουργίας στην κοιλότητα υπάρχει ένα πλήθος TE και TM πεδίων (καθίσταται δυνατόν να μελετηθούν ξεχωριστά λόγω της αξονικής συμμετρίας και της ηπιότητας της διαμήκους ανομοιογένειας της ακτίνας της κοιλότητας). Η αλληλεπίδραση δέσμης - πεδίου γίνεται στο εγκάρσιο επίπεδο, γεγονός που έχει αποδειχθεί ότι την κάνει αποδοτική μόνο στους TE ρυθμούς. Οι TM ρυθμοί, κατά κανόνα, δεν διεγείρονται από την ηλεκτρονική δέσμη. Έτσι, είναι δεδομένο ότι η απόδοση ορμής από τα ηλεκτρόνια στο πεδίο αφορά TE ρυθμούς και μόνο.

Το διεγερόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο \mathbf{E}_{RF} και \mathbf{H}_{RF} , με την ύπαρξη της ηλεκτρονικής δέσμης μέσα στην κοιλότητα, μπορεί να γραφεί σαν μια υπέρθεση κατάλληλα τροποποιημένων ρυθμών [1]

$$\mathbf{E}_{RF}(\mathbf{R}, z, t) = \text{Re}\{\sum_n A_n(z, t) \mathbf{e}_n(\mathbf{R}; z) e^{i s_n \omega_n t}\} \quad (1.6)$$

$$\mathbf{H}_{RF}(\mathbf{R}, z, t) = \text{Re}\left\{ i \frac{\nabla \times \mathbf{E}_{RF}(\mathbf{R}, z, t)}{\omega \mu_0} \right\} \quad (1.7)$$

Στην αναπαράσταση (1.6) - (1.7) οι προσθετέοι είναι ρυθμοί TE_n ($n \equiv \{m, p\}$), με ιδιοδιάνυσμα \mathbf{e}_n , το οποίο περιέχει τη συνάρτηση Bessel και είναι μια ήπια συνάρτηση του z λόγω της αξονικής ανομοιογένειας της κοιλότητας του γυροτρονίου. Το ω_n είναι η συχνότητα του εκάστοτε ρυθμού και είναι πραγματικός αριθμός. Ο δείκτης $s_n \equiv s_{mp} = 1, 2, 3, \dots$ είναι ο αρμονικός δείκτης του ρυθμού TE_n. Είναι $s_n = 1$ όταν η συχνότητα του ρυθμού TE_n είναι κοντά στην κυκλοτρονική συχνότητα (αλληλεπίδραση θεμελιώδους

κυκλοτρονικής), $s_n = 2$ όταν η συχνότητα του ρυθμού TE_n είναι κοντά στο διπλάσιο της κυκλοτρονικής συχνότητας (αλληλεπίδραση δεύτερης αρμονικής) κ. ο. κ. Η μιγαδική συνάρτηση $A_n(z,t)$ περιγράφει το αξονικό προφίλ και τη χρονική εξάρτηση του πλάτους του ρυθμού. Η τροποποίηση, λόγω παρουσίας της δέσμης, εκφράζεται με την $A_n(z,t)$ που αφορά την τροποποίηση της συχνότητας ω_n , αλλά με την προσέγγιση ότι το A εξελίσσεται αργά με τον χρόνο (slow-time-scale approximation) [1]

$$|\partial A / \partial t| \ll \omega_n |A| \quad (1.8)$$

Στην περίπτωση αυτή, η συχνότητα του ρυθμού παραμένει πρακτικά σταθερή κατά τη λειτουργία του γυροτρονίου. Προκειμένου ένας ρυθμός με συχνότητα ω_n να αλληλεπιδράσει με την ηλεκτρονική δέσμη, θα πρέπει να συντονιστεί με τη κυκλοτρονική συχνότητα των ηλεκτρονίων της δέσμης, σύμφωνα με τη συνθήκη συντονισμού [2]

$$\omega_n - k_{\parallel} v_{\parallel} \cong s \omega_{cycl}, s = 1, 2, 3, .. \quad (1.9)$$

όπου ο ακέραιος αριθμός s εκφράζει την αρμονική της αλληλεπίδρασης. Η κοιλότητα του γυροτρονίου σχεδιάζεται ώστε να διευκολύνεται η διέγερση κύματος κοντά στην αποκοπή ($k_{\parallel} c \ll \omega$). Η λειτουργία με κύμα κοντά στην αποκοπή κάνει τη μετατόπιση Doppler $k_{\parallel} v_{\parallel}(z)$ αμελητέα. Επομένως η συνθήκη συντονισμού για τα γυροτρόνια μετατρέπεται στην [2]

$$\omega_n \cong s \omega_{cycl}, s = 1, 2, 3, ... \quad (1.10)$$

Η χρήση ηλεκτρονικής δέσμης υψηλής ενέργειας πλεονεκτεί αφού συνεπάγεται μεγάλη κινητική ενέργεια προς μετατροπή σε ηλεκτρομαγνητική. Όμως από τις (1.5) και (1.10) παρατηρείται ότι η χρήση έστω και μέτρια σχετικιστικής δέσμης οδηγεί σε μείωση της συχνότητας λειτουργίας για δεδομένο μαγνητικό πεδίο.

Η κοιλότητα του γυροτρονίου είναι κυματοδηγός, επομένως εμφανίζει διασπορά. Εάν η συχνότητα του ρυθμού ω_n , ξεπεράσει τη συχνότητα αποκοπής ω_{cut} , τότε και μόνο τότε, ο ρυθμός μπορεί να οδεύσει με κυματοαριθμό k_{\parallel} . Ο αξονικός κυματοαριθμός του ρυθμού k_{\parallel} συνδέεται με τη συχνότητα αποκοπής του ρυθμού, σύμφωνα με τη σχέση

$$k_{\parallel}(z) = \pm \frac{\sqrt{\omega_n^2 - \omega_{cut}^2(z)}}{c} \quad (1.11)$$

Το (+) περιγράφει ένα οδεύον κύμα προς τα θετικά του άξονα z , ενώ το (-) ένα οδεύον κύμα προς τα αρνητικά του άξονα z . Θεωρούμε ότι η θετική όδευση είναι προς την έξοδο του γυροτρονίου, ενώ η αρνητική όδευση είναι προς την αντίθετη πλευρά. Η συχνότητα ω_n , δεν μεταβάλλεται κατά μήκος της κοιλότητας στην προσέγγιση αργής κλίμακας. Η συχνότητα αποκοπής ω_{cut} εξαρτάται από τη γεωμετρία του κυματοδηγού και συγκεκριμένα, από την ακτίνα της κοιλότητας $R_o(z)$, η οποία έχει ήπια αξονική μεταβολή, σύμφωνα με τη σχέση [2]

$$\omega_{cut} = c \frac{\chi_n}{R_o} \quad (1.12)$$

Η ιδιοτιμή $\chi_n \equiv \chi_{mp}$ του ρυθμού TE_n ορίζεται ως η p -οστή ρίζα της εξίσωσης $J'_m(\chi) = 0$ και είναι ανεξάρτητη της γεωμετρίας.

Είναι κατανοητό ότι η συνθήκη συντονισμού αφορά κάθε ηλεκτρόνιο στη δέσμη. Έτσι, για να υπάρχει αποδοτική αλληλεπίδραση του ρυθμού λειτουργίας με αυτή, θα πρέπει όλα τα ηλεκτρόνια να έχουν παρόμοια ενέργεια. Η αναπαράσταση (1.6) - (1.7) κάνει αντιληπτή την ύπαρξη και άλλων ρυθμών μέσα στην κοιλότητα. Κάποιοι από αυτούς τους ρυθμούς διεγείρονται, για πιθανούς λόγους που θα συζητηθούν σε επόμενα κεφάλαια και αλληλεπιδρούν με την ηλεκτρονική δέσμη. Η αλληλεπίδραση αυτή προκαλεί διασπορά στην ενέργεια και στην ταχύτητα της δέσμης, αφού μεταφέρει μέρος της ορμής της σε κάποιο ρυθμό, και τελικά η δέσμη δεν αλληλεπιδρά τόσο αποτελεσματικά με τον ρυθμό λειτουργίας του γυροτρονίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τη μείωση της παραγόμενης ισχύος.

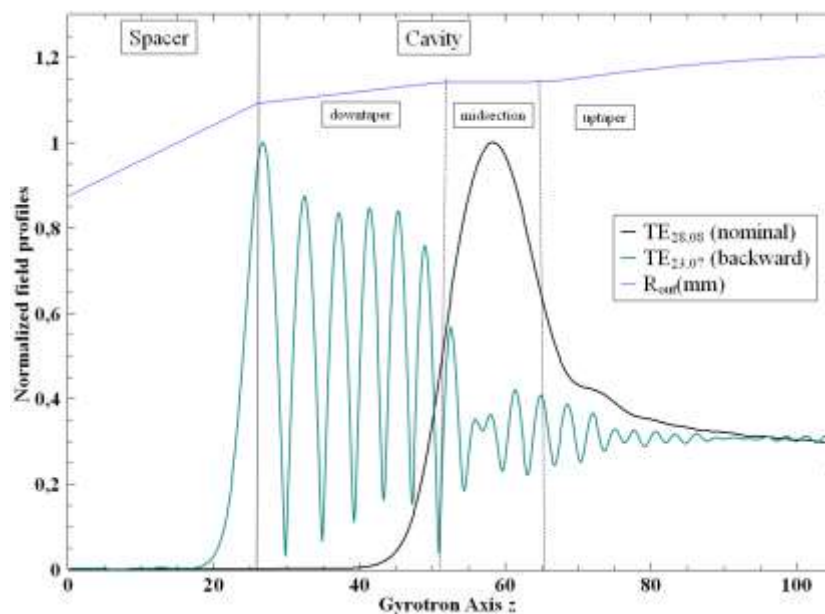
Οι παρασιτικοί αυτοί ρυθμοί, όπως είναι κατανοητό, αποτελούν βασικό μέρος μελέτης για την κατανόηση της λειτουργίας, τη βελτιστοποίηση αυτής, αλλά και για τη σχεδίαση ενός γυροτρονίου. Πειραματικά, στα γυροτρόνια υψηλής ισχύος, έχουν ανιχνευθεί παρασιτικοί ρυθμοί με συχνότητες $\sim 5\% - 15\%$ μικρότερες από τη συχνότητα λειτουργίας [3]. Η ύπαρξη των παρασιτικών, παρατηρείται στην έξοδο του γυροτρονίου και συνεπώς δεν είναι ξεκάθαρο το πού λαμβάνει χώρα η αλληλεπίδραση των ρυθμών με τη δέσμη. Η κοιλότητα του γυροτρονίου έχει χωριστεί σε τμήματα με τις ορολογίες *downtaper*, *midsection* και *uptaper* (Σχήμα 1.3).

Στις εργασίες [4, 5] έχει προταθεί ότι κάποιοι παρασιτικοί ρυθμοί αλληλεπιδρούν με τη δέσμη, σε χώρο, μετά την κοιλότητα (*after cavity interaction*) αλλά, στο σημείο αυτό, δεν προκαλούν διασπορά στη δέσμη πριν την αλληλεπίδρασή της με το ρυθμό λειτουργίας και συνεπώς δεν επηρεάζουν την αποδοτική αλληλεπίδραση του ρυθμού λειτουργίας με αυτή. Η επιρροή στην απόδοση λειτουργίας συμβαίνει, όταν υπάρχουν διεγερμένοι ρυθμοί πριν την περιοχή του *midsection* (δηλαδή στο *downtaper/spacer*, ή και πιο πριν, στο διάυλο δέσμης), οι οποίοι αλληλεπιδρούν με την ηλεκτρονική δέσμη και προσθέτουν σε αυτή διασπορά, πριν ακόμα συντονιστεί με τον ρυθμό λειτουργίας. Μάλιστα έχει προταθεί πρόσφατα, ότι αυτές οι παρασιτικές συχνότητες προέρχονται από ρυθμούς που οδεύουν προς τα πίσω. Οι ρυθμοί αυτοί ονομάζονται επιστρέφοντες ρυθμοί (*backward waves*).

Στο Σχήμα 1.3 αναπαρίσταται ο ρυθμός λειτουργίας (*nominal*) του γυροτρονίου με μαύρο χρώμα και με πράσινο ο επιστρέφων ρυθμός. Το σχήμα αυτό αναφέρεται στο γυροτρόνιο 1 MW – 140 GHz, ρυθμού - $TE_{28,08}$ [6] στην προσομοίωση δέσμης - πεδίου με ηλεκτρονική δέσμη με λόγο ταχυτήτων $\alpha = 1.5$. Τα προφίλ του ρυθμού λειτουργίας και του παρασιτικού επιστρέφοντα ρυθμού είναι κανονικοποιημένα στη μονάδα και αναπαρίστανται στο ίδιο διάγραμμα με το περίγραμμα της κοιλότητας. Στην περιοχή του *midsection* της κοιλότητας ο παρασιτικός $TE_{23,07}$ έχει συχνότητα μεγαλύτερη από τη συχνότητα αποκοπής του, γεγονός που του επιτρέπει να διαδίδεται στην περιοχή του *midsection*. Στην περιοχή του *Spacer* ($z \sim 20$ mm) έρχεται σε αποκοπή και ανακλάται πίσω προς την περιοχή του *midsection*. Από αυτό το γεγονός δημιουργείται το στάσιμο

κύμα. Επίσης, από αυτή τη συμπεριφορά, φαίνεται ότι το επιστρέφον κύμα διεγείρεται κάπου στο μέσο της περιοχής του midsection. Αντίθετα, ο ρυθμός λειτουργίας $TE_{28,08}$ έχει συχνότητα πολύ κοντά στην αποκοπή στο μέσο της περιοχής του midsection και το πεδίο του εισέρχεται ελάχιστα στην περιοχή του downtaper. Αυτή η διαφοροποίηση στα δύο πεδία είναι υπεύθυνη για τη μείωση της ισχύος στην έξοδο του γυροτρονίου.

Ο παρασιτικός επιστρέφων ρυθμός αλληλεπιδρά με την ηλεκτρονική δέσμη στην περιοχή του downtaper, αν αυτός είναι αρκετά ισχυρός. Έτσι η δέσμη υφίσταται διασπορά, δηλαδή κάποια από τα ηλεκτρόνια έχουν χάσει μέρος της κινητικής τους ενέργειας και όταν στη συνέχεια εισέρχεται στην περιοχή του midsection για να αλληλεπιδράσει με τον ρυθμό λειτουργίας δεν έχει την ίδια αποδοτικότητα. Επομένως μικρότερο μέρος της κινητικής ενέργειας της δέσμης μετατρέπεται σε ηλεκτρομαγνητική και τελικά η ισχύς στην έξοδο του γυροτρονίου μειώνεται.



Σχήμα 1.3 [3]: Προφίλ του ρυθμού λειτουργίας $TE_{28,08}$ και του επιστρέφοντα παρασιτικού ρυθμού $TE_{23,07}$, κανονικοποιημένα στη μονάδα, στο ίδιο διάγραμμα με το περίγραμμα της κοιλότητας, με αναφορά στα τμήματα που διαχωρίζεται.

1.2 Αντικείμενο της εργασίας

Η διπλωματική εργασία έχει σκοπό την περαιτέρω μελέτη των επιστρεφόντων ρυθμών και την εξάρτησή τους από φυσικές και αριθμητικές παραμέτρους. Η μελέτη της εξάρτησης από αριθμητικές παραμέτρους αποσκοπεί στο να δείξει πόσο αξιόπιστο είναι το μοντέλο αλληλεπίδρασης σε ό,τι αφορά τη σωστή προσομοίωση παρασιτικών επιστρεφόντων κυμάτων, τα οποία μέχρι τώρα αγνοούνταν, κατά κανόνα, στις πολυρρυθμικές προσομοιώσεις. Η μελέτη της εξάρτησης από φυσικές παραμέτρους βοηθά στην κατανόηση των αιτιών της διέγερσης των παρασιτικών.

Ο κώδικας EURIDICE [7], που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, είναι ένας αριθμητικός κώδικας αλληλεπίδρασης και περιλαμβάνει αλγορίθμους για την επιλογή του ρυθμού λειτουργίας, τον υπολογισμό του προφίλ του πεδίου TE στη ψυχρή κοιλότητα (απουσία της ηλεκτρονικής δέσμης), τον υπολογισμό του ρεύματος εκκίνησης, τον αυτοσυνεπή υπολογισμό του προφίλ του πεδίου (η συνάρτηση αξονικού προφίλ εξαρτάται από τη συμπεριφορά της δέσμης) σε στατική μονορρυθμική (single-mode) λειτουργία και χρονοεξαρτώμενη πολυρρυθμική προσομοίωση της αλληλεπίδρασης δέσμης-πεδίου. Μια περαιτέρω περιγραφή της EURIDICE μπορεί να βρεθεί στο [7].

Οι επιμέρους αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στην EURIDICE είναι οι *Design*, *Coldcav*, *Istart*, *Self*, *Inter* και *Envidiki*. Ο αλγόριθμος *Coldcav*, υπολογίζει το προφίλ των TE πεδίων, των συχνοτήτων τους και των συντελεστών ποιότητάς τους στη ψυχρή κοιλότητα. Επίσης, προσδιορίζονται οι υποψήφιοι προς διέγερση ρυθμοί, δυνατότητα που θα χρησιμοποιηθεί σε επόμενα κεφάλαια της εργασίας. Ο αλγόριθμος *Envidiki*, προσομοιώνει την αλληλεπίδραση δέσμης-πεδίου με έναν χρονοεξαρτώμενο κώδικα, δηλαδή δέχεται ηλεκτρονική δέσμη με χρονοεξαρτώμενα χαρακτηριστικά και έχει ως έξοδο χρονοεξαρτώμενα μεγέθη. Τα αρχεία εξόδου περιέχουν τιμές διαφόρων ποσοτήτων, όπως την ισχύ RF, τη συχνότητα ρυθμών f_n , την απόδοση αλληλεπίδρασης η (%), την ωμική φόρτιση που προσδίδει ένας ρυθμός ή όλοι οι ρυθμοί στα εξωτερικά τοιχώματα ρ (kW/cm²) κ.α, σε κάθε χρονική στιγμή. Έτσι, καθίσταται εύκολο, να παρατηρηθεί η συμπεριφορά των ρυθμών κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης.

2 Προσομοίωση αλληλεπίδρασης δέσμης – πεδίου με δύο ρυθμούς

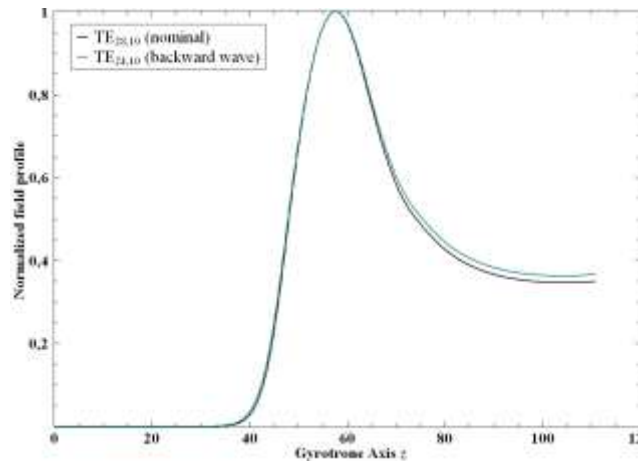
Πολυρρυθμικές προσομοιώσεις της αλληλεπίδρασης δέσμης - πεδίου ανέδειξαν την ύπαρξη παρασιτικών επιστρεφόντων ρυθμών μέσα σε δύο υψηλής ισχύος κοιλότητες γυροτρονίων που χρησιμοποιούνται στον αντιδραστήρα σύντηξης W7-X και απεικόνισαν τον μηχανισμό που οδηγεί σε υποβάθμιση της απόδοσης [3]. Οι πολυρρυθμικές προσομοιώσεις εκτελέστηκαν από δύο κώδικες. Ο πρώτος είναι η EURIDICE και ο δεύτερος ο simpleRick [8]. Οι δύο κώδικες συμφώνησαν στα αποτελέσματα και επιβεβαιώθηκε αφενός, η αλληλεπίδραση των επιστρεφόντων κυμάτων με τη δέσμη στην περιοχή του *downtaper* ή και του *spacer* και αφετέρου, η μείωση της παραγόμενης ισχύος κατά περίπου 10% εξαιτίας της διασποράς που προκαλούν στην ηλεκτρονική δέσμη. Επίσης, από τα αριθμητικά αποτελέσματα φάνηκε η χαρακτηριστική δυναμικότερη παρουσία των παρασιτικών με την αύξηση του λόγου ταχυτήτων α .

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον κώδικα EURIDICE των προσομοιώσεων με δύο ρυθμούς - τον ρυθμό λειτουργίας και τον παρασιτικό επιστρέφοντα ρυθμό - στις κοιλότητες δύο γυροτρονίων. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με ήδη δημοσιευμένα [3], με σκοπό τον έλεγχο της ορθότητάς τους αλλά και την επιβεβαίωση φυσικών συμπερασμάτων.

2.1 Γυροτρόνιο 1.5 MW - 140 GHz

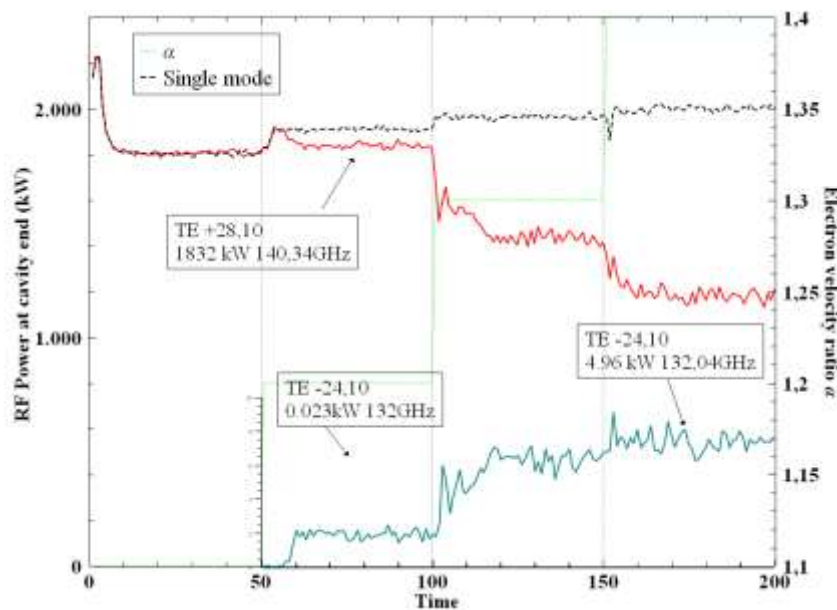
Με την EURIDICE προσομοιώνεται η αλληλεπίδραση δέσμης - πεδίου στο γυροτρόνιο ισχύος 1.5 MW και συχνότητας 140 GHz ρυθμού - TE_{28,10} [9] για δύο ρυθμούς. Ο πρώτος είναι ο ρυθμός λειτουργίας TE_{28,10} με συχνότητα 140.35 GHz και ο δεύτερος είναι ο TE_{-24,10} με 129.79 GHz, που όπως έχει αποδειχθεί [3], εμφανίζει χαρακτηριστικά κύματος που οδεύει προς τα πίσω. Η λειτουργία του γυροτρονίου στον ρυθμό TE_{28,10} έχει ως ονομαστικές παραμέτρους: κινητική ενέργεια ηλεκτρονίων $E_{kin} = 80$ keV, ρεύμα δέσμης (beam current) $I_b = 55$ A, μαγνητικό πεδίο $B_0 = 5.56$ T, ακτίνα της ηλεκτρονικής δέσμης $R_{gc} = 10.1$ mm και λόγο ταχυτήτων $\alpha = 1.2$. Η προσομοίωση διαρκεί 50 ns και επαναλαμβάνεται για τέσσερις διαφορετικές τιμές του λόγου ταχυτήτων των ηλεκτρονίων, ξεκινώντας από $\alpha = 1.1$. Έχει ήδη δειχτεί, ότι αυξάνοντας την τιμή του α , αύξηση η οποία ιδανικά θα οδηγούσε στην παραγωγή μεγαλύτερης ισχύος, εμφανίζονται παρασιτικοί ρυθμοί και συγκεκριμένα ο ρυθμός TE_{-24,10} που αλληλεπιδρά με τη δέσμη, εισάγοντας διασπορές.

Με τον κώδικα *Coldcan* εξάγεται το προφίλ και η συχνότητα των πεδίων απουσία ηλεκτρονικής δέσμης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Από αυτό το διάγραμμα μπορεί κανείς να παρατηρήσει τα διαφορετικά σημεία της κοιλότητας που σκιαγραφούνται από τους ίδιους τους ρυθμούς. Πριν τα $z \cong 35$ mm οι δύο ρυθμοί βρίσκονται στην αποκοπή. Το σημείο που γίνονται μέγιστοι ($z \cong 55$ mm) είναι κοντά στο μέσο της περιοχής του midsection σταθερής ακτίνας, ενώ στην περιοχή $z \geq 70$ mm το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο γίνεται οδεύον κύμα.



Σχήμα 2.1: Προφίλ πεδίων κανονικοποιημένο στη μονάδα, όπως εξάγεται από τον κώδικα *Coldcan* του EURIDICE, κατά μήκος της κοιλότητας απουσία ηλεκτρονικής δέσμης.

Από τα αρχεία του κώδικα *Enridiki* φτιάχτηκε διάγραμμα (Σχήμα 2.2), στο οποίο φαίνεται η ισχύς εξόδου στις διάφορες τιμές του λόγου ταχυτήτων. Για $\alpha = 1.1$ η λειτουργία του γυροτρονίου είναι μονορρυθμική, ενώ για την ονομαστική τιμή $\alpha = 1.2$ παρατηρούμε ότι η ισχύς του TE_{-24,10} στην έξοδο του γυροτρονίου αυξάνεται ~ 2 kW, που δείχνει ότι έχει αλληλεπιδράσει με τη δέσμη. Για $\alpha = 1.4$, η τιμή ισχύος του παρασιτικού ρυθμού έχει φτάσει στα ~ 7.6 kW, ενώ η ισχύς του κύριου ρυθμού μειώθηκε κατά 39 % σχετικά με την ισχύ που έχει στην περιοχή λειτουργίας. Στον Πίνακα 2.1, φαίνονται αναλυτικά οι μέσες τιμές ισχύος για τους δύο ρυθμούς αλλά και οι συχνότητες αυτών κατά την αλληλεπίδρασή τους με δέσμη για διαφορετικές τιμές του λόγου ταχυτήτων.



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα RF ισχύος στο χρόνο, από προσομοίωση δύο ρυθμών της αλληλεπίδρασης δέσμης-πεδίου στο γυροτρόνιο 1.5 MW, 140 GHz, ρυθμού TE_{28,10} με τις χαρακτηριστικές παραμέτρους λειτουργίας γι' αυτό το γυροτρόνιο, για τέσσερις διαφορετικές τιμές του λόγου ταχυτήτων.

Αναφέρθηκε στην εισαγωγή ότι τα γυροτρόνια λειτουργούν κοντά στην αποκοπή και η συχνότητα του ρυθμού είναι πολύ κοντά στην κυκλοτρονική συχνότητα. Αυτό επιβεβαιώνεται στον Πίνακα 2.1 για το ρυθμό TE_{28,10}. Παρατηρείται όμως, ότι ο παρασιτικός ρυθμός έχει συχνότητα μικρότερη από την κυκλοτρονική. Υπό την προϋπόθεση ότι έχει αλληλεπιδράσει με τη δέσμη, ικανοποιείται η συνθήκη συντονισμού (σχέση 1.6). Συνεπώς ο παράγοντας Doppler είναι, αφενός, αρνητικός όρος (επιβεβαίωση ότι ο ρυθμός οδεύει προς τα αρνητικά z) και αφετέρου, αρκετά σημαντικός για την ικανοποίηση της συνθήκης. Τα συμπεράσματα αυτά επαληθεύονται και στην [3].

Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται συγκεντρωμένα, τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις στην εργασία [3] και στον Πίνακα 2.3 έχει γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο εργασιών. Παρατηρείται διαφοροποίηση στις τιμές ισχύος τόσο του κύριου ρυθμού (έως ~ 4 %) όσο και του παρασιτικού (έως ~ 17 %). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι προσομοιώσεις της διπλωματικής έγιναν με καινούργια έκδοση του κώδικα *Envidiki*, συγκεκριμένα με την έκδοση *Envidiki48*. Θεωρητικά, εφόσον πρόκειται για ανανεωμένη έκδοση, τα αποτελέσματα αυτά λαμβάνονται ως τα πλέον και τα προς το παρόν, ακριβέστερα.

Πίνακας 2.1: Μέσες τιμές ισχύος και χαρακτηριστικές συχνότητες από την προσομοίωση αλληλεπίδρασης δέσμης-πεδίου στο γυροτρόνιο 1.5 MW - 140 GHz, με τον κώδικα *Envidiki48*

Λόγος ταχυτήτων των ηλεκτρονίων στην δέσμη α	Μέση ισχύς στην έξοδο του γυροτρονίου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (kW)		Μέση συχνότητα ταλάντωσης των ρυθμών (GHz)		Εύρος τιμών κυκλοτρονικής συχνότητας κατά μήκος της κοιλότητας (GHz)	
	TE _{28,10}	TE _{-24,10}	TE _{28,10}	TE _{-24,10}	132.0 - 134.6	
1.1	1808	0	140.4	131.6	Εύρος τιμών συχνοτήτων αποκοπής μέχρι το midsection (GHz)	
1.2	1839	2	140.4	131.8		
1.3	1436	6	140.4	132.1	TE _{28,10}	TE _{-24,10}
1.4	1180	7	140.4	132.1	217.8 - 140.2	201.4 - 129.7

Πίνακας 2.2 [3]: Μέσες τιμές ισχύος και χαρακτηριστικές συχνότητες από την προσομοίωση αλληλεπίδρασης δέσμης-πεδίου στο γυροτρόνιο 1.5 MW - 140 GHz, με τον κώδικα *Enridiki47*

Λόγος ταχυτήτων των ηλεκτρονίων στην δέσμη α	Μέση ισχύς στην έξοδο του γυροτρονίου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (kW)		Μέση συχνότητα ταλάντωσης των ρυθμών (GHz)		Εύρος τιμών κυκλοτρονικής συχνότητας κατά μήκος της κοιλότητας (GHz)	
	TE _{28,10}	TE _{-24,10}	TE _{28,10}	TE _{-24,10}	131.9 - 134.6	
1.2	1817	2	140.4	131.9	Εύρος τιμών συχνοτήτων αποκοπής μέχρι το midsection (GHz)	
1.3	1384	7	140.4	132.0	TE _{28,10}	TE _{-24,10}
1.4	1152	8	140.4	132.1	217.8 - 140.2	201.4 - 129.7

Πίνακας 2.3: Σύγκριση των μέσων τιμών ισχύος σε κάθε τιμή του λόγου ταχυτήτων από τα αποτελέσματα των δύο εργασιών

Λόγος ταχυτήτων των ηλεκτρονίων στην δέσμη α	Σύγκριση (%) των τιμών ισχύος του TE _{28,10}	Σύγκριση (%) των τιμών ισχύος του TE _{-24,10}
1.2	1.2%	0%
1.3	3.7%	16%
1.4	2.4%	14.2%

2.2 Γυροτρόνιο 1.0 MW-140 GHz

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για το γυροτρόνιο 1 MW - 140 GHz ρυθμού - TE_{28,08} και για τον αποδεδειγμένα παρασιτικό επιστρέφοντα ρυθμό TE_{23,07}. Η προσομοίωση της αλληλεπίδρασης γίνεται με την εισαγωγή των ονομαστικών παραμέτρων: αρχική κινητική ενέργεια $E_{kin} = 78.0$ keV, ρεύμα δέσμης $I_b = 46$ A, μόνιμο μαγνητικό πεδίο στην κοιλότητα $B_0 = 5.56$ T και ακτίνα δέσμης $R_{gc} = 10.1$ mm.

Στον Πίνακα 2.4 παρατίθενται οι μέσες τιμές ισχύος RF αλλά και οι τιμές των συχνοτήτων ταλάντωσης και αποκοπής των ρυθμών. Στον Πίνακα 2.5 είναι συγκεντρωμένα, με παρόμοιο τρόπο τα αποτελέσματα της εργασίας [3], ώστε να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Παρά το γεγονός ότι οι προσομοιώσεις έχουν τα ίδια αρχεία εισόδου, υπάρχει διαφοροποίηση στις μέσες τιμές ισχύος, που οφείλεται στις διαφορετικές εκδόσεις του κώδικα.

Από τους πίνακες παρατηρείται η σταθερή συχνότητα του ρυθμού λειτουργίας TE_{28,08} παρά την αλλαγή στο λόγο ταχυτήτων. Αντίθετα, η συχνότητα του παρασιτικού επιστρέφοντος ρυθμού δείχνει μια εξάρτηση από τα χαρακτηριστικά της δέσμης. Αυτό είναι ένα άλλο χαρακτηριστικό των backward waves. Ακόμη, η συχνότητα ταλάντωσης του παρασιτικού ρυθμού είναι μικρότερη από την κυκλοτρονική, ενώ η συχνότητα του

κύριου ρυθμού είναι μεγαλύτερη, συμπληρώνοντας και ενισχύοντας τη συζήτηση, του μεγαλύτερου παράγοντα Doppler στα backward waves, που έγινε για το γυροτρόνιο 1.5 MW.

Πίνακας 2.4: Μέσες τιμές ισχύος και χαρακτηριστικές συχνότητες από την προσομοίωση αλληλεπίδρασης δέσμης-πεδίου στο γυροτρόνιο 1.0 MW - 140 GHz, με τον κώδικα *Envidiki48*

Λόγος ταχυτήτων των ηλεκτρονίων στην δέσμη a	Μέση ισχύς στην έξοδο του γυροτρονίου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (kW)		Μέση συχνότητα ταλάντωσης των ρυθμών (GHz)		Εύρος τιμών κυκλοτρονικής συχνότητας κατά μήκος της κοιλότητας (GHz)	
	TE _{28,08}	TE _{23,07}	TE _{28,08}	TE _{23,07}	132.3 – 135.0	
1.2	1162	0	140.2	124.8	Εύρος τιμών συχνοτήτων αποκοπής μέχρι το midsection (GHz)	
1.3	1312	0	140.2	125.6		
1.4	1293	7	140.2	125.9	TE _{28,08}	TE _{23,07}
1.5	1168	13	140.2	126.2	197.8 - 140.0	165.9 - 117.4

Πίνακας 2.5 [3]: Μέσες τιμές ισχύος και χαρακτηριστικές συχνότητες από την προσομοίωση αλληλεπίδρασης δέσμης-πεδίου στο γυροτρόνιο 1.0 MW - 140 GHz, με τον κώδικα *Envidiki47*

Λόγος ταχυτήτων των ηλεκτρονίων στην δέσμη a	Μέση ισχύς στην έξοδο του γυροτρονίου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (kW)		Μέση συχνότητα ταλάντωσης των ρυθμών (GHz)		Εύρος τιμών κυκλοτρονικής συχνότητας κατά μήκος της κοιλότητας (GHz)	
	TE _{28,08}	TE _{23,07}	TE _{28,08}	TE _{23,07}	132.3 – 135.0	
1.3	1308	0	140.2	-	Εύρος τιμών συχνοτήτων αποκοπής μέχρι το midsection (GHz)	
1.4	1280	8	140.2	125.9		
1.5	1151	14	140.2	126.1	197.8 - 140.0	165.9 - 117.4

Πίνακας 2.6: Σύγκριση των μέσων τιμών ισχύος σε κάθε τιμή του λόγου ταχυτήτων από τα αποτελέσματα των δύο εργασιών

Λόγος ταχυτήτων των ηλεκτρονίων στην δέσμη a	Σύγκριση (%) των τιμών ισχύος του TE _{28,10}	Σύγκριση (%) των τιμών ισχύος του TE _{-24,10}
1.3	0.3%	0%
1.4	1%	12.5%
1.5	1.5%	7.1%

Σε αυτό το κεφάλαιο έγινε μια επανάληψη των προσομοιώσεων της εργασίας [3] με μια βελτιωμένη έκδοση του κώδικα EURIDICE. Τα αποτελέσματα δείχνουν όχι μόνο

την ύπαρξη των επιστρεφόντων κυμάτων, αλλά και κοινά χαρακτηριστικά που εμφανίζουν τέτοιοι ρυθμοί σε δύο διαφορετικά γυροτρόνια. Υπάρχει διαφοροποίηση στις μέσες τιμές ισχύος RF στις προσομοιώσεις που οφείλεται στη διαφορετική έκδοση του κώδικα. Γίνεται αντιληπτό και από τις δύο εργασίες στα δύο γυροτρόνια, ότι η ύπαρξη επιστρεφόντων ρυθμών προκαλεί σημαντική μείωση της παραγόμενης ισχύος. Καθίσταται λοιπόν, απαραίτητη η περαιτέρω μελέτη των ρυθμών αυτών και ιδιαίτερα η αναζήτηση της αιτίας εμφάνισής τους.

3 Αλλαγή αριθμητικών παραμέτρων στις προσομοιώσεις δύο ρυθμών

Ο κώδικας EURIDICE είναι ένας τροχιακός κώδικας (trajectory code), που επιλύει το μαθηματικό μοντέλο αλληλεπίδρασης δέσμης - πεδίου (1.6) - (1.7). Στο αρχείο εισόδου του κώδικα εισάγονται οι επιθυμητοί ρυθμοί ΤΕ, τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της ηλεκτρονικής δέσμης, οι διασπορές στις αρχικές τιμές των κινητικών μεγεθών των ηλεκτρονίων και τέλος οι αριθμητικές παράμετροι που επιλέγονται σύμφωνα με συνθήκες που παρουσιάζονται στο [Κεφ. 4 του [2]] και καθορίζονται με στόχο την ταχύτητα και την αξιοπιστία της προσομοίωσης.

Είναι γεγονός ότι οι αριθμητικές παράμετροι αφορούν την προσομοίωση και μόνο. Στο φυσικό πρόβλημα ο χρόνος και ο χώρος είναι συνεχείς. Η προσέγγιση της συνέχειας στον χώρο και στον χρόνο συνεπάγεται μεγάλη διακριτοποίηση και επομένως επιβάρυνση των πόρων που χρησιμοποιούνται, αλλά και μεγάλη χρονική καθυστέρηση. Σε αυτό το κεφάλαιο μεταβάλλουμε τις χρονικές και τις χωρικές παραμέτρους, ώστε να έχουμε λεπτομερέστερη εικόνα της αλληλεπίδρασης, χωρίς να επιβαρυνθεί ιδιαίτερα το πρόγραμμα. Με τις μεταβολές αυτές, διερευνάται αν υπάρχει εξάρτηση της συμπεριφοράς του επιστρέφοντος κύματος από αριθμητικές παραμέτρους της προσομοίωσης. Αν υπάρχει εξάρτηση, τότε τα συμπεράσματα που βασίζονται στις προσομοιώσεις δεν θα μπορούσαν να είναι αξιόπιστα. Στην περίπτωση αυτή, θα πρέπει να γίνουν περαιτέρω προσομοιώσεις, έως ότου υπάρξει μια ευστάθεια μεταξύ των αποτελεσμάτων. Σε αντίθετη περίπτωση, αν δηλαδή προκύψει, ότι δεν αλλάζει κάτι στα αποτελέσματα με την αλλαγή των αριθμητικών παραμέτρων, τότε τα συμπεράσματα που έχουν προκύψει έως τώρα είναι αξιόπιστα.

Η χρονική παράμετρος που μεταβάλλεται αρχικά, είναι το χρονικό βήμα Δt , κατά το οποίο ολοκληρώνεται ο κύκλος επίλυσης των εξισώσεων πεδίου (1.6) - (1.7). Στις προσομοιώσεις της προηγούμενης ενότητας είχε ορισθεί $\Delta t = 0.01$ ns. Μια πρώτη προσέγγιση είναι το χρονικό βήμα να υποδιπλασιαστεί και σε δεύτερο χρόνο, να υποτετραπλασιαστεί. Η χωρική παράμετρος Δz , η οποία επηρεάζει την ακρίβεια της επίλυσης των εξισώσεων κίνησης, υποδιπλασιάζεται με σκοπό την λεπτομερέστερη εκδοχή των προσομοιώσεων. Στην προηγούμενη ενότητα είχε ορισθεί $\Delta z = 0.1$ mm. Σε επόμενο κύκλο προσομοιώσεων μεταβάλλουμε στο αρχείο εισόδου του κώδικα τον αριθμό των ηλεκτρονίων, ο οποίος είχε ορισθεί να είναι 1000. Έτσι, ο διπλασιασμός και ο τετραπλασιασμός του αριθμού των ηλεκτρονίων προσεγγίζει περισσότερο το φυσικό πρόβλημα.

Το ενδιαφέρον εστιάζεται στην μεταβολή της ισχύος στην έξοδο του γυροτρονίου κατά τη μεταβολή των αριθμητικών παραμέτρων. Στον Πίνακα 3.1, παρουσιάζονται οι μέσες τιμές ισχύος RF του κύριου ρυθμού $TE_{28,10}$ και του επιστρέφοντα ρυθμού $TE_{-24,10}$ κατά τις μεταβολές που συζητήθηκαν, ενώ ταυτόχρονα έχουν συμπεριληφθεί διαφορετικές τιμές του λόγου ταχυτήτων. Η γραμμή που έχει χαρακτηριστεί ως Π.2.1, αναφέρεται στις τιμές ισχύος του Πίνακα 2.1 οι οποίες αποτυπώνονται και σε αυτόν τον

Πίνακα, προς άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων. Οι γραμμές που ονομάστηκαν $\Delta t/2$ και $\Delta t/4$ αναφέρονται στον υποδιπλασιασμό και υποτετραπλασιασμό του χρονικού βήματος, αντίστοιχα. Επίσης ο συμβολισμός $\Delta z/2$ αντιπροσωπεύει τον διπλασιασμό των κόμβων στον άξονα z και οι $2*#elec$ και $4*#elec$ αποτελούν συντόμευση για τον διπλασιασμό και τετραπλασιασμό του αριθμού των ηλεκτρονίων στη δέσμη, αντίστοιχα.

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα προσομοιώσεων δύο-ρυθμών με αλλαγή των αριθμητικών παραμέτρων στο γυροτρόνιο 1.5 MW - 140GHz ρυθμού - TE_{28,10}

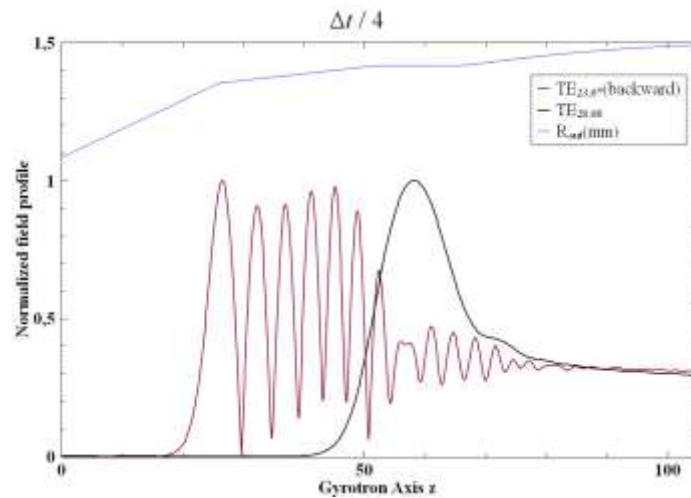
	$\alpha = 1.2$			$\alpha = 1.3$			$\alpha = 1.4$		
	TE _{28,10} P_{out} (kW)	Μεταβολή ισχύος από Π. 2.1 (%)	TE _{-24,10} P_{out} (kW)	TE _{28,10} P_{out} (kW)	Μεταβολή ισχύος από Π. 2.1 (%)	TE _{-24,10} P_{out} (kW)	TE _{28,10} P_{out} (kW)	Μεταβολή ισχύος από Π. 2.1 (%)	TE _{-24,10} P_{out} (kW)
Π.2.1	1840	-	2	1436	-	6	1180	-	7
$\Delta t/2$	1840	0.4	2	1486	3.4	6	1197	1.4	7
$\Delta t/4$	1838	0.1	2	1433	0.2	6	1180	-	8
$\Delta z/2$	1838	0.1	2	1453	1.2	6	1183	0.3	7
$2*#elec$	1840	-	2	1419	1.2	7	1186	0.5	7
$4*#elec$	1839	0.05	2	1433	0.2	6	1182	0.2	7

Είναι προφανές ότι οι αλλαγές που παρατηρούνται με την αλλαγή των παραμέτρων είναι αμελητέες < 4%, σε κάθε περίπτωση. Επίσης, σε ότι αφορά τη συχνότητα ταλάντωσης του επιστρέφοντος ρυθμού, δεν παρατηρήθηκαν αλλαγές. Τα παραπάνω συνεπάγονται αξιοπιστία των προσομοιώσεων και ενισχύουν τα έως τώρα συμπεράσματα.

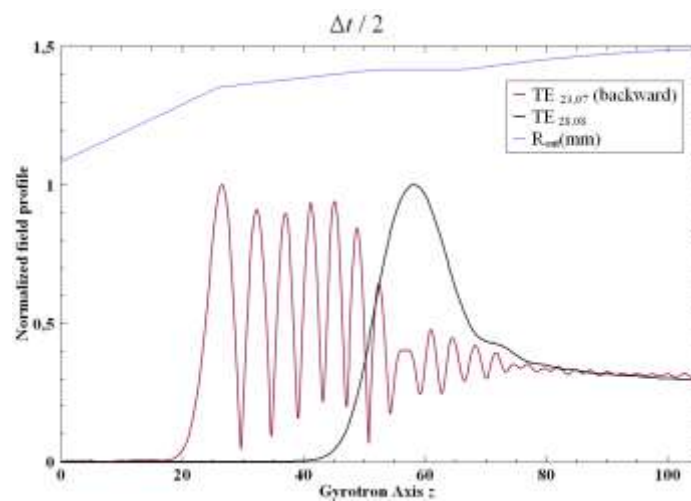
Παρόμοια με το γυροτρόνιο 1.5 MW - 140 GHz, οι προσομοιώσεις στο γυροτρόνιο 1 MW - 140 GHz ρυθμού - TE_{28,08} και ανταγωνιστή επιστρέφοντα ρυθμό TE_{23,07} με αλλαγές στις αριθμητικές παραμέτρους έδειξαν την ίδια και μεγαλύτερη ευστάθεια. Ο Πίνακας 3.2 έχει φτιαχτεί ακριβώς με τη λογική του Πίνακα 3.1 (με τη διαφορά ότι οι τιμές στη γραμμή με όνομα Π.2.4 αναφέρονται στον Πίνακα 2.4). Παρατηρούμε, ότι οι αποκλίσεις μεταξύ των τιμών είναι < 1%, επομένως θεωρούνται αμελητέες. Επίσης, στο Σχήμα 3.1 φαίνονται τα προφίλ των ρυθμών όταν τα ηλεκτρόνια έχουν συγκεκριμένη τιμή στον λόγο ταχυτήτων ($\alpha = 1.5$), σε τέσσερις διαφορετικές προσομοιώσεις, σε κάθε μία από τις οποίες, έχει μεταβληθεί κάποια αριθμητική παράμετρος. Συγκρίνοντας τις εικόνες των προφίλ μεταξύ τους, μπορεί να γίνει άμεση διαπίστωση της αξιοπιστίας των προσομοιώσεων.

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα προσομοιώσεων δύο - ρυθμών με αλλαγή των αριθμητικών παραμέτρων στο γυροτρόνιο 1 MW – 140GHz ρυθμού-TE_{28,08}

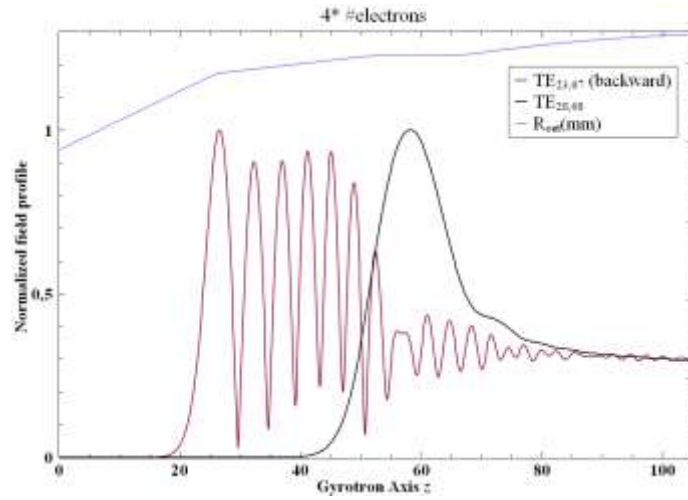
	$\alpha = 1.3$			$\alpha = 1.4$			$\alpha = 1.5$		
	TE _{28,08} P_{out} (kW)	Μεταβολή ισχύος από Π. 2.4 (%)	TE _{23,07} P_{out} (kW)	TE _{28,08} P_{out} (kW)	Μεταβολή ισχύος από Π. 2.4 (%)	TE _{23,07} P_{out} (kW)	TE _{28,08} P_{out} (kW)	Μεταβολή ισχύος από Π. 2.4 (%)	TE _{23,07} P_{out} (kW)
Π.2.4	1312	-	0	1293	-	7	1168	-	13
$\Delta t/2$	1315	0.2	0	1292	0.1 %	7	1170	0.2%	13
$\Delta t/4$	1313	0.08	0	1292	0.1%	7	1167	0.1%	13
$2*\Delta z$	1311	0.08	0	1291	0.2%	7	1168	-	13
$2*\#elec$	1316	0.3	0	1293	0%	7	1169	0.1%	13
$4*\#elec$	1317	0.4	0	1293	0%	7	1169	0.1%	13



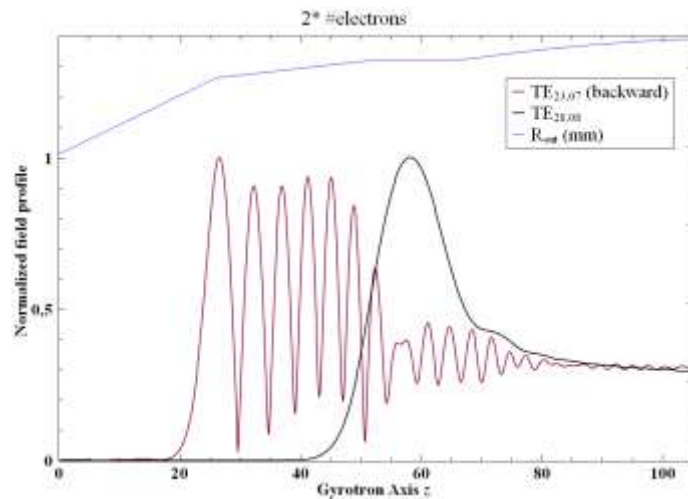
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 3.1: Προφίλ των δύο πεδίων με $\alpha = 1.5$ σε τέσσερις διαφορετικές προσομοιώσεις. Στην πρώτη έχει υποτετραπλασιαστεί το χρονικό μήμα Δt , στη δεύτερη έχει υποδιπλασιαστεί το χρονικό βήμα Δt , στην τρίτη έχει τετραπλασιαστεί ο αριθμός ηλεκτρονίων της δέσμης και στην τέταρτη έχει διπλασιαστεί. Ο συμβολισμός των σχημάτων, ακολουθεί το συμβολισμό των Πινάκων.

Σε αυτό το κεφάλαιο ολοκληρώνεται ο έλεγχος εξάρτησης των επιστρεφόντων ρυθμών από τις αριθμητικές παραμέτρους στην περίπτωση που λαμβάνονται υπόψη μόνο δύο ρυθμοί. Είναι προφανές από τις προσομοιώσεις της αλληλεπίδρασης δέσμης-πεδίου στα δύο γυροτρόνια, ότι οι αλλαγές τόσο στην ισχύ RF, όσο και στη συχνότητα είναι αμελητέες με την αλλαγή των αριθμητικών παραμέτρων. Έχοντας αυτά τα αποτελέσματα, μπορούμε να πούμε ότι για να μελετήσει κανείς επιστρεφόντες ρυθμούς με προσομοιώσεις δύο ρυθμών, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα EURIDICE, δεν είναι σκόπιμο να αλλάξει τα αρχεία εισόδου, ώστε να πάρει ακριβέστερα αποτελέσματα καθώς αρκούν οι επιλογές $\Delta t = 0.01$ ns, $\Delta z = 0.1$ mm και #elec = 1000 της Ενότητας 2.

4 Πολυρρυθμικές προσομοιώσεις και μεταβολή αριθμητικών παραμέτρων

Στο ηλεκτροδυναμικό σύστημα των γυροτρονίων, όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, υπάρχει μια πληθώρα ρυθμών TE και TM. Η κοιλότητα και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του κάθε γυροτρονίου βελτιστοποιούνται ώστε να συντονίζεται αποδοτικά μόνο ο ρυθμός λειτουργίας του γυροτρονίου με την ηλεκτρονική δέσμη, επιτυγχάνοντας μονορρυθμική λειτουργία. Η αποδοτικότητα της αλληλεπίδρασης και συνεπώς, η εξασφάλιση μονορρυθμικής λειτουργίας, ανάγονται στην ικανοποίηση της συνθήκης συντονισμού (1.6) αλλά και στην κατάλληλη επιλογή ακτίνας δέσμης R_{gc} , ώστε να μεγιστοποιείται η ποσότητα $G^2 = |J_{m-s}(k_{\perp mp} R_{gc})|^2$ [Κεφ. 5 του [2]]. Τα γυροτρόνια υψηλής ισχύος λειτουργούν με ρυθμούς υψηλής τάξης, δηλαδή ρυθμούς που έχουν μεγάλες τιμές δεικτών $|m|$ και p . Γίνεται αντιληπτό, ότι με την αύξηση της τάξης του ρυθμού λειτουργίας, αυξάνεται το πλήθος των ζευγαριών (m, p) που ικανοποιούν τις συνθήκες αποδοτικής αλληλεπίδρασης. Σε αυτό το σημείο κρίνεται αναγκαίο να ξεκαθαριστεί ότι η απόλυτη τιμή στον αζιμουθιακό δείκτη m , εισάγεται γιατί θεωρούμε ότι οι ρυθμοί περιστρέφονται αζιμουθιακά. Οι ρυθμοί που περιστρέφονται δεξιόστροφα, όπως τα ηλεκτρόνια ονομάζονται συμπεριστρεφόμενοι (co-rotating) και έχουν $m > 0$, ενώ στην αντίθετη περίπτωση ονομάζονται αντιπεριστρεφόμενοι (counter-rotating) και έχουν $m < 0$.

Επιπλέον, η ύπαρξη των αναπόφευκτων διασπορών ενέργειας, ταχύτητας και κέντρου περιστροφής των ηλεκτρονίων μιας ρεαλιστικής δέσμης δεν περιορίζει μόνο την απόδοση της αλληλεπίδρασης αλλά επιτείνει και το πρόβλημα του ανταγωνισμού των ρυθμών. Η διασπορά ενέργειας και ταχύτητας κάνουν τη συνθήκη συντονισμού να ικανοποιείται από περισσότερους ρυθμούς, ενώ η διασπορά των κέντρων περιστροφής αδυνατίζει την πρωτοδότηση του ρυθμού λειτουργίας από την κατάλληλη επιλογή της ακτίνας της ηλεκτρονικής δέσμης.

Η ποσότητα $G^2 = |J_{m-s}(k_{\perp mp} R_{gc})|^2$ ορίζεται ως συντελεστής σύζευξης, (στα πλαίσια της εργασίας θεωρούμε $s = 1$) και όπως αναφέρθηκε η μεγιστοποίησή της αποτελεί μία εκ των δύο συνθηκών ώστε ο ρυθμός λειτουργίας να αλληλεπιδράσει με τη δέσμη αποδοτικά. Ο κυματαριθμός $k_{\perp mp}$ είναι ανάλογος της συχνότητας αποκοπής ενός ρυθμού. Όμως τα γυροτρόνια λειτουργούν σχετικά κοντά στην αποκοπή που συνεπάγεται ότι η συχνότητα ταλάντωσης του ρυθμού είναι κοντά στη συχνότητα αποκοπής του. Αυτό ισχύει ακόμη και για τα επιστρέφοντα κύματα, αφού η συχνότητα διέγερσής τους είναι $\sim 10\%$ πάνω από τη συχνότητα αποκοπής. Από τη σχέση (1.12) φαίνεται ότι η συχνότητα αποκοπής είναι ανάλογη της ιδιοτιμής και τελικά, το $k_{\perp mp}$ είναι ανάλογο της ιδιοτιμής του ρυθμού. Επομένως, οι ανταγωνιστές ενός ρυθμού βρίσκονται σε ένα διάστημα τιμών κοντά σε αυτό της ιδιοτιμής του.

Ορίζουμε τον σχετικό συντελεστή σύζευξης

$$G_{rel}^2(z) = \frac{[J_{m-s}(k_{\perp mp} R_{gc}(z))]^2}{[G_{operatingmode}^2]} \quad (4.1)$$

όπου ο όρος $G_{operatingmode}^2$ είναι ο συντελεστής σύζευξης του ρυθμού λειτουργίας στο σημείο $z = 60$ mm (μέσο της περιοχής midsection της κοιλότητας). Οι ανταγωνιστές επιστρέφοντες ρυθμοί που είναι προτεινόμενοι σε κάθε προσομοίωση εξάγονται από τον κώδικα *Coldcav* τροποποιώντας τον σχετικό συντελεστή σύζευξης στα αρχεία εισόδου. Ελαττώνοντας το ποσοστό του σχετικού συντελεστή σύζευξης στα αρχεία εισόδου κατά την επιλογή των ανταγωνιστικών ρυθμών, περιλαμβάνονται και ρυθμοί που ικανοποιούν σε μικρότερο ποσοστό τη συνθήκη βέλτιστης αλληλεπίδρασης σε σχέση με τον ρυθμό λειτουργίας, με την έννοια ότι έχουν μικρότερο συντελεστή σύζευξης από αυτόν.

Αφού μελετήθηκαν και επιβεβαιώθηκαν οι προσομοιώσεις με δύο ρυθμούς, είναι φυσικά επόμενο να εξελίξουμε την έρευνά μας σε πολυρρυθμικές προσομοιώσεις. Οι πολυρρυθμικές προσομοιώσεις θα προσεγγίσουν περισσότερο το φυσικό πρόβλημα. Στην [3] έχουν πραγματοποιηθεί πολυρρυθμικές προσομοιώσεις στα δύο γυροτρόνια. Οι πολυρρυθμικές προηγήθηκαν των προσομοιώσεων με δύο ρυθμούς και ανέδειξαν τους επιστρέφοντες ρυθμούς, που μελετήθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, ως τους επικρατέστερους ανταγωνιστές. Στο κεφάλαιο αυτό, προεκτείνεται η ανωτέρω έρευνα σε δύο σκέλη. Το πρώτο σκέλος αφορά την ταυτοποίηση των ανταγωνιστών backward waves σε πολυρρυθμικές προσομοιώσεις και το δεύτερο σκέλος την αναζήτηση μιας “ελαφριάς” πολυρρυθμικής προσομοίωσης με ασφαλή αποτελέσματα.

4.1 Πολυρρυθμικές προσομοιώσεις στο γυροτρόνιο 1.5 MW-140 GHz

Στο γυροτρόνιο 1.5 MW έγιναν συνολικά πέντε προσομοιώσεις με αυξανόμενο πλήθος ανταγωνιστών. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έχουν συγκεντρωθεί και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 και στο Γράφημα 1. Ο Πίνακας 4.1 δημιουργήθηκε με σκοπό την ανάδειξη των επικρατέστερων επιστρεφόντων ρυθμών σε κάθε προσομοίωση. Η πρώτη στήλη του πίνακα αναφέρεται στο πλήθος των ανταγωνιστών ρυθμών που έλαβαν μέρος στην προσομοίωση χωρίς να έχει συμπεριληφθεί ο ρυθμός λειτουργίας του γυροτρονίου και η δεύτερη στον σχετικό συντελεστή σύζευξης. Η τρίτη και τέταρτη στήλη του πίνακα περιέχουν τις τιμές ισχύος στην έξοδο της κοιλότητας, που μετρήθηκαν για τον κάθε ανταγωνιστή, καθώς και την τιμή του λόγου ταχυτήτων στην οποία μετρήθηκε αυτή η ισχύς.

Πίνακας 4.1: Επικρατέστεροι ανταγωνιστές επιστρέφοντες ρυθμοί στις πολυρρυθμικές προσομοιώσεις στο γυροτρόνιο 1.5 MW - 140 GHz

Αριθμός Ρυθμών στις προσομοιώσεις	Σχετικός συντελεστής σύζευξης	Ανταγωνιστές TE_{mp}	$\alpha = 1.3$	$\alpha = 1.4$	Συχνότητα ταλάντωσης (GHz)
> 61	1.0	$TE_{25,09}$	4 kW	1 kW	129.3
		$TE_{24,09}$	4 kW	7 kW	127.9
> 122	0.9	$TE_{25,09}$	5 kW	3 kW	129.2
> 177	0.8	$TE_{25,09}$	5 kW	4 kW	129.3
> 202	0.75	$TE_{24,09}$	7 kW	6 kW	127.8
		$TE_{25,09}$	1 kW	1 kW	129.1

Οι επιστρέφοντες ρυθμοί που επικρατούν είναι διαφορετικοί από αυτών που επικρατεί στις προσομοιώσεις της [3], εξαιτίας της ανανεωμένης έκδοσης του κώδικα. Μπορεί να παρατηρήσει κανείς, ότι είτε προσομοιώσουμε περισσότερους από 61 ρυθμούς είτε περισσότερο από 202 ρυθμούς, οι επικρατέστεροι ανταγωνιστές είναι οι $TE_{24,09}$ και $TE_{25,09}$. Οι ρυθμοί αυτοί έχουν ιδιοτιμές $\chi_{24,09} = 58,6$ και $\chi_{25,09} = 59,8$ ενώ ο ρυθμός λειτουργίας έχει $\chi_{28,10} = 67,1$, δηλαδή οι ιδιοτιμές των ανταγωνιστών ρυθμών βρίσκονται στο 12.6% του ρυθμού λειτουργίας. Ειδικότερα, ο $TE_{24,09}$, που αποκτά τη μεγαλύτερη τιμή ισχύος (~ 7 kW) έναντι του $TE_{25,09}$, εμφανίζει μεγάλη ευστάθεια χαρακτηριστικών στις δύο προσομοιώσεις. Βέβαια, είναι σημαντικό να αναφερθεί η απουσία του $TE_{24,09}$ στις προσομοιώσεις με 122 και 177 ρυθμούς. Το συμπέρασμα που εξάγεται από τα παραπάνω, είναι ότι ο κώδικας δείχνει ξεκάθαρα την ταυτότητα των επικρατέστερων ανταγωνιστών, ακόμη και με 61 ρυθμούς, γεγονός που διασφαλίζει την αξιοπιστία του ως προς αυτό.

Στο Γράφημα 1, παρουσιάζεται η απόκλιση των τιμών της ισχύος του ρυθμού λειτουργίας, που προκύπτει από την παρουσία ανταγωνιστών στις πολυρρυθμικές προσομοιώσεις. Η σύγκριση γίνεται με την προσομοίωση που περιέχει τους λιγότερους ρυθμούς. Στην περίπτωση αυτού του γυροτρονίου, είναι η προσομοίωση με 61 ρυθμούς και σχετικό παράγοντα σύζευξης 100%. Η σύγκριση αυτή κρίνεται αναγκαία, ώστε να ελέγξουμε την ευστάθεια των αποτελεσμάτων. Αν υπάρχει μεγάλη απόκλιση στις τιμές > 5 %, τότε δεν μπορούμε να έχουμε ασφαλή αποτελέσματα κάνοντας προσομοιώσεις με λίγους ρυθμούς σε ότι αφορά την ισχύ που λαμβάνεται στην έξοδο του γυροτρονίου.

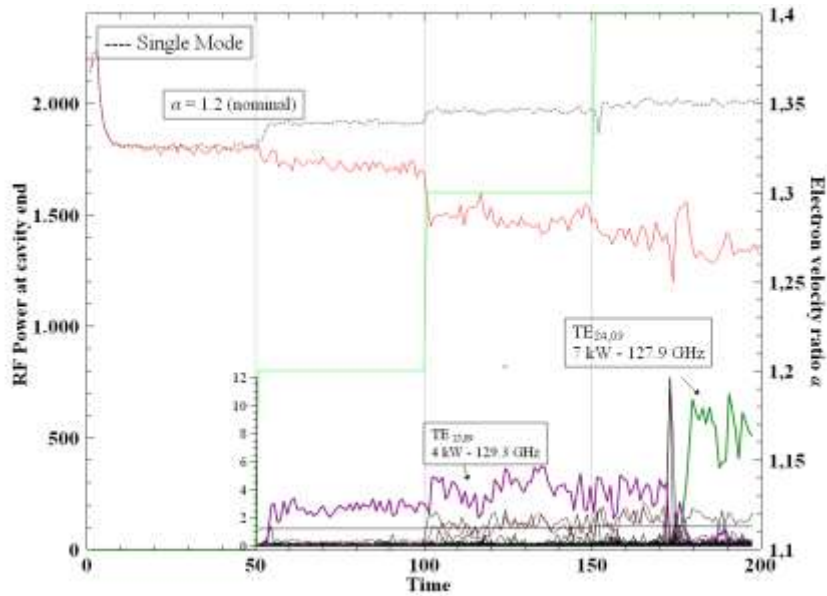
Γράφημα 1: Μεταβολή ισχύος σε ποσοστό (%) στις πολυρρυθμικές προσομοιώσεις συγκριτικά με την προσομοίωση με τους λιγότερους δυνατούς ρυθμούς (61 ρυθμοί - σχετικός συντελεστής σύζευξης 100%) για τις τρεις διαφορετικές τιμές του λόγου ταχυτήτων



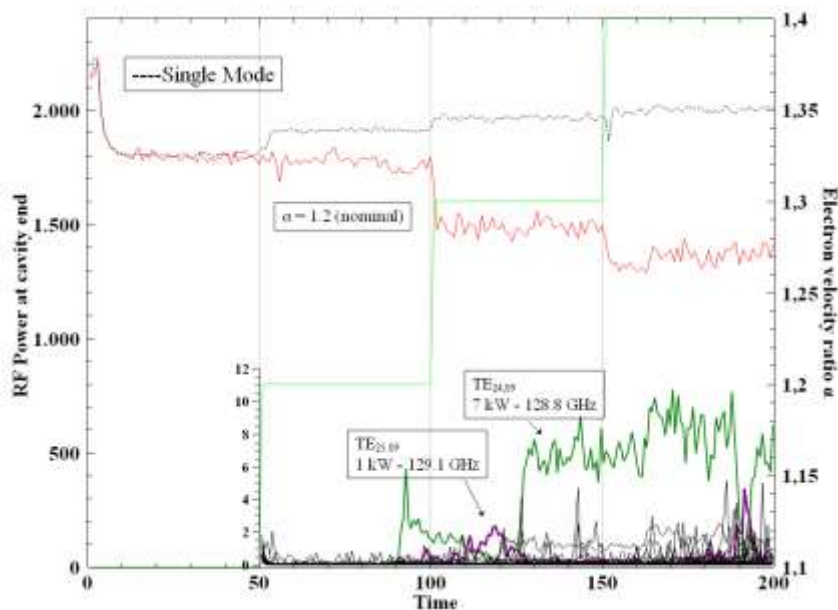
Η ισχύς του κύριου ρυθμού στην έξοδο της κοιλότητας στις διάφορες πολυρρυθμικές προσομοιώσεις παρουσιάζει αμελητέα απόκλιση (< 4 %), σε κάθε περίπτωση. Προσομοιώνοντας 62 ρυθμούς, αριθμός που δεν επιβαρύνει το πρόγραμμα, εξάγονται τα ίδια αποτελέσματα με αυτά της προσομοίωσης με 203 ρυθμούς, σε ότι αφορά την ισχύ. Επομένως, η ισχύς του ρυθμού λειτουργίας παρουσιάζει ευστάθεια στον αριθμό των ανταγωνιστών.

Είναι φρόνιμο να πούμε, ότι μέχρι στιγμής, ο κώδικας είναι αρκετά αξιόπιστος σε ότι αφορά την ισχύ. Σχετικά όμως με την ταυτότητα του επικρατέστερου ανταγωνιστή δεν μπορούμε να εξάγουμε το ίδιο συμπέρασμα. Η αξιοπιστία του κώδικα κρίθηκε από την ικανότητά του να αναδεικνύει τους επικρατέστερους ανταγωνιστές από μικρό πλήθος ανταγωνιστών αλλά και από την ευστάθεια ως προς την ισχύ που λαμβάνεται στην έξοδο.

Το Σχήμα 4.1 αποσκοπεί στην ανάδειξη των αποτελεσμάτων που λαμβάνει κανείς όταν μελετά ένα τέτοιο πρόβλημα. Η ισχύς RF στην έξοδο του γυροτρονίου εξάγεται συναρτήσει του χρόνου, συμπεριλαμβανομένων των τεσσάρων τιμών του λόγου ταχυτήτων. Συγκεκριμένα, αναδεικνύονται οι πολυρρυθμικές προσομοιώσεις με 61 και 202 ρυθμούς (χωρίς να συμπεριλαμβάνεται ο ρυθμός λειτουργίας). Στην προσομοίωση που έλαβαν μέρος 62 ρυθμοί, είναι προφανής η επικράτηση των TE_{25,09} και TE_{24,09} σε διαφορετικές τιμές του λόγου ταχυτήτων. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι στην περιοχή λειτουργίας του γυροτρονίου (α = 1.2), ο επικρατέστερος backward ρυθμός είναι ο TE_{25,09}, ενώ ο TE_{24,09} διεγείρεται όταν η τιμή του λόγου ταχυτήτων είναι α = 1.4. Η εικόνα αυτή αλλάζει αν λάβουν μέρος στην προσομοίωση 203 ρυθμοί. Μπορούμε να δούμε τον ανταγωνισμό των δύο αυτών ρυθμών, αφού όταν ο ένας χάνει ισχύ, ο άλλος κερδίζει. Επίσης, τα συμπεράσματα που έχουν εξαχθεί στην [3] και στο προηγούμενο κεφάλαιο για τα χαρακτηριστικά των backward waves, παρατηρούμε ότι επαληθεύονται και από τις πολυρρυθμικές προσομοιώσεις.



(α)



(β)

Σχήμα 4.1: Ισχύς στην έξοδο του γυροτρονίου 1.5 MW - 140 GHz συναρτήσει του χρόνου, συμπεριλαμβανομένων τεσσάρων διαφορετικών τιμών του λόγου ταχυτήτων των ηλεκτρονίων. Το σχήμα (α) έχει εξαχθεί από την προσομοίωση αλληλεπίδρασης δέσμης πεδίου με 62 ρυθμούς, συμπεριλαμβανομένου του ρυθμού λειτουργίας. Το σχήμα (β) έχει εξαχθεί από προσομοίωση με 203 ρυθμούς.

4.2 Πολυρρυθμικές προσομοιώσεις με αλλαγή αριθμητικών παραμέτρων στο γυροτρόνιο 1.5 MW - 140 GHz

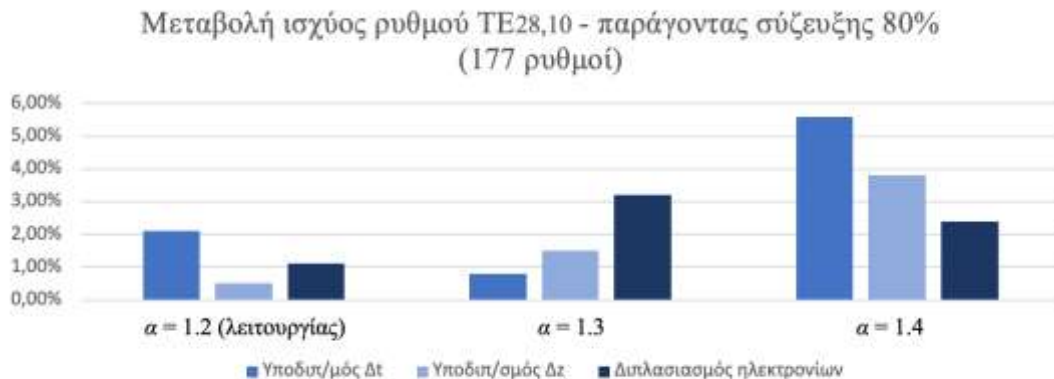
Με σκοπό την προσέγγιση του φυσικού προβλήματος σε μεγαλύτερο βαθμό, επαναλαμβάνουμε κάποιες από τις προσομοιώσεις μεταβάλλοντας τις αριθμητικές παραμέτρους. Κρίνεται απαραίτητο να ελέγξουμε την ευστάθεια των αποτελεσμάτων

ώστε να υπάρξει μια σαφής εικόνα για την εξάρτησή τους από τις αριθμητικές παραμέτρους. Επιλέχθηκαν να γίνουν έξι συνολικά προσομοιώσεις. Τρεις προσομοιώσεις στις οποίες συμμετέχουν 177 ρυθμοί (χωρίς τον ρυθμό λειτουργίας) και στις οποίες υποδιπλασιάζεται το Δz , ο αριθμός ηλεκτρονίων διπλασιάζεται και το Δt υποδιπλασιάζεται. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν τρεις προσομοιώσεις, στις οποίες συμμετέχουν 122 ρυθμοί (χωρίς το ρυθμό λειτουργίας), με μεταβαλλόμενες τις ίδιες παραμέτρους. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκεντρώθηκαν στον Πίνακα 4.2.

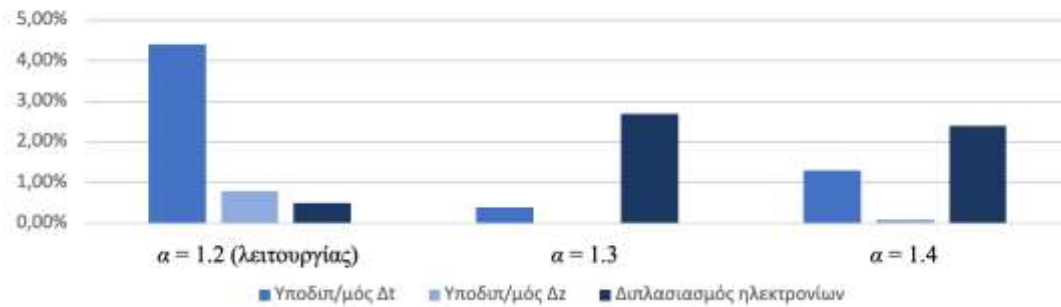
Πίνακας 4.2: Παρουσίαση διεγερμένων ανταγωνιστών επιστροφόντων ρυθμών με μεταβολή των αριθμητικών παραμέτρων σε πολυρρυθμικές προσομοιώσεις

177 modes						
	$\alpha = 1.2$		$\alpha = 1.3$		$\alpha = 1.4$	
	TE_{mp}	P_{out} (kW)	TE_{mp}	P_{out} (kW)	TE_{mp}	P_{out} (kW)
Υποδιπ/μός Δt	$TE_{24,09}$	3	$TE_{24,09}$	7	$TE_{24,09}$	8
Υποδιπλασιασμός Δz	$TE_{25,09}$	3	$TE_{25,09}$	4	$TE_{25,09}$	4
Διπλασιασμός ηλεκτρονίων	$TE_{25,09}$	3	$TE_{24,09}$	7	$TE_{24,09}$	7
122 modes						
Υποδιπ/μός Δt	$TE_{25,09}$	2	$TE_{24,09}$	7	$TE_{24,09}$	9
Υποδιπλασιασμός Δz	$TE_{25,09}$	3	$TE_{25,09}$	4	$TE_{25,09}$	4
Διπλασιασμός ηλεκτρονίων	$TE_{25,09}$	3	$TE_{24,09}$	7	$TE_{24,09}$	6

Γράφημα 2: Μέση ισχύς ρυθμού λειτουργίας στις πολυρρυθμικές προσομοιώσεις με μεταβολή των αριθμητικών παραμέτρων και σύγκριση με πολυρρυθμική με 61 ρυθμούς.



Μεταβολή ισχύος ρυθμού TE_{28,10} - παράγοντας σύζευξης 90%
(122 ρυθμοί)



Τα αποτελέσματα είναι αρκετά ενθαρρυντικά λαμβάνοντας υπόψη ότι η απόκλιση που εμφανίζουν οι τιμές ισχύος σε σχέση με αυτή των 61 ρυθμών, είναι < 5 % (με εξαίρεση την P_{out} στην προσομοίωση με 177 ρυθμούς για $\alpha = 1.4$). Επίσης, ο πίνακας ανταγωνιστών δείχνει κάτι πολύ σημαντικό. Ο TE_{25,09} διεγείρεται σίγουρα για $\alpha = 1.2$ και όταν διεγείρεται για τις άλλες τιμές του λόγου ταχυτήτων, γεγονός που φαίνεται να συμβαίνει μόνο όταν διπλασιάζουμε τους κόμβους z, η ισχύς του είναι μικρή. Αντίθετη συμπεριφορά έχει ο TE_{24,09}, ο οποίος διεγείρεται για τιμές του λόγου ταχυτήτων ≥ 1.2 και έχει πάντα υψηλή τιμή ισχύος. Επαναλαμβάνουμε ότι η αλλαγή των αριθμητικών παραμέτρων αφορά μόνο το πρόγραμμα και όχι το φυσικό πρόβλημα, επομένως συνοψίζοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.2 μπορούμε να πούμε, ότι ο κώδικας αμφιταλαντεύεται ως προς την επικράτηση ενός εκ των δύο ρυθμών (TE_{24,09} και TE_{25,09}), δείχνει όμως με σχετική βεβαιότητα, ότι είναι ένας εξ αυτών.

4.3 Πολυρρυθμικές προσομοιώσεις στο γυροτρόνιο 1 MW - 140 GHz

Η έρευνα διεξάγεται στο γυροτρόνιο ισχύος 1 MW με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Προσομοιώνεται η αλληλεπίδραση δέσμης - πεδίου με περισσότερους από δύο ρυθμούς και στη συνέχεια μεταβάλλονται οι αριθμητικές παράμετροι με σκοπό τον έλεγχο ευστάθειας αποτελεσμάτων. Ο ρυθμός λειτουργίας του γυροτρονίου είναι ο TE_{28,08} και ο επικρατέστερος επιστρέφον ρυθμός που έχει δειχθεί στην [3] είναι ο TE_{23,07}. Στον Πίνακα 4.3 φαίνονται οι επικρατέστεροι επιστρέφοντες ρυθμοί σε κάθε πολυρρυθμική προσομοίωση και η μέση ισχύς που έχουν. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζεται η ισχύς του ρυθμού λειτουργίας στις πολυρρυθμικές, ενώ συγκρίνεται με την ισχύ που υπολογίστηκε στην προσομοίωση με δύο ρυθμούς και τονίζεται με bold γράμματα (από τον Πίνακα 2.4).

Πίνακας 4.3: Επικρατέστεροι ανταγωνιστές επιστρέφοντες ρυθμοί στις πολυρρυθμικές προσομοιώσεις στο γυροτρόνιο 1 MW - 140 GHz

Παράγοντας σύζευξης	Αριθμός ρυθμών στις προσομοιώσεις	Ανταγωνιστές TE_{mp}	Μέγιστη ισχύς RF / λόγος ταχυτήτων	Συχνότητα ταλάντωσης (GHz)
	2	$TE_{23,07}$	13 kW / $\alpha = 1.5$	126.2
100%	56	$TE_{23,07}$	16 kW / $\alpha = 1.5$	126.2
90%	103	$TE_{23,07}$	15 kW / $\alpha = 1.5$	126.2
80%	136	$TE_{23,07}$	16 kW / $\alpha = 1.5$	126.2
70%	161	$TE_{23,07}$	16 kW / $\alpha = 1.5$	126.2
65%	192	$TE_{23,07}$	16 kW / $\alpha = 1.5$	126.2
60%	222	$TE_{23,07}$	16 kW / $\alpha = 1.5$	126.2

Πίνακας 4.4: Μέσες τιμές ισχύος ρυθμού λειτουργίας στις πολυρρυθμικές προσομοιώσεις στο γυροτρόνιο 1 MW - 140 GHz συμπεριλαμβανομένου τριών τιμών του λόγου ταχυτήτων α

#modes	$\alpha = 1.3$		$\alpha = 1.4$		$\alpha = 1.5$	
	$P_{out,28,10}$ (kW)	ΔP (%)	$P_{out,28,10}$ (kW)	ΔP (%)	$P_{out,28,10}$ (kW)	ΔP (%)
2 (από Πίνακα 2.4)	1312	-	1293	-	1168	-
56	1292	1.6	1263	2.3	1131	3.2
103	1293	1.4	1264	2.2	1127	3.5
136	1301	0.8	1265	2.1	1129	3.4
161	1297	1.1	1262	2.4	1122	3.9
192	1300	1.6	1262	2.3	1125	3.6
222	1292	1.5	1262	2.3	1125	3.6

Στο γυροτρόνιο 1 MW - 140 GHz, ο κώδικας επιδεικνύει μεγάλη ευστάθεια και ως προς τον επικρατέστερο επιστρέφοντα ρυθμό, αλλά και ως προς την ισχύ του ρυθμού λειτουργίας $TE_{28,08}$. Από τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούμε να πούμε με σιγουριά ότι η ταυτότητα του επιστρέφοντα $TE_{23,07}$ δεν έχει καμία εξάρτηση από το πλήθος των ανταγωνιστών που εισάγουμε στην προσομοίωση.

4.4 Πολυρρυθμικές προσομοιώσεις με αλλαγή αριθμητικών παραμέτρων στο γυροτρόνιο 1 MW - 140 GHz

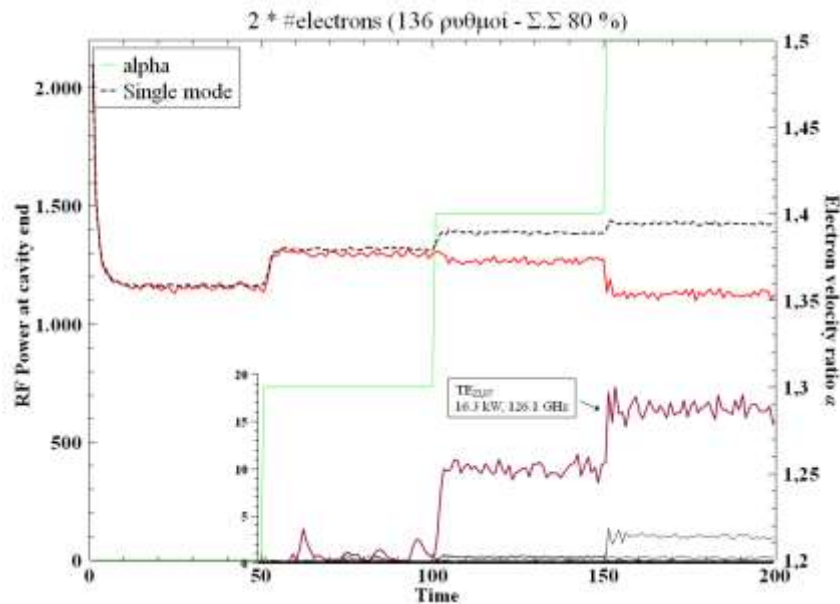
Η ολοκλήρωση της μελέτης στο γυροτρόνιο 1 MW - 140 GHz πραγματοποιείται με την αλλαγή των αριθμητικών παραμέτρων. Στον Πίνακα 4.5 συνοψίζονται τα αποτελέσματα από επιλεγμένες πολυρρυθμικές προσομοιώσεις στις οποίες μεταβάλλονται οι αριθμητικές παράμετροι. Η μεγάλη σύγκλιση μεταξύ των προσομοιώσεων είναι προφανής και για το λόγο αυτό δεν χρειάζεται να φτιαχτεί πίνακας για τον ανταγωνιστή επιστρέφον ρυθμό $TE_{23,07}$, καθώς εμφανίζει αμελητέα διαφορά με τη μεταβολή των αριθμητικών παραμέτρων. Παρουσιάζεται ωστόσο, στο Σχήμα 4.2 η εικόνα της μεταβολής της ισχύος των ρυθμών συναρτήσει του χρόνου σε τέσσερις

διαφορετικές πολυρρυθμικές προσομοιώσεις, ώστε να καλυφθεί πλήρως η ανωτέρω μελέτη.

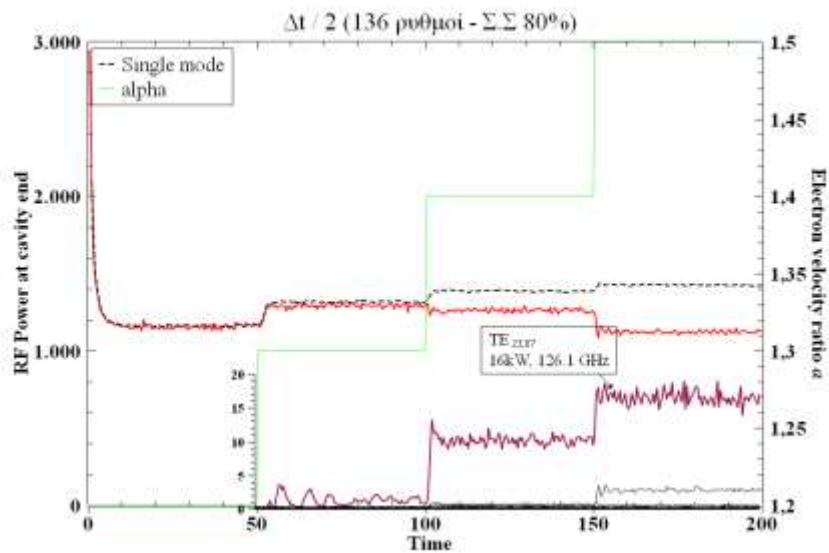
Πίνακας 4.5: Μέση ισχύς ρυθμού λειτουργίας στις πολυρρυθμικές προσομοιώσεις με μεταβολή των αριθμητικών παραμέτρων στο γυροτρόνιο 1 MW - 140 GHz

136 modes						
	$\alpha = 1.3$		$\alpha = 1.4$		$\alpha = 1.5$	
	$P_{out,28,08}$ (kW)	Μεταβολή ισχύος (%) (σύγκριση με 2 ρυθμούς)	$P_{out,28,08}$ (kW)	Μεταβολή ισχύος (%) (σύγκριση με 2 ρυθμούς)	$P_{out,28,08}$ (kW)	Μεταβολή ισχύος (%) (σύγκριση με 2 ρυθμούς)
Υποδιπ/μός Δt	1292	1.5	1261	2.4	1122	3.9
Υποδιπ/μός Δz	1295	1.2	1267	2	1127	3.5
Διπλασιασμός ηλεκτρονίων	1300	0.9	1320	2	1126	3.5
161 modes						
Υποδιπ/μός Δt	1294	1.3	1262	2.3	1122	3.9
Υποδιπ/μός Δz	1300	0.9	1320	2	1125	3.6

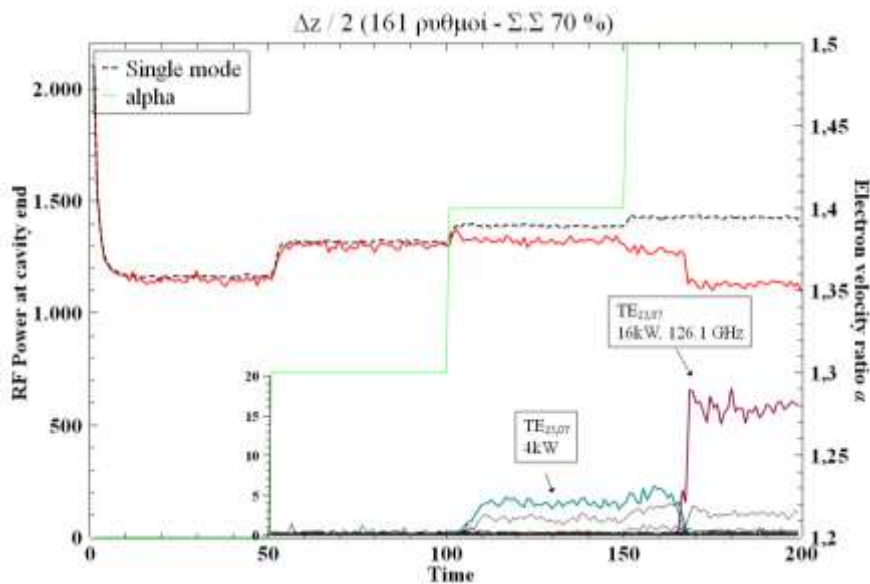
Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται η παρόμοια συμπεριφορά του $TE_{23,07}$ σε όλες τις μεταβολές με εξαίρεση στη μεταβολή των κόμβων στον άξονα z , που παρατηρείται μηδενική ισχύς για $\alpha = 1.4$, όμως για $\alpha = 1.5$ η εικόνα ισχύος του είναι ίδια με των υπολοίπων προσομοιώσεων. Η διαφοροποίηση αυτή δεν είναι ανησυχητική, διότι δεν επηρεάζει την ισχύ του ρυθμού λειτουργίας.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 4.2: Μέση τιμή ισχύος συναρτήσει του χρόνου σε διαφορετικές τιμές του λόγου ταχυτήτων (α) με διπλασιασμό του αριθμού ηλεκτρονίων και 136 ρυθμούς, (β) με υποδιπλασιασμό του χρονικού βήματος Δt και 161 ρυθμούς και (γ) με υποδιπλασιασμό των κόμβων στον άξονα z και 161 ρυθμούς.

4.5 Συμπεράσματα

Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο, ολοκληρώνεται η περαιτέρω έρευνα εξάρτησης των επιστρεφόντων ρυθμών από αριθμητικές παραμέτρους. Οι προσομοιώσεις στα δύο γυροτρόνια έδειξαν ότι ο κώδικας είναι αρκετά συνεπής στα αποτελέσματα και μια αξιόπιστη μελέτη σε επιστρεφόντα κύματα μπορεί να πραγματοποιηθεί με μικρό αριθμό ρυθμών.

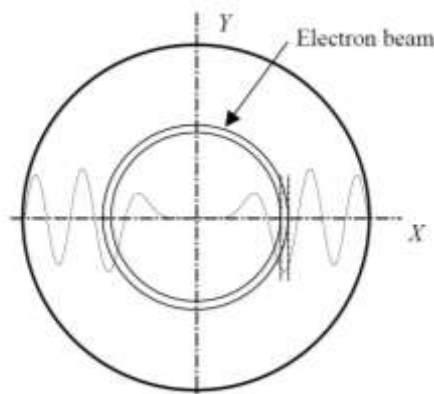
Στο γυροτρόνιο ισχύος 1 MW παρατηρήθηκε ανεξαρτησία τόσο της ταυτότητας του επικρατέστερου επιστρέφοντα ρυθμού όσο και της ισχύος του ρυθμού λειτουργίας από τον αριθμό των ανταγωνιστών και δείχθηκε ότι με 223 ρυθμούς, τα αποτελέσματα είναι ίδια (με απόκλιση $< 4\%$) με αυτά που εξάγονται στην προσομοίωση με 56 ρυθμούς.

Στο γυροτρόνιο 1.5 MW, παρόμοια υπάρχει μια συνεπής εικόνα της ισχύος του ρυθμού λειτουργίας. Η αβεβαιότητα γύρω από την ταυτότητα του ρυθμού που επικρατεί για $a = 1.2$ δεν είναι τόσο σημαντική καθώς ήδη από 62 ρυθμούς, ο κώδικας επιδεικνύει ποιοι από αυτούς θα διεγερθούν. Θα ήταν μια πολύ ενδιαφέρουσα μελλοντική διερεύνηση η προσομοίωση με τους ρυθμούς TE_{25,09} και TE_{24,09} και με τον ρυθμό λειτουργίας, ώστε να υπάρξει μια σύγκριση όμοια με αυτή που γίνεται στο γυροτρόνιο 1 MW.

5 Πολυρρυθμικές προσομοιώσεις και μεταβολή φυσικών παραμέτρων

Μία φυσική παράμετρος που είναι καθοριστική για την αποδοτική αλληλεπίδραση δέσμης - πεδίου είναι η ακτίνα δέσμης των ηλεκτρονίων. Συζητήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ο παράγοντας σύζευξης του ρυθμού λειτουργίας που πρέπει να μεγιστοποιείται για να υπάρξει βέλτιστη “σύζευξη” με τη δέσμη και εξετάσαμε για ποιους άλλους ρυθμούς ικανοποιείται αυτή η συνθήκη. Η μεγιστοποίηση αυτή γίνεται από την ακτίνα της ηλεκτρονικής δέσμης R_{gc} . Ένα ηλεκτρόνιο που εκτελεί κυκλοτρονική περιστροφή με κέντρο σε απόσταση R_{gc} από τον άξονα συμμετρίας της κοιλότητας, η οποία μεγιστοποιεί τον παράγοντα σύζευξης, συνεργάζεται αποδοτικά με το πεδίο. Ιδανικά, όλα τα ηλεκτρόνια της δέσμης θα έπρεπε να έχουν το κέντρο της κυκλοτρονικής τους περιστροφής στην ίδια ακτίνα. Εξαιτίας των διασπορών, αυτό δεν είναι εφικτό. Μία κατάλληλα τοποθετημένη ηλεκτρονική δέσμη στην κοιλότητα του γυροτρονίου φαίνεται στο Σχήμα 5.1 [2]. Η ακτίνα της δέσμης πρέπει περίπου να συμπίπτει με την ακτίνα του πρώτου μεγίστου του ρυθμού. Η απόσταση του πρώτου μεγίστου του ρυθμού ορίζεται καυστική ακτίνα.

Μεταβάλλοντας την ακτίνα δέσμης, είναι αναμενόμενο, ότι η συνεργασία δέσμης - πεδίου δεν θα είναι τόσο καλή, όσο είναι με την ονομαστική ακτίνα του γυροτρονίου. Με τη μεταβολή αυτής της φυσικής παραμέτρου, στοχεύεται η διερεύνηση της επίδρασής της στην επίδοση του γυροτρονίου αλλά στους επιστρέφοντες ρυθμούς. Επίσης, είναι αναμενόμενο ότι, αν αλλάξει η ακτίνα δέσμης, θα βρεθούν άλλοι ρυθμοί ανταγωνιστές που να έχουν την ακτίνα του πρώτου τους μεγίστου περίπου στην ακτίνα της δέσμης και συνεπώς, θα επικρατούν έναντι των μέχρι τώρα επικρατέστερων ανταγωνιστών.



Σχήμα 5.1 (σχήμα 1.9 του [2]): Κατάλληλα τοποθετημένη ακτίνα ηλεκτρονικής δέσμης σχετικά με την ακτίνα πρώτου μεγίστου.

5.1 Μεταβολή φυσικών παραμέτρων στο γυροτρόνιο 1.5 MW - 140 GHz

Η ονομαστική ακτίνα δέσμης στο γυροτρόνιο ισχύος 1.5 MW έχει ορισθεί στα 10.1 mm. Ο ρυθμός $TE_{28,10}$ έχει ιδιοτιμή $\chi_{28,10} = 67.1$ και η καυστική του ακτίνα

υπολογίζεται στα 9.5 mm με θεωρητική ιδανική ακτίνα δέσμης στα 10.0 mm, όμως για άλλους λόγους έχει καθοριστεί στον κώδικα και στο πείραμα στα 10.1 mm. Οι ρυθμοί TE_{25,09} και TE_{24,09} έχουν καυστική ακτίνα 8.5 mm και 8.1 mm, αντίστοιχα με ιδανικές ακτίνες ηλεκτρονικής δέσμης στα 8.9 mm και 8.6 mm. Μεταβάλλουμε την ακτίνα δέσμης από τα 9.9 mm, έως και τα 10.3 mm με βήμα 0.1 mm και προσομοιώνουμε την αλληλεπίδραση δέσμης - πεδίου με συμμετοχή ρυθμών που έχουν ελάχιστο σχετικό παράγοντα σύζευξης 100% και 75%. Τα αποτελέσματα για τους ανταγωνιστές επιστρέφοντες ρυθμούς που επικράτησαν συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1. Επίσης, στο Γράφημα 3 έχει καταγραφεί το ποσοστό αύξησης ή μείωσης της ισχύος του ρυθμού λειτουργίας στις διάφορες ακτίνες δέσμης σε σύγκριση με την ισχύ που υπολογίζεται στην ονομαστική ακτίνα δέσμης.

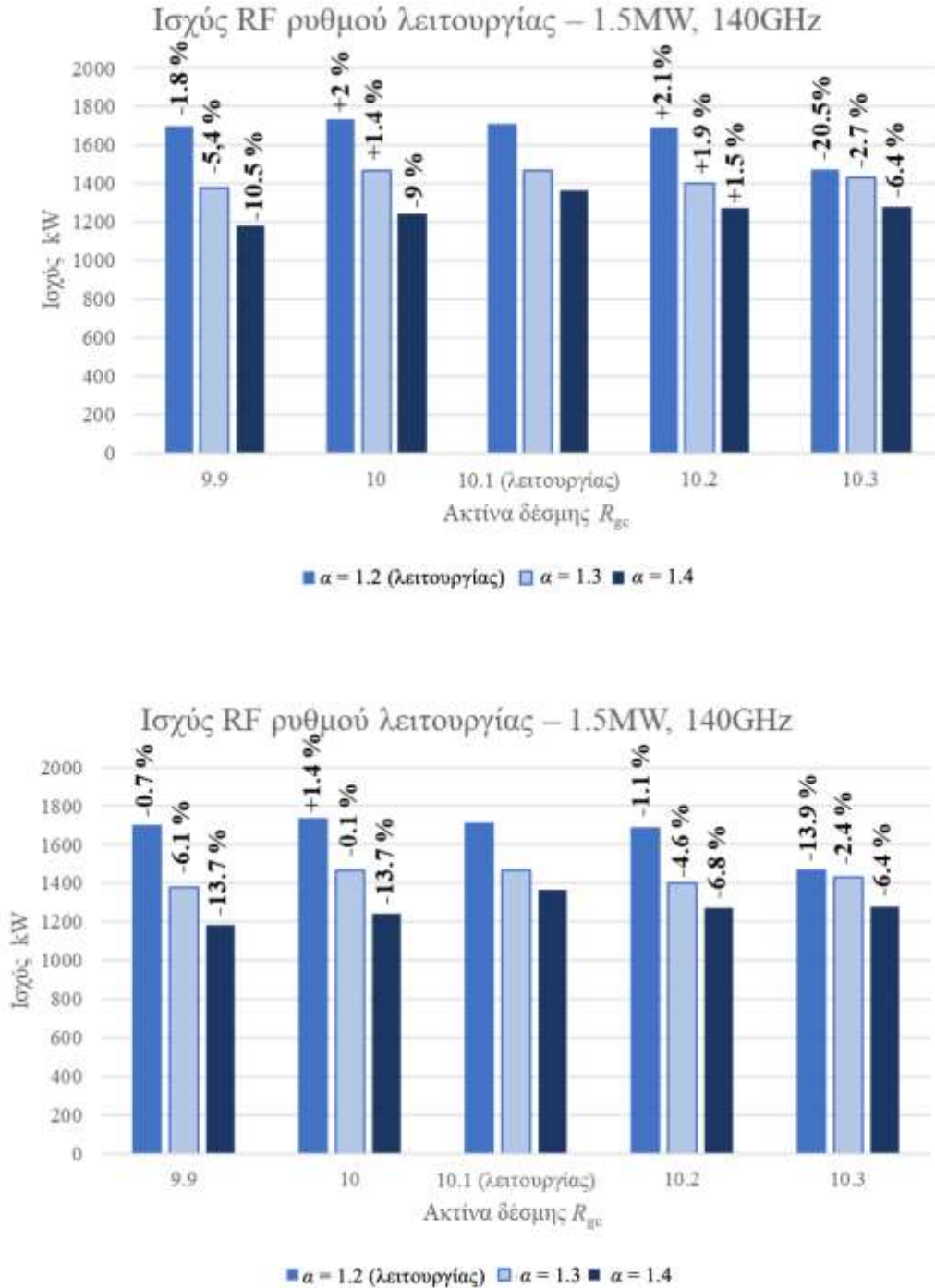
Πίνακας 5.1: Επικρατέστεροι επιστρέφοντες ρυθμοί και η μέση τιμή ισχύος τους για πέντε διαφορετικές ακτίνες δέσμης, συμπεριλαμβανομένων διαφορετικών τιμών του λόγου ταχυτήτων των ηλεκτρονίων α .

R_{gc} (mm)	#ρυθμών / ccpl(%)	$\alpha = 1.2$ (λειτουργίας)			$\alpha = 1.3$			$\alpha = 1.4$		
		m, p	R_c (mm)	P (kW)	m, p	R_c (mm)	P (kW)	m, p	R_c (mm)	P (kW)
9.9	70 / 100	24,09	8.2	3	24,09	8.2	5	23,09	7.8	12
	187 / 75	23,09	7.8	5	23,09	7.8		23,09	7.8	10
10.0	66 / 100	24,09	8.2	3	24,09	8.2	5	23,09	7.8	12
	203 / 75	24,09	8.2	3	24,09	8.2	4	23,09	7.8	13
10.1 (ονομαστική)	61 / 100	25,09	8.5	3	25,09	8.5	4	24,09	8.2	7
	202 / 70	24,09	8.2	1	24,09	8.2	7	24,09	8.2	6
10.2	83 / 100	25,09	8.5	3	25,09	8.5	3	25,09	8.5	4
	221 / 75	26,09	8.8	4	26,09	8.8	6	26,09	8.8	5
10.3	115 / 100	27,10	9.1	255	27,10	9.1	256	27,10	9.1	224
	228 / 85	-27,10	9.1	43	-	-	-	-	-	-

Οι ρυθμοί που διεγείρονται έχουν κοντινή καυστική ακτίνα, μικρότερη από αυτή του ρυθμού λειτουργίας και παρατηρούμε ότι πράγματι στις διάφορες ακτίνες δέσμης, υπάρχει μια ποικιλία ρυθμών. Είναι αναμενόμενο η αλλαγή φυσικών μεγεθών να επηρεάζει τη συμπεριφορά των επιστρεφόντων ρυθμών. Στον παραπάνω πίνακα τα δύο φυσικά μεγέθη που αλλάζουν είναι ο λόγος ταχυτήτων και η ακτίνα δέσμης, ενώ η αριθμητική παράμετρος είναι ο παράγοντας σύζευξης. Για ακτίνα δέσμης στα 10.3 mm παρατηρούμε την τεράστια ισχύ του TE_{27,10}, ενώ οι ανταγωνιστές με τη μικρότερη ισχύ βρίσκονται στις ακτίνες δέσμης 10.1 mm (ονομαστική) και 10.0 mm για $\alpha = 1.2$.

Ένα ολοκληρωμένο συμπέρασμα θα μπορούσε να δοθεί ερμηνεύοντας και το γράφημα. Στην τιμή λειτουργίας του λόγου ταχυτήτων, παρατηρούμε ότι ο κώδικας συμφωνεί σε αύξηση της μέσης τιμής της ισχύος $\sim 1.8\%$, αν η ακτίνα δέσμης ορισθεί στα 10.0 mm. Σε κάθε άλλη περίπτωση η ισχύς μειώνεται με την αλλαγή της ακτίνας δέσμης (μπορεί να υπάρχει αύξηση στον παράγοντα σύζευξης 100%, όμως πιο ρεαλιστική εικόνα δίνει ο παράγοντας 75%) και η μεγαλύτερη μείωση ορίζεται στα 10.3 mm $\sim 15\%$.

Γράφημα 3: Ποσοστό μεταβολής της μέσης τιμής ισχύος του ρυθμού λειτουργίας στην έξοδο της κοιλότητας για το γυροτρόνιο 1.5MW - 140 GHz για διαφορετικές ακτίνες της ηλεκτρονικής δέσμης, συμπεριλαμβανομένων διαφορετικών τιμών του λόγου ταχυτήτων α



5.2 Μεταβολή φυσικών παραμέτρων στο γυροτρόνιο 1 MW - 140 GHz

Στο γυροτρόνιο ισχύος 1 MW και συχνότητας 140 GHz, ο ρυθμός λειτουργίας $TE_{28,08}$, έχει ιδιοτιμή $\chi_{28,08} = 60.1$ mm και καυστική ακτίνα $R_c = 9.5$ mm. Ο

επικρατέστερος ανταγωνιστής TE_{23,07} έχει ιδιοτιμή $\chi_{23,07} = 50.4$ mm και καυστική ακτίνα $R_c = 7.8$ mm. Ομοίως με το προηγούμενο γυροτρόνιο, η ακτίνα δέσμης για την βέλτιστη συνεργασία του ρυθμού λειτουργίας με τα ηλεκτρόνια, είναι τα 10.1 mm. Γίνεται μια παρόμοια έρευνα με αυτή που παρουσιάστηκε παραπάνω. Στο Σχήμα 5.2, φαίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για διάφορες ακτίνες δέσμης και στον Πίνακα 5.2, καταγράφονται οι τιμές ισχύος του ρυθμού λειτουργίας. Οι τιμές μέσης τιμής ισχύος συγκρίνονται κάθε φορά με τις αντίστοιχες (bold) του Πίνακα 3.2. Ο Πίνακας 3.2 αποτελεί μέτρο σύγκρισης σε κάθε κεφάλαιο, γιατί αποδείχθηκε η αξιοπιστία του, παρά το γεγονός ότι στην προσομοίωση λαμβάνει μέρος μόνο ο TE_{23,08} με τον TE_{23,07} (backward wave).

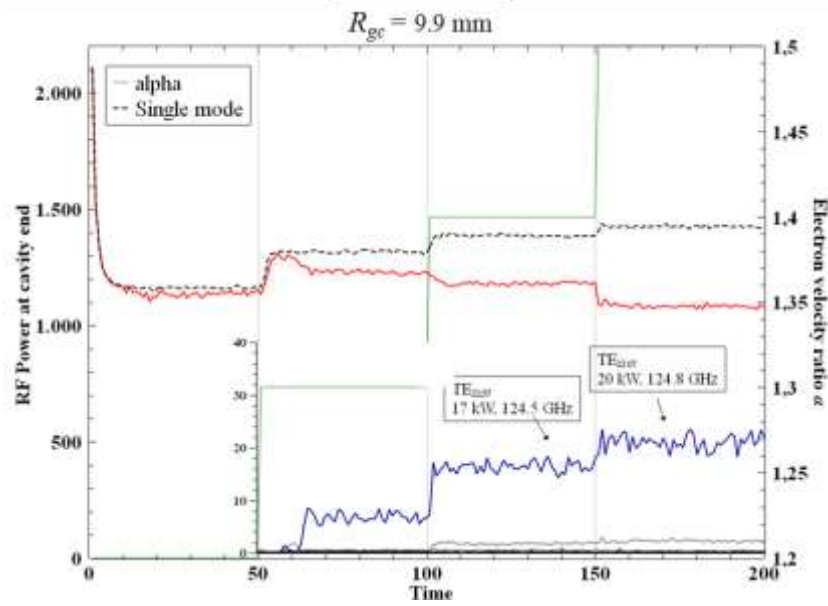
Τα συμπεράσματα από τις προσομοιώσεις αλληλεπίδρασης σε αυτό το γυροτρόνιο δεν διαφέρουν και πολύ από αυτά που διαμορφώθηκαν στο γυροτρόνιο 1.5 MW. Ο επιστρέφοντας ρυθμός TE_{23,07} διεγείρεται και για ακτίνα δέσμης 10.0 mm (λειτουργίας) αλλά και για 10.1 mm, όμως και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει μονορρυθμική λειτουργία στην τιμή $\alpha = 1.3$ (λειτουργίας). Συγκεκριμένα, παρατηρώντας αθροιστικά το Σχήμα 5.2 και τον Πίνακα 5.2, φαίνεται ότι για κάθε άλλη τιμή της ακτίνας δέσμης η ισχύς του ρυθμού λειτουργίας μειώνεται. Υπάρχει μια εξαίρεση σε αυτή την διατύπωση. Παρατηρούμε ότι για ακτίνα δέσμης 10.2 mm, στην τιμή λειτουργίας του λόγου ταχυτήτων η ισχύς του ρυθμού λειτουργίας μειώνεται 99.3 %, όμως αξιοσημείωτη είναι η αύξησή του για $\alpha = 1.5$, όπου προσεγγίζει αρκετά την περίπτωση της μονορρυθμικής λειτουργίας. Στην προσομοίωση με παράγοντα σύζευξης 100% δεν βλέπουμε να συμβαίνει το ίδιο, αυτό όμως οφείλεται στο ότι ο TE_{27,09} (επιστρέφων ρυθμός) δεν συμπεριλαμβάνεται στη λίστα ανταγωνιστών με παράγοντα σύζευξης ίδιο με αυτό του ρυθμού λειτουργίας.

Πίνακας 5.2: Μέση τιμή ισχύος του ρυθμού λειτουργίας στην έξοδο της κοιλότητας για το γυροτρόνιο 1 MW - 140 GHz για διαφορετικές ακτίνες της ηλεκτρονικής δέσμης, συμπεριλαμβανομένου διαφορετικές τιμές του λόγου ταχυτήτων α

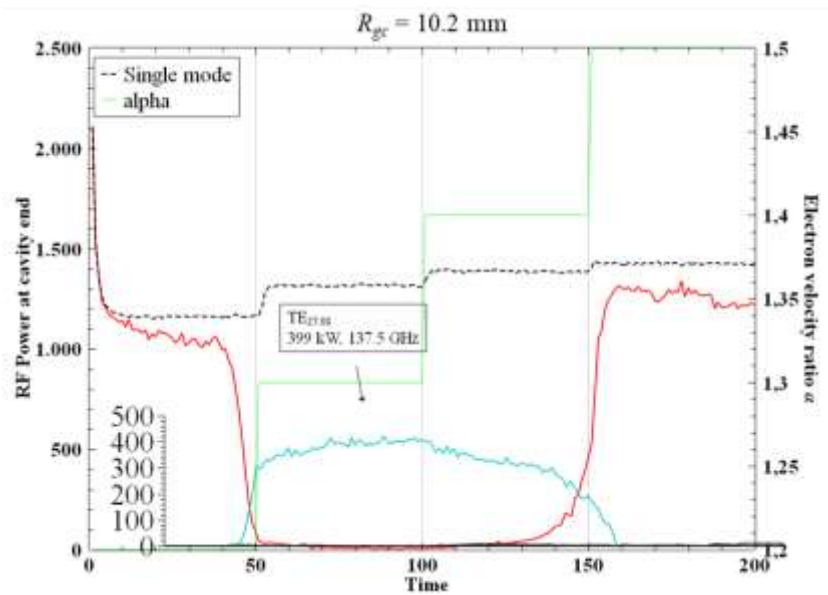
Παράγοντας σύζευξης 60 %						
	$\alpha = 1.3$ (λειτουργίας)		$\alpha = 1.4$		$\alpha = 1.5$	
R_{gc} (mm)	P (kW)	%	P (kW)	%	P (kW)	%
9.9	1228	6.4 ↓	1182	8.5 ↓	1082	10.5 ↓
10.0	1294	1.3 ↓	1252	3.1 ↓	1121	9.0 ↓
10.1	1312	-	1293	-	1168	-
10.2	8	99.3 ↓	113	91 ↓	1252	6.7 ↑
Παράγοντας σύζευξης 100 %						
9.9	1228	6.4 ↓	1177	8.9 ↓	1083	7.2 ↓
10.0	1259	4.0 ↓	1200	7.1 ↓	1078	7.7 ↓
10.1	1312	-	1293	-	1168	-
10.2	1259	4.0 ↓	1201	7.1 ↓	1078	7.7 ↓

Σε ότι αφορά τις παρατηρήσεις σχετικά με τη συμπεριφορά των επιστρεφόντων ρυθμών είναι προφανής η εξάρτηση της συχνότητάς τους από την τιμή του λόγου ταχυτήτων, όμως δεν παρατηρείται κάποια εξάρτηση αυτής από την ακτίνα της δέσμης.

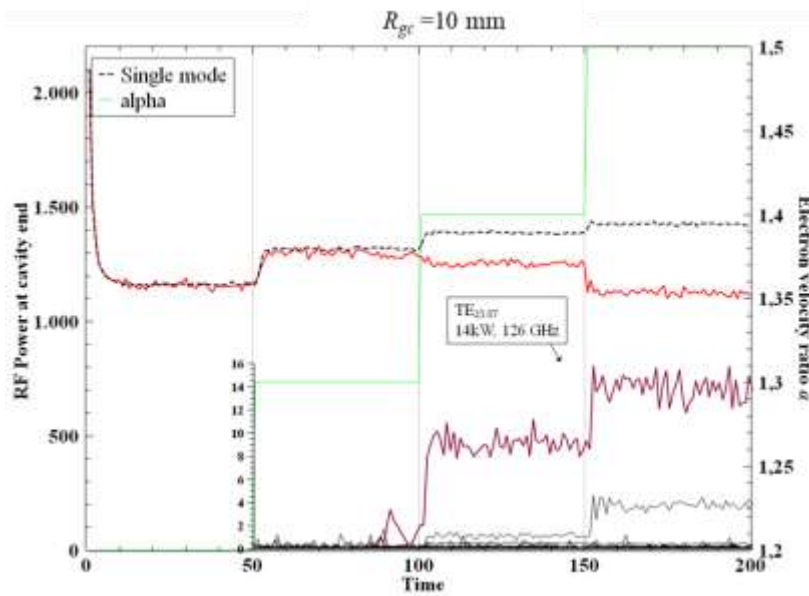
Τέλος, η αναμενόμενη διέγερση διαφορετικών ρυθμών όταν αλλάζει η ακτίνα δέσμης, είναι ξεκάθαρη.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 5.2: Διαγράμματα ισχύος συναρτήσει του χρόνου συμπεριλαμβανομένων τεσσάρων τιμών του λόγου ταχυτήτων για διαφορετικές ακτίνες δέσμης από πολυρρυθμικές προσομοιώσεις.

5.3 Συμπεράσματα

Με τα φυσικά αυτά συμπεράσματα κλείνει ένας κύκλος προσομοιώσεων που αφορά την έρευνα εξάρτησης της συμπεριφοράς των backward waves από αριθμητικές και φυσικές παραμέτρους. Συνοψίζοντας, δεν παρατηρήθηκε κάποια εξάρτηση από αριθμητικές παραμέτρους και οι προσομοιώσεις με μικρό αριθμό ανταγωνιστών (< 62 στο γυροτρόνιο ισχύος 1.5 MW και 2 στο γυροτρόνιο 1 MW) μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα τόσο για τους επιστρέφοντες ρυθμούς, όσο και για τον ρυθμό λειτουργίας. Η εξάρτηση από φυσικές παραμέτρους, όπως η ταχύτητα των ηλεκτρονίων στη δέσμη και η θέση τους από το κέντρο περιστροφής, παρατηρήθηκε σε όλες τις προσομοιώσεις. Η συχνότητα των επιστρεφόντων ρυθμών δείχνει εξάρτηση από την τιμή του λόγου ταχυτήτων αλλά όχι από την ακτίνα δέσμης, ενώ η διέγερσή τους εξαρτάται και από τον λόγο ταχυτήτων (αυξάνεται με την αύξηση του α) αλλά και από την ακτίνα δέσμης.

6 Παράγοντας σύζευξης και συνθήκη συντονισμού επιστρεφόντων κυμάτων

Ο παράγοντας σύζευξης και η συνθήκη συντονισμού είναι καθοριστικές παράμετροι για την καλή συνεργασία δέσμης – πεδίου. Η ακτίνα δέσμης, όπως συζητήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, επιλέγεται για να μεγιστοποιεί τον παράγοντα σύζευξης του ρυθμού λειτουργίας, ενώ η γεωμετρία του κυματοδηγού, η ενέργεια της δέσμης και το μαγνητοστατικό πεδίο σχετίζονται με την ικανοποίηση της συνθήκης συντονισμού. Με τη μελέτη που έγινε στα προηγούμενα κεφάλαια στα δύο γυροτρόνια, αποδείχθηκε ότι διεγείρονται συγκεκριμένοι επιστρέφοντες ρυθμοί, γεγονός που διευκολύνει την περαιτέρω μελέτη αυτών. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η διερεύνηση της αιτίας διέγερσης αυτών των backward waves, εξετάζοντας τους καθοριστικούς παράγοντες αλληλεπίδρασης αυτών με τη δέσμη, δηλαδή εξετάζοντας τη συνθήκη συντονισμού και τον παράγοντα σύζευξης κάθε ρυθμού.

Συγκεκριμένα, οι ρυθμοί που θα μας απασχολήσουν σε αυτό το κεφάλαιο είναι οι $TE_{24,09}$, $TE_{25,09}$ για το γυροτρόνιο 1.5 MW και ο $TE_{23,07}$ για το γυροτρόνιο 1 MW. Επιδιώκουμε να μελετήσουμε τη συνθήκη συντονισμού και τον παράγοντα σύζευξης κατά μήκος του άξονα z της κοιλότητας, προκειμένου να ερευνηθεί η συμπεριφορά τους στην περιοχή midsection της κοιλότητας. Ο κώδικας EURIDICE έχει αρχείο εξόδου στο οποίο δίνεται ο παράγοντας σύζευξης συναρτήσει του z . Η συνθήκη συντονισμού παράγεται για κάθε ρυθμό συναρτήσει z , συνδυάζοντας αρχεία εξόδου του κώδικα και απλές αλγεβρικές πράξεις.

6.1 Συνθήκη συντονισμού

Τα γυροτρόνια είναι διατάξεις που χρησιμοποιούν ελαφρώς σχετικιστική ηλεκτρονική δέσμη ($E < 100$ keV, $\gamma < 1.2$) με υψηλή εγκάρσια ορμή (λόγος ταχυτήτων $a = v_{\perp} / v_{\parallel} > 1$) [10]. Ο κυματάριθμος του πεδίου στην κοιλότητα είναι κάθετος στη διεύθυνση του εξωτερικά μόνιμου επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου ($k_{\perp} \gg k_{\parallel}$, δηλαδή $k_{\parallel}c \ll \omega$) με αποτέλεσμα η συχνότητα λειτουργίας του ρυθμού να είναι κοντά στην κυκλοτρονική συχνότητα (1.10). Το ηλεκτροδυναμικό σύστημα στο γυροτρόνιο είναι μια ανοιχτή κοιλότητα σχεδιασμένη με τρόπο που να διευκολύνει τη διέγερση κύματος κοντά στην αποκοπή ($k_{\parallel}c \ll \omega$). Η λειτουργία με κύμα κοντά στην αποκοπή κάνει τη μετατόπιση Doppler $k_{\parallel}v_{\parallel}$ αμελητέα για τον ρυθμό λειτουργίας και η διαφορά $\omega - \omega_{cycl}$ είναι μικρή αλλά θετική, ώστε να επιτευχθεί η σωστή ομαδοποίηση των ηλεκτρονίων [Κεφ. 1 του [2]]. Οι ανταγωνιστές επιστρέφοντες ρυθμοί φαίνεται να έχουν υπολογίσιμη μετατόπιση Doppler και μάλιστα αρνητική.

Με σκοπό να μελετηθούν και να επιβεβαιωθούν τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά, υπολογίζεται η μετατόπιση Doppler του ρυθμού λειτουργίας και των επικρατέστερων ανταγωνιστών επιστρεφόντων ρυθμών κατά μήκος της κοιλότητας του γυροτρονίου.

Ο κυματάρριθμος $k_{||}$ υπολογίζεται από την (1.11) ως συνάρτηση του z . Επίσης, θεωρώντας ότι το μαγνητικό πεδίο είναι ήπια μεταβαλλόμενο κατά μήκος της κοιλότητας, η αξονική και η εγκάρσια ορμή των ηλεκτρονίων δίνονται από τις σχέσεις

$$|p_{\perp}| \cong \sqrt{\frac{B_z}{B_{z0}}} |p_{\perp 0}| \quad (6.1)$$

$$\left(\frac{p_z}{p_{z0}}\right)^2 = 1 + \left(\frac{|p_{\perp 0}|}{p_{z0}}\right)^2 \left(1 - \frac{B_z}{B_{z0}}\right) \quad (6.2)$$

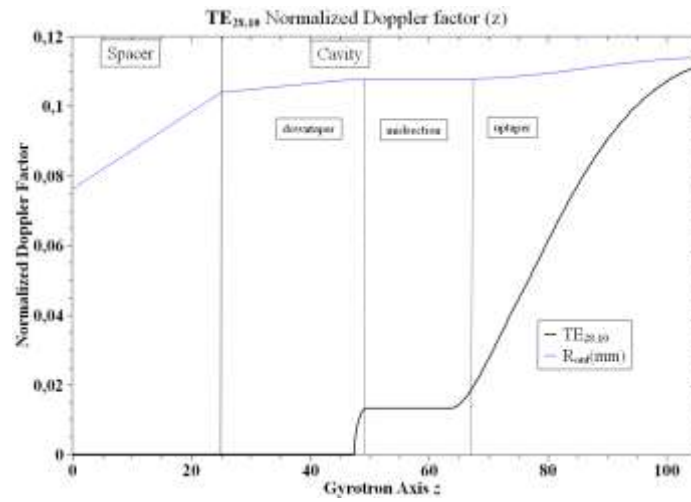
όπου οι ποσότητες B_{z0} , p_{z0} και $p_{\perp 0}$, αφορούν την τιμή που παίρνουν οι ποσότητες σε ένα σημείο της κοιλότητας, όπου για ευκολία ορίζεται στο μέσο αυτής και στο οποίο γίνεται μέγιστο το μαγνητικό πεδίο. Η αξονική ταχύτητα των ηλεκτρονίων υπολογίζεται

$$v_{||}(z) = \pm c \sqrt{\frac{1 - \frac{1}{\gamma^2}}{1 + a(z)^2}} \quad (6.3)$$

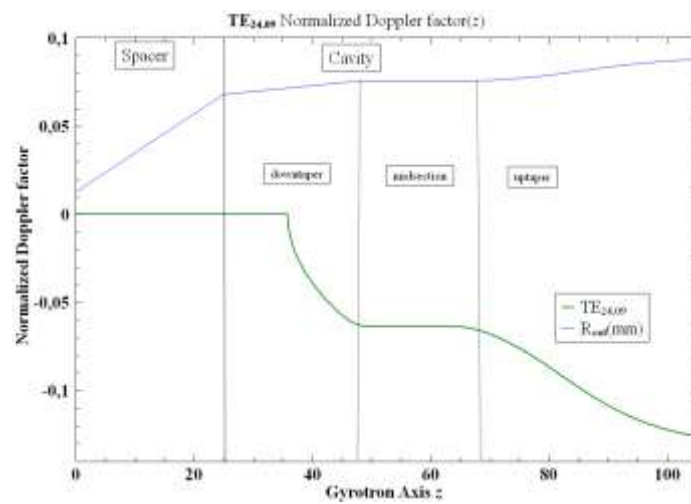
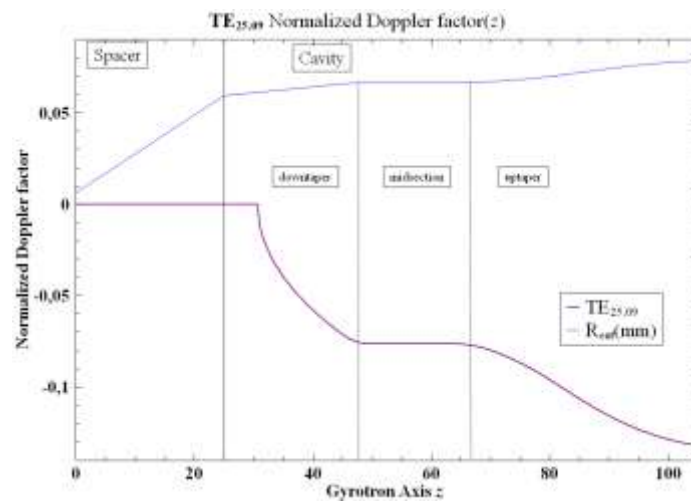
όπου το (+) αφορά ηλεκτρόνια που οδεύουν προς την έξοδο του γυροτρονίου και το (-) προς την αντίθετη πλευρά. Βεβαίως, ηλεκτρόνια με αρνητική αξονική ταχύτητα δεν υπάρχουν στο μοντέλο αλληλεπίδρασης που χρησιμοποιούμε, και επομένως η λύση αυτή απορρίπτεται. Ο λόγος ταχυτήτων $a(z)$ έχει υπολογιστεί από τις (6.1) - (6.2) και δίνεται από τη σχέση

$$a(z) = \frac{\alpha_0 \sqrt{\frac{B_z}{B_{z0}}}}{\sqrt{1 + \alpha_0 \left(1 - \frac{B_z}{B_{z0}}\right)}}, \text{ με } \alpha_0 = 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 \text{ και } 1.5 \quad (6.4)$$

Συνεπώς ο παράγοντας Doppler ενός ρυθμού, μπορεί να μελετηθεί κατά μήκος της κοιλότητας του κάθε γυροτρονίου. Στο Σχήμα 6.1 αναπαρίσταται η μετατόπιση Doppler κανονικοποιημένη ως προς τη συχνότητα του ρυθμού κατά μήκος του z του ρυθμού λειτουργίας και των επικρατέστερων από τις πολυρρυθμικές προσομοιώσεις ρυθμών στην κοιλότητα του γυροτρονίου 1.5 MW. Το Σχήμα 6.2 αφορά το γυροτρόνιο 1.0 MW.

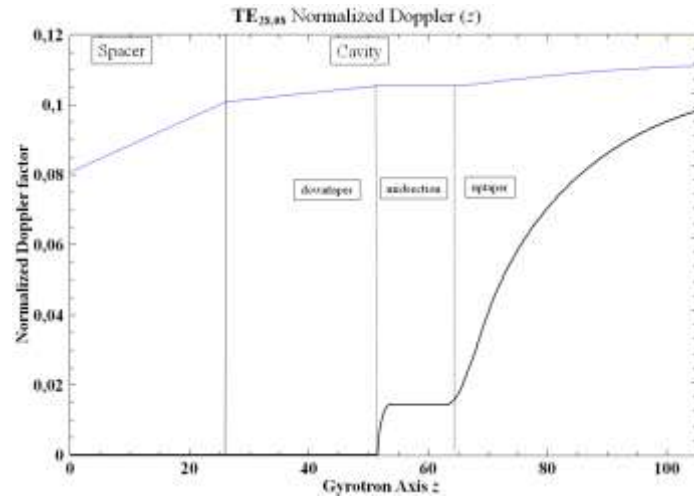


(α)

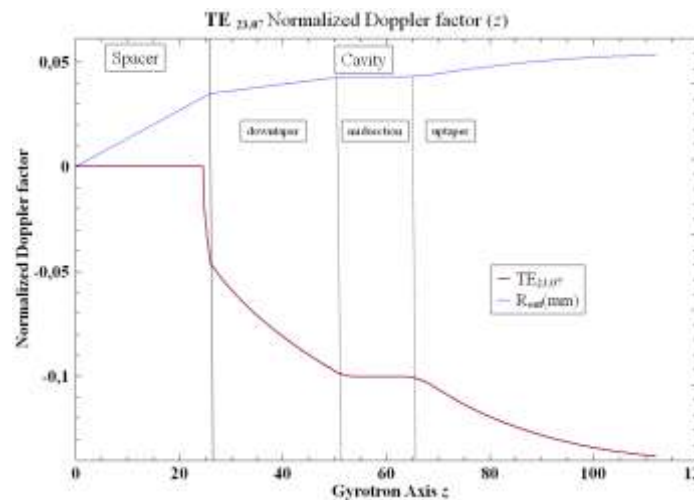


(β)

Σχήμα 6.1: Διάγραμμα της κανονικοποιημένης μετατόπισης Doppler κατά μήκος της κοιλότητας του γυροτρονίου 1.5 MW - 140 GHz των (α) ρυθμού λειτουργίας και (β) των επικρατέστερων επιστρεφόντων ρυθμών.



(α)



(β)

Σχήμα 6.2: Διάγραμμα της κανονικοποιημένης μετατόπισης Doppler κατά μήκος της κοιλότητας του γυροτρονίου 1MW - 140 GHz των (α) ρυθμού λειτουργίας και (β) του επικρατέστερου επιστρέφοντος ρυθμού.

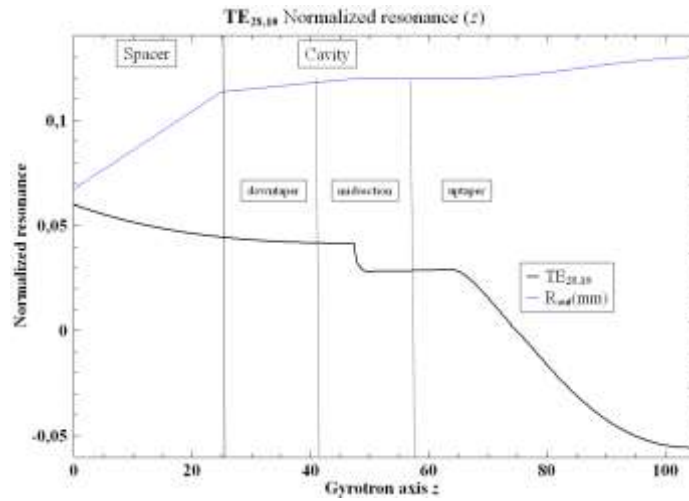
Παρατηρούμε ότι οι ρυθμοί λειτουργίας των δύο γυροτρονίων έχουν μικρή μετατόπιση Doppler ~ 0.02 , ενώ οι επιστρέφοντες παρασιτικοί έχουν μεγαλύτερη μετατόπιση και μάλιστα αρνητική. Συγκεκριμένα, ο $TE_{25,09}$ έχει μετατόπιση Doppler ~ -0.08 στην περιοχή του midsection, ενώ ο $TE_{24,09} \sim -0.07$. Η μετατόπιση Doppler του $TE_{23,07}$ υπολογίζεται ~ -0.01 στο μέσο της κοιλότητας του γυροτρονίου 1 MW. Παρατηρείται μια συνέπεια μεταξύ των επιστρεφόντων ρυθμών στα δύο γυροτρόνια σε ότι αφορά τη μεγαλύτερη μετατόπιση Doppler.

Η συνθήκη συντονισμού των ρυθμών υπολογίζεται ως συνάρτηση του z συνδυάζοντας μεταβλητές από τα αρχεία εξόδου του EURIDICE και λαμβάνοντας υπόψη τη μετατόπιση Doppler που υπολογίστηκε παραπάνω. Κανονικοποιώντας τη συνθήκη συντονισμού ως προς τη συχνότητα του ρυθμού, είναι δυνατόν να μελετηθεί το ποσοστό ικανοποίησής της στην περιοχή του midsection της κοιλότητας. Ορίζουμε το

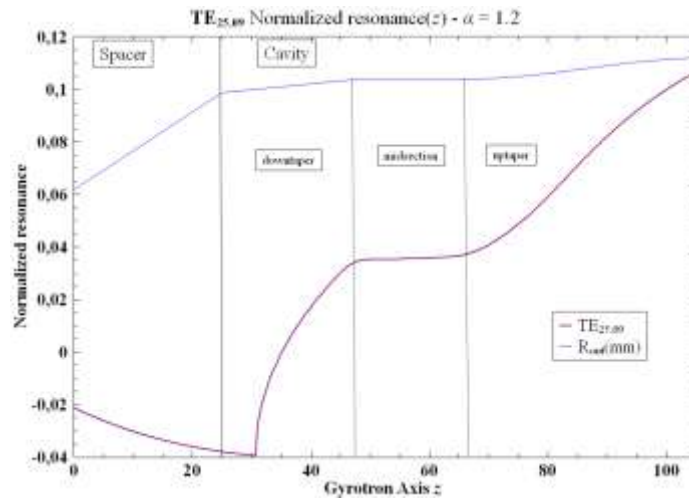
ποσοστό ικανοποίησης ως δ και θεωρούμε ότι η συνθήκη ικανοποιείται επαρκώς αν $0 \% < \delta < 5 \%$:

$$\left. \frac{\omega - \omega_{cycl} - k_{\parallel} v_{\parallel}}{\omega} \right|_z = \delta, 0 \% < \delta < 5 \% \quad (6.5)$$

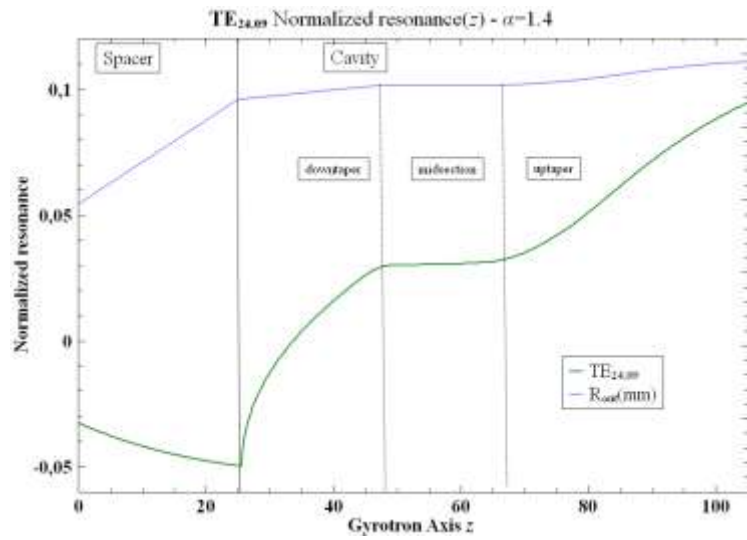
Στο Σχήμα 6.3 αναπαρίσταται η σχέση (6.5) στο γυροτρόνιο 1.5 MW - 140 GHz, ενώ το Σχήμα 6.4 αφορά το γυροτρόνιο 1.0 MW – 140 GHz.



(α)

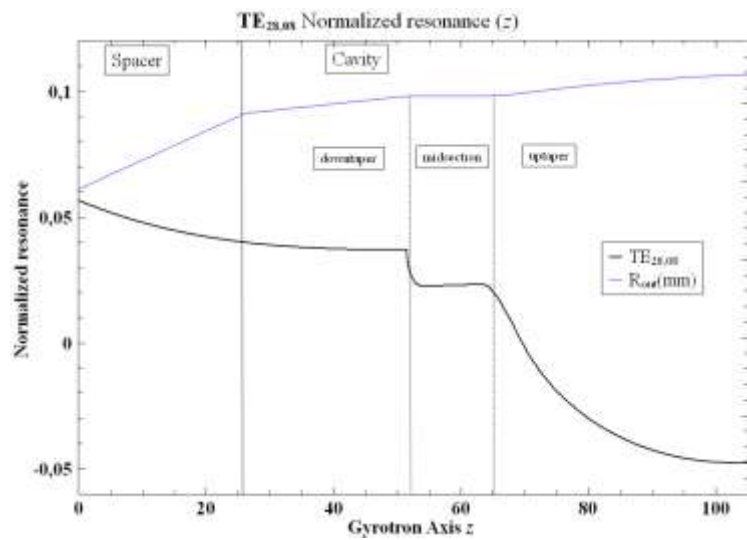


(β)

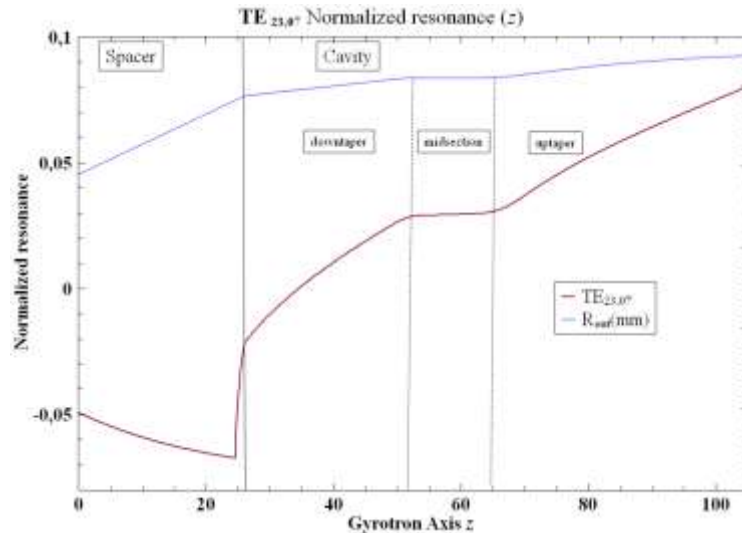


(γ)

Σχήμα 6.3: Διάγραμμα της κανονικοποιημένης συνθήκης συντονισμού κατά μήκος της κοιλότητας του γυροτρονίου 1.5 MW - 140 GHz των (α) ρυθμού λειτουργίας και (β, γ) του επικρατέστερου επιστέφοντος ρυθμού.



(α)



(β)

Σχήμα 6.4: Διάγραμμα της κανονικοποιημένης συνθήκης συντονισμού κατά μήκος της κοιλότητας του γυροτρονίου 1 MW - 140 GHz των (α) ρυθμού λειτουργίας και (β) του επικρατέστερου επιστρέφοντος ρυθμού.

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι στην περιοχή του midsection της κοιλότητας του γυροτρονίου 1.5 MW, η κανονικοποιημένη συνθήκη συντονισμού του ρυθμού TE_{28,10} είναι $\delta \cong 3\%$, του TE_{25,09} είναι $\delta \cong 4\%$ και του TE_{24,09} είναι $\delta \cong 3\%$. Επίσης στο γυροτρόνιο 1.5 MW φαίνεται ότι η συνθήκη συντονισμού από το ρυθμό λειτουργίας TE_{28,08} ικανοποιείται κατά $\delta \cong 3\%$, και από τον επικρατέστερο επιστρέφοντα ρυθμό TE_{23,07} κατά $\delta \cong 3\%$. Επομένως, οι ανταγωνιστές ρυθμοί ικανοποιούν το ίδιο καλά τη συνθήκη συντονισμού με τους ρυθμούς λειτουργίας και στα δύο γυροτρόνια

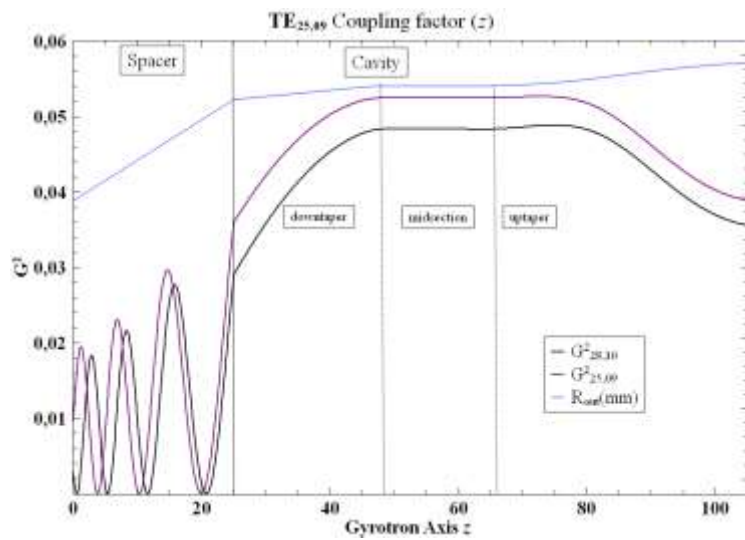
6.2 Συντελεστής σύζευξης

Από το αρχείο εξόδου του EURIDICE μπορεί κανείς να μελετήσει τον συντελεστή σύζευξης κατά μήκος της κοιλότητας. Στα Σχήματα 6.5 - 6.6 φαίνεται ο συντελεστής σύζευξης των επικρατέστερων επιστρέφοντων ρυθμών συγκριτικά με τον ρυθμό λειτουργίας και υπολογίζεται ο σχετικός συντελεστής σύζευξης κάθε επιστρέφοντα ρυθμού στην περιοχή του midsection της κοιλότητας. Ο σχετικός συντελεστής αν είναι μεγαλύτερος της μονάδας δείχνει ότι ο επιστρέφον ρυθμός έχει μεγαλύτερο συντελεστή σύζευξης σε αυτή την περιοχή. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι υπολογισμένοι σχετικοί συντελεστές σύζευξης:

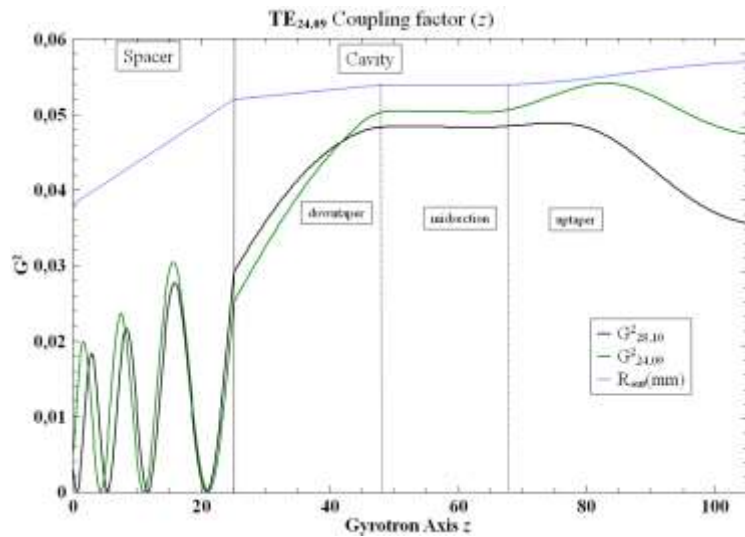
Πίνακας 6.1: Σχετικός συντελεστής σύζευξης επιστρέφοντων ρυθμών

	Γυροτρόνιο 1.5 MW - 140 GHz		Γυροτρόνιο 1MW - 140 GHz
$G_{rel}^2 m,p$	$G_{rel}^2 25,09 = \mathbf{1.09}$	$G_{rel}^2 24,09 = \mathbf{1.1}$	$G_{rel}^2 23,07 = \mathbf{1.17}$

Από τα παρακάτω διαγράμματα είναι προφανές ότι ο $TE_{25,09}$ (Σχήμα 6.5α) έχει στην περιοχή του midsection καλύτερο παράγοντα σύζευξης από τον ρυθμό λειτουργίας, αλλά και στα περισσότερα σημεία της κοιλότητας (με εξαίρεση κάποια σημεία στην περιοχή του spacer). Παρόμοια εικόνα με μικρές διαφοροποιήσεις έχουμε στον ρυθμό $TE_{24,09}$ (Σχήμα 6.5β). Στην περιοχή του downtaper ο ρυθμός λειτουργίας φαίνεται να έχει καλύτερο παράγοντα σύζευξης, όμως στην περιοχή του midsection συμβαίνει το αντίθετο και ειδικά στην περιοχή του uptaper, υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο παραγόντων με κυρίαρχο τον επιστρέφοντα ρυθμό. Στο γυροτρόνιο 1 MW – 140 GHz με παρασιτικό τον $TE_{23,07}$ (Σχήμα 6.6), είναι αξιοπαρατήρητη η σύγκλιση των δύο παραγόντων. Κοινό χαρακτηριστικό όμως με τους προηγούμενους επιστρέφοντες ρυθμούς είναι η επικράτηση του παράγοντα του $TE_{23,07}$ στην περιοχή του midsection και του uptaper.

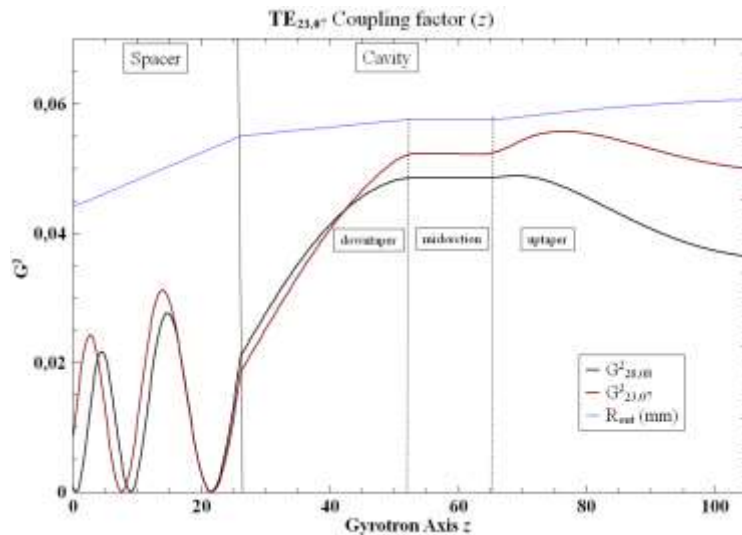


(α)



(β)

Σχήμα 6.5: Συντελεστής σύζευξης κατά μήκος της κοιλότητας του γυροτρονίου 1.5 MW - 140 GHz (α) του $TE_{25,09}$ και του (β) $TE_{24,09}$, συγκριτικά με του ρυθμού λειτουργίας $TE_{28,10}$.



Σχήμα 6.6: Συντελεστής σύζευξης κατά μήκος της κοιλότητας του γυροτρονίου 1 MW - 140 GHz του TE_{23,07} συγκριτικά με του ρυθμού λειτουργίας TE_{28,08}.

6.3 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, ο παράγοντας σύζευξης και των τριών επιστρεφόντων ρυθμών παρουσιάζει κοινή συμπεριφορά στην περιοχή του midsection αλλά και του uptaper, έχοντας μεγαλύτερες τιμές από τους ρυθμούς λειτουργίας και στα δύο γυροτρόνια. Φαίνεται λοιπόν, να υπάρχει μια συνέπεια μεταξύ των επιστρεφόντων ρυθμών. Όλοι εμφανίζουν μεγαλύτερο παράγοντα σύζευξης στην περιοχή του midsection, περιοχή στην οποία αλληλεπιδρά ο ρυθμός λειτουργίας με τη δέσμη αλλά και σε ένα μέρος της περιοχής του downtaper. Όλοι οι επιστρέφοντες ρυθμοί είναι μετατοπισμένοι λόγω Doppler σχετικά με τον ρυθμό λειτουργίας, αλλά ικανοποιούν το ίδιο καλά τη συνθήκη συντονισμού όσο οι ρυθμοί λειτουργίας.

Ειδικότερα, στο γυροτρόνιο 1.5 MW ο παράγοντας σύζευξης του TE_{25,09} υπερτερεί στο μεγαλύτερο μέρος της κοιλότητας. Ωστόσο ο TE_{25,09} δεν εμφανίζεται ως ο κυρίαρχος επιστρέφων ρυθμός, αλλά ο TE_{24,09} φαίνεται να τον καταπνίγει στις περισσότερες προσομοιώσεις. Οι δύο αυτοί επιστρέφοντες ρυθμοί συναγωνίζονται έντονα και δεν μπορούμε να δώσουμε μια ξεκάθαρη εξήγηση στην αιτία επικράτησης του ενός ή του άλλου.

Σε αυτό το κεφάλαιο έγινε μια έρευνα ως προς αιτία διέγερσης των επιστρεφόντων ρυθμών. Στα δύο γυροτρόνια οι επιστρέφοντες ρυθμοί παρουσιάζουν κοινή συμπεριφορά ως προς την ικανοποίηση της συνθήκης συντονισμού το ίδιο καλά με τον ρυθμό λειτουργίας του γυροτρονίου. Το πρόγραμμα προσομοίωσης έδειξε ότι οι επικρατέστεροι αυτοί παρασιτικοί ρυθμοί έχουν μεγαλύτερο παράγοντα σύζευξης στο μέσο της κοιλότητας. Επίσης, όλοι οι επιστρέφοντες ρυθμοί επιβεβαιώνουν τα συμπεράσματα της [3] για μεγαλύτερη μετατόπιση Doppler από αυτή των ρυθμών λειτουργίας.

7 Σύνοψη

Η διπλωματική εργασία αφορούσε την ενδελεχή μελέτη των παρασιτικών επιστρεφόντων ρυθμών μέσα από προσομοιώσεις αλληλεπίδρασης δέσμης - πεδίου σε δύο γυροτρόνια. Οι επιστρέφοντες ρυθμοί αλληλεπιδρούν με τη δέσμη σε περιοχή πριν την περιοχή του midsection της κοιλότητας και προκαλούν διασπορά σε αυτή, με αποτέλεσμα να μην συνεργάζεται ιδανικά ο ρυθμός λειτουργίας με την ηλεκτρονική δέσμη και συνεπώς, να επηρεάζεται η απόδοση της λειτουργίας. Αυτό συμβαίνει έντονα σε μεγαλύτερες τιμές του λόγου ταχυτήτων των ηλεκτρονίων από τις τιμές λειτουργίας. Η μελέτη περιέλαβε μια πληθώρα προσομοιώσεων στις οποίες εξετάστηκε η εξάρτηση των παρασιτικών ρυθμών από αριθμητικές και φυσικές παραμέτρους αλλά και αναζητήθηκε η αιτία διέγερσης αυτών των ρυθμών.

Στο πρώτο κεφάλαιο έγινε μια επισκόπηση της αρχής λειτουργίας των γυροτρονίων και συζητήθηκαν έννοιες που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία. Στο δεύτερο κεφάλαιο οι προσομοιώσεις δύο ρυθμών με τον κώδικα EURIDICE έδωσαν μια περιγραφή της φύσης των επιστρεφόντων ρυθμών, ώστε να γίνει μια εισαγωγή στο θέμα και επιβεβαιώθηκαν τα χαρακτηριστικά κυμάτων αυτών, όπως η εξάρτησή τους από τον λόγο ταχυτήτων και η μεγαλύτερη μετατόπιση Doppler που προβλέφθηκε από τη μικρότερη συχνότητα των κυμάτων συγκριτικά με την κυκλοτρονική. Επίσης, πραγματοποιήθηκε ένας κύκλος προσομοιώσεων αλλάζοντας τις αριθμητικές παραμέτρους, παράμετροι που αφορούν μόνο το προσομοιωτικό πρόγραμμα, με σκοπό την προσέγγιση του φυσικού προβλήματος. Από αυτόν τον κύκλο προσομοιώσεων, φάνηκε ότι οι τιμές ισχύος στην έξοδο του γυροτρονίου δεν αλλάζουν, αν μεταβάλουμε τις αριθμητικές παραμέτρους,

Στο τρίτο κεφάλαιο επεκτάθηκε η έρευνα με πολυρρυθμικές προσομοιώσεις και στο τέταρτο κεφάλαιο με αλλαγή αριθμητικών παραμέτρων και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα με σκοπό την εξαγωγή κάποιας συνθήκης, που να εξασφαλίζει προσομοιώσεις με μικρό αριθμό ανταγωνιστών και συγχρόνως αξιόπιστα αποτελέσματα. Στο γυροτρόνιο 1.5 MW - 140 GHz η ταυτότητα του επικρατέστερου επιστρέφοντα ρυθμού έδειξε εξάρτηση από τον αριθμό των ρυθμών, που συμπεριλαμβάνονται στην προσομοίωση. Ο κώδικας όμως δείχνει να προβλέπει όμοια την απώλεια ισχύος του γυροτρονίου. Στο γυροτρόνιο 1 MW - 140 GHz, τόσο η ταυτότητα του επικρατέστερου επιστρέφοντα ρυθμού όσο και η απώλεια ισχύος προβλέπονται όμοια από τον κώδικα EURIDICE, γεγονός που δείχνει, ότι προσομοιώνοντας περισσότερους από 60 ρυθμούς θα έχουμε τα ίδια αποτελέσματα με προσομοιώσεις, που περιλαμβάνουν περισσότερους από 222 ρυθμούς.

Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκαν πολυρρυθμικές προσομοιώσεις αλλάζοντας μια καθοριστική παράμετρο, την ακτίνα δέσμης, και μελετήθηκε η συμπεριφορά των επιστρεφόντων ρυθμών υπό αυτή τη μεταβολή. Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι η ταυτότητα του επιστρέφοντος ρυθμού που αλληλεπιδρά με τη δέσμη, καθώς και η προβλεπόμενη απώλεια ισχύος εξαρτώνται από την ακτίνα δέσμης.

Στο έκτο κεφάλαιο μελετήθηκαν οι δύο συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται για να αλληλεπιδράσει ένας ρυθμός με τη δέσμη. Η πρώτη είναι η ικανοποίηση της κανονικοποιημένης, ως προς τη συχνότητα του ρυθμού, συνθήκης συντονισμού σε ποσοστό μικρότερο του 5 % και η δεύτερη είναι η μεγιστοποίηση τους συντελεστή σύζευξης. Τα διαγράμματα έδειξαν ότι στην περιοχή του midsection της κοιλότητας οι επιστρέφοντες ρυθμοί και των δύο γυροτρονίων ικανοποιούν το ίδιο καλά με το ρυθμό λειτουργίας τη συνθήκη συντονισμού. Επίσης φάνηκε να έχουν μεγαλύτερο συντελεστή σύζευξης στο μέσο της κοιλότητας από τους ρυθμούς λειτουργίας. Τέλος μελετήθηκε η κανονικοποιημένη, ως προς τη συχνότητα του ρυθμού, μετατόπιση Doppler και αποδείχθηκε η χαρακτηριστική μεγαλύτερη και αρνητική μετατόπιση των επιστρεφόντων ρυθμών έναντι της αμελητέας μετατόπισης Doppler των ρυθμών λειτουργίας.

Μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας μπορεί να περιέχουν μια ικανή συνθήκη που να προβλέπει την ταυτότητα του ρυθμού που θα διεγερθεί. Μια εξίσου σημαντική διερεύνηση πρέπει να γίνει στον βαθμό που πρέπει να ικανοποιούνται οι δύο συνθήκες για να επικρατήσει σίγουρα ένας επιστρέφων ρυθμός, αλλά και στα αίτια επικράτησης των συγκεκριμένων παρασιτικών έναντι των υπολοίπων διακοσίων ρυθμών που λαμβάνουν μέρος στη προσομοίωση, ελέγχοντας τον βαθμό ικανοποίησης των συνθηκών από τους υπόλοιπους ρυθμούς.

Βιβλιογραφία

- [1] G. Gantenbein *et al.*, “Experimental investigations and analysis of parasitic RF oscillations in high-power gyrotrons,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 38, no. 6, pp. 1168–1177, Jun. 2010.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2041366>
- [2] K. A. Avramidis, “Design and simulation of coaxial gyrotrons (laying emphasis on second-harmonic operation)”, PhD Thesis, School of Electrical and Computer Engineering, National Technical University of Athens, Greece, July 2006 (in Greek).
<https://www.didaktorika.gr/eadd/handle/10442/16296?locale=en>
- [3] K. A. Avramidis, A. Marek, I. Chelis, Z. C. Ioannidis, L. Feuerstein, J. Jelonnek, M. Thumm, and I. Tigelis, “Simulation of parasitic backward-wave excitation in high-power gyrotron cavities”, *IEEE Trans. Electron Devices*, Jan. 2023.
<https://doi.org/10.1109/TED.2023.3242216>
- [4] S. Kern, K. A. Avramides, A. Roy Choudhury, O. Dumbrajs, G. Gantenbein, S. Illy, A. Samartsev, A. Schlaich, and M. Thumm, “Simulation and experimental investigations on dynamic After Cavity Interaction (ACI)”, 35th Int. Conf. Infrared Millimeter THz Waves, 5-10 September 2010, Rome, Italy.
<https://doi.org/10.1109/ICIMW.2010.5612609>
- [5] K. A. Avramidis, Z. C. Ioannidis, S. Kern, A. Samartsev, I. Gr. Pagonakis, I. G. Tigelis, and J. Jelonnek, “A comparative study on the modeling of dynamic after-cavity interaction in gyrotrons”, *Phys. Plasmas*, vol. 22, 053106, May 2015.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4919924>
- [6] M. Thumm, P. Brand, H. Braune, G. Dammertz, V. Erckmann, G. Gantenbein, S. Illy, W. Kasperek, H. P. Laqua, C. Lechte, W. Leonhardt, G. Michel, G. Neffe, B. Piosczyk, M. Schmid, and M. Weissgerber, “Progress in the 10-MW 140-GHz ECH system for the stellarator W7-X”, *IEEE Trans. Plasma Sci.* vol. 36, No. 2, pp. 341–355, Apr. 2008.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2008.917950>
- [7] K. Avramidis, I. Pagonakis, C. Iatrou, J. Vomvoridis, (2012). *EURIDICE*: A code-package for gyrotron interaction simulations and cavity design. *EPJ Web of Conferences*. 32. 10.1051/epjconf/20123204016.
<https://doi.org/10.1051/epjconf/20123204016>
- [8] A. Marek, K. A. Avramidis, L. Feuerstein, S. Illy, M. Thumm, C. Wu, and J. Jelonnek, “Time domain simulation of helical gyro-TWTs with coupled modes method and 3D particle beam”, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 69, No. 8, pp. 4546-4552, Jun. 2022.
<https://doi.org/10.1109/TED.2022.3182292>

[9] K. A. Avramidis, Z. C. Ioannidis, G. Aiello, P. Bénin, I. Chelis, A. Dinklage, G. Gantenbein, S. Illy, J. Jelonnek, J. Jin, H. P. Laqua, A. Leggieri, F. Legrand, A. Marek, S. Marsen⁵, I. Gr. Pagonakis, T. Ruess¹ T. Rzesnicki, T. Scherer, D. Strauss, M. Thumm, I. Tigelis, D. Wagner, J. Weggen, R. C. Wolf, and the Wendelstein 7-X Team, “Towards a 1.5 MW, 140 GHz gyrotron for the upgraded ECRH system at W7-X”, *Fus. Eng. Des.* vol. 164, pp. 112173, Mar. 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112173>

[10] M. V. Kartikeyan, E. Borie and M. Thumm, Gyrotrons: High-power Microwave and Millimeter Wave Technology, New York, NY, USA: *Springer-Verlag*, pp. 45-82, 2004.

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-07637-8>