

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Προσομοιωτική Μελέτη Σαρωτή  
Δεσμών Ηλεκτρονίων για Γραμμικούς  
Επιταχυντές

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ορφέα Αντωνίου

Επιβλέπων: Νικόλαος Κανταρτζής  
Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ.

Θεσσαλονίκη, Ιούλιος 2017



# Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Νικόλαο Κανταρτζή για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας, τη στήριξη και βοήθειά του καθώς και τις υποδομές που επέτρεψαν την ολοκλήρωση της διπλωματικής στο Α.Π.Θ..

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Dr. Adam Jeff, επιβλέποντα ερευνητή στο CERN, για την καθοδήγησή του και την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε τους 12 μήνες που εργαζόμουν στην Ελβετία.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την καθοδήγηση, την ηθική και υλική συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.



# Περιεχόμενα

## Ευχαριστίες

## Περιεχόμενα

<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας . . . . .	1
1.2 Διάρθρωση . . . . .	2
<b>2 Θεωρητικό υπόβαθρο</b>	<b>3</b>
2.1 Το CERN και ο επιταχυντής CLIC . . . . .	3
2.1.1 Το CERN . . . . .	3
2.1.2 Ο επιταχυντής CLIC . . . . .	4
2.2 Ο Electron Beam Scanner . . . . .	6
2.2.1 Εισαγωγή . . . . .	6
2.2.2 Λειτουργία του Electron Beam Scanner . . . . .	8
2.2.3 Θεωρητική ανάλυση του Electron Beam Scanner . . . . .	10
<b>3 Μέθοδοι προσομοίωσης</b>	<b>13</b>
3.1 Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν . . . . .	13
3.1.1 Το CST Particle Studio . . . . .	13
3.1.2 Το MATLAB . . . . .	14
3.2 Επιφροή μεταβλητών σε έναν Electron Beam Scanner . . . . .	14
3.2.1 Μελέτη θεωρητικού μοντέλου με το MATLAB . . . . .	15
3.2.2 Μελέτη επιφροής μεταβλητών με το CST . . . . .	16
3.3 Προσομοίωση Electron Beam Scanner στο CST . . . . .	16
3.3.1 Περιγραφή του μοντέλου . . . . .	16
3.3.2 Υπολογισμός αποτελεσμάτων . . . . .	18
3.3.3 Δημιουργία Gaussian δέσμης στο CST . . . . .	20
3.3.4 Τρόπος δημιουργίας Gaussian κατανομών σωματιδίων στο CST . . . . .	21
3.3.5 Υπολογισμός του κατάλληλου συντελεστή κλιμακοποίησης για Gaussian δέσμη . . . . .	23
3.4 Ανάλυση δεσμών στο MATLAB . . . . .	25

3.4.1	Προσομοίωση του κύριου σωλήνα του επιταχυντή στο CST . . . . .	25
3.4.2	Εξαγωγή των αποτελεσμάτων του CST . . . . .	26
3.4.3	Μετατροπή των αποτελεσμάτων . . . . .	26
3.4.4	Εισαγωγή και προεπεξεργασία των δεδομένων στο MATLAB . . . . .	27
3.4.5	Υπολογισμός των τροχιών της δέσμης ανίχνευσης . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Αποτελέσματα</b>	<b>35</b>
4.1	Επίδραση παραμέτρων του επιταχυντή στην ανίχνευση της δέσμης . . . . .	35
4.1.1	Αποτελέσματα μελέτης θεωρητικού μοντέλου στο MATLAB . . . . .	36
4.1.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης στο CST . . . . .	38
4.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης της μεθόδου στο CST . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Επίλογος</b>	<b>43</b>
5.1	Συμπεράσματα . . . . .	43
5.2	Μελλοντικές Επεκτάσεις . . . . .	43
<b>Βιβλιογραφία</b>		<b>46</b>
<b>Α' Μεταφράσεις ξένων όρων</b>		<b>49</b>
<b>Β' Το μοντέλο στο CST Particle Studio</b>		<b>51</b>
B'.1	Λίστα παραμέτρων . . . . .	51
B'.2	Template Based Post Processing . . . . .	53
B'.3	Μονάδες Μέτρησης (Units) . . . . .	56
<b>Κατάλογος Σχημάτων</b>		<b>57</b>
<b>Κατάλογος Πινάκων</b>		<b>59</b>
<b>Περίληψη</b>		<b>61</b>
<b>Abstract</b>		<b>63</b>

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

*“It seems probable to me that God, in the beginning, formed matter in solid, massy, hard, impenetrable, moveable particles...”*

—Isaac Newton, *Opticks*, 1730

### 1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Ο επιταχυντής CLIC αποτελεί τον προτεινόμενο γραμμικό επιταχυντή επόμενης γενιάς. Η καινοτόμα μέθοδος επιτάχυνσης με δύο δέσμες προϋπονθέτει μια Δέσμη Οδηγό πολύ υψηλής έντασης. Λόγω της υψηλής αυτής έντασης, επεμβατικές συσκευές μέτρησης της χωρικής έντασης (προφίλ) όπως το wire scanner<sup>1</sup> θα καταστρέφονταν. Έτσι, σχεδιάζονται νέες μη επεμβατικές μέθοδοι για να καλύψουν το κενό αυτό.

Μια τέτοια μέθοδος είναι ο Σαρωτής Δεσμών Ηλεκτρονίων, ή εφεξής “Electron Beam Scanner”, όπου μία ή περισσότερες δέσμες ανίχνευσης στέλνονται κάθετα προς τη Δέσμη Οδηγό. Αναλύοντας την απόκλιση αυτών των δεσμών σωματιδίων μας δίνεται η δυνατότητα να υπολογίσουμε το προφίλ της Δέσμης Οδηγού.

Τέτοιες συσκευές έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν σε άλλους επιταχυντές που είχαν συνεχόμενη ροή σωματιδίων, ή πολύ μεγάλες δέσμες. Η Δέσμη Οδηγός του CLIC θα έχει δέσμες μήκους μόλις 12 picoseconds<sup>2</sup>, το οποίο αποτελεί επιπλέον πρόκληση για τη χρήση του Electron Beam Scanner.

Για τη διερεύνηση της επίδρασης των μικρού μήκους δεσμών και για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του Electron Beam Scanenr, στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια πλήρης ανάλυση, ανιχνεύεται η κίνηση δεσμών ανίχνευσης μέσα από το ηλεκτρομαγνητικό

<sup>1</sup>To wire scanner είναι μια ηλεκτρο-μηχανική συσκευή η οποία μετρά το προφίλ μιας δέσμης σε έναν επιταχυντή σωματιδίων χρησιμοποιώντας ένα κινούμενο λεπτό σύρμα. Καθώς το σύρμα περνά μέσα από τη δέσμη, η αλληλεπίδραση δημιουργεί αλληλουχία δευτερευόντων σωματιδίων, τα οποία με τους κατάλληλους αισθητήρες γίνονται αντιληπτά και επιτρέπουν τη ζητούμενη μέτρηση.

<sup>2</sup>Το μήκος της δέσμης σε επιταχυντές μπορεί να εκφραστεί και σε μονάδες χρόνου (π.χ. ps), καθώς οι δέσμες κινούνται πολύ κοντά στην ταχύτητα του φωτός.

πεδίο της Δέσμης Οδηγού και των μερών που την περιβάλλουν. Στα πλαίσια αυτής της διερεύνησης χρησιμοποιήθηκε η σουίτα προσομοιώσεων CST, λόγω των δυνατοτήτων της σχετικά με το συνδυασμό ηλεκτρομαγνητικών υπολογισμών και ανίχνευσης σωματιδίων στις προσομοιώσεις.

Επιπλέον, αναζητήθηκαν ποικίλοι τρόποι για την ανίχνευση και τον προσδιορισμό της δέσμης ανίχνευσης και δημιουργήθηκε ο αντίστροφος αλγόριθμος ανακατασκευής του προφίλ της Δέσμης Οδηγού, σε μια προσπάθεια συνδρομής στο σχεδιασμό ενός επιταχυντή επόμενης γενιάς.

## 1.2 Διάρθρωση

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι οργανωμένη σε πέντε κεφάλαια:

Στο Κεφάλαιο 2 δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας. Αυτό περιλαμβάνει μια σύντομη περιγραφή του CERN, στο οποίο έγινε το μεγαλύτερο κομμάτι της εργασίας, του CLIC, που αποτελεί τον γραμμικό επιταχυντή που σχεδιάζεται να δημιουργηθεί σε χρονικό ορίζοντα 15 ετών, και παρουσιάζεται και επεξηγείται η λειτουργία του Σαρωτή Δεσμών Ηλεκτρονίων, ή Electron Beam Scanner όπως θα αναφέρεται. Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται και η λειτουργία του Electron Beam Scanner από μαθηματική σκοπιά, όπως έχει μελετηθεί από την επιστημονική κοινότητα ως τώρα.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι μέθοδοι προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν. Αρχικά, έχουμε μια σύντομη περιγραφή των βασικών εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν, του CST και του MATLAB, και στη συνέχεια επεξηγούνται τα στάδια της ανάλυσης που έγινε: ο τρόπος διερεύνησης της επιρροής παραμέτρων του επιταχυντή σε έναν Electron Beam Scanner, η προσομοίωση της διάταξης εξολοκλήρου στο προσομοιωτικό περιβάλλον του CST και, τέλος, ο συνδυασμός των δύο εργαλείων, του CST και του MATLAB, με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης της προσομοίωσης και της δημιουργίας νέων δυνατοτήτων για προσομοίωση.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης του προηγούμενου κεφαλαίου.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 δίνονται τα συμπεράσματα, η συνεισφορά αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθώς και προτάσεις για μελλοντική επέκτασή της.

Στο τέλος της διπλωματικής εργασίας βρίσκονται και 2 παραρτήματα. Το Παράρτημα A' περιέχει τις μεταφράσεις ξένων όρων που χρησιμοποιήθηκαν, ενώ στο Παράρτημα B' περιγράφεται αναλυτικά το μοντέλο που στήθηκε στο CST, σε περίπτωση που ο αναγνώστης θελήσει να το χρησιμοποιήσει.

## Κεφάλαιο 2

# Θεωρητικό υπόβαθρο

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η βάση στην οποία στηρίχτηκε η παρούσα διπλωματική εργασία.

Αρχικά, γίνεται μια σύντομη περιγραφή του CERN και του επιταχυντή CLIC, τα οποία διαμορφώνουν το πλαίσιο για τη μελέτη του Electron Beam Scanner. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται αναλυτικά η λειτουργία του Electron Beam Scanner, η ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία σχετικά με το αντικείμενο και ένα θεωρητικό μοντέλο που περιγράφει τη λειτουργία του.

### 2.1 To CERN και ο επιταχυντής CLIC

#### 2.1.1 To CERN

To CERN, διατηρώντας το ακρωνύμιο της αρχικής Γαλλικής ονομασίας του “Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire”, είναι το μεγαλύτερο σε έκταση πειραματικό κέντρο πυρηνικών ερευνών και ειδικότερα σωματιδιακής φυσικής στον κόσμο. Βρίσκεται δυτικά της Γενεύης, στα σύνορα Ελβετίας και Γαλλίας και ιδρύθηκε το 1954 από 12 ευρωπαϊκές χώρες. Σήμερα αριθμεί 20 χράτη-μέλη, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα, η οποία είναι και ιδρυτικό μέλος.

Η βασική λειτουργία του CERN είναι η παροχή επιταχυντών σωματιδίων και άλλων υποδομών απαραίτητων για την έρευνα στον τομέα της φυσικής υψηλών ενεργειών και ως αποτέλεσμα έχουν πραγματοποιηθεί πολυάριθμα πειράματα εκεί, μέσω διεθνών συνεργασιών.

Επίσης, το CERN αποτελεί τη γενέτειρα του Παγκόσμιου Ιστού (World Wide Web). Στην κύρια τοποθεσία του στο Meyrin βρίσκεται μεγάλη εγκατάσταση ηλεκτρονικών υπολογιστών με ισχυρές υποδομές επεξεργασίας δεδομένων, κυρίως για την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων. Λόγω της ανάγκης να καταστούν αυτές διαθέσιμες σε εξωτερικούς ερευνητές, υπήρξε ιστορικά ένας σημαντικός κόμβος δικτύου ευρείας περιοχής (Wide Area Network).

Αρκετά σημαντικά επιτεύγματα στο πεδίο της φυσικής των σωματιδίων έγιναν μέσω πειραμάτων στο CERN. Αυτά περιλαμβάνουν:

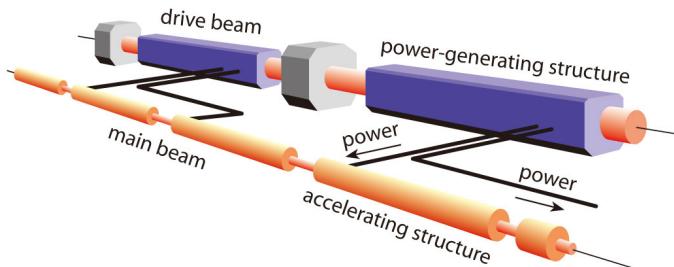
- 1973: Ανακάλυψη των ουδέτερων ρευμάτων στο θάλαμο φυσαλίδων Gargamelle.
- 1983: Ανακάλυψη των μποζονίων  $W$  και  $Z$  στα πειράματα UA1 και UA2.

- 1995: Πρώτη δημιουργία ατόμων αντιυδρογόνου στο πείραμα PS210.
- 1999: Ανακάλυψη της άμεσης παραβίασης CP στο πείραμα NA48.
- 2010: Απομόνωση 38 ατόμων αντιυδρογόνου.
- 2011: Διατήρηση αντιυδρογόνου για πάνω από 15 λεπτά.
- 2012: Ένα μποζόνιο με μάζα περίπου  $125 \text{ GeV}/c_0^2$  συνάδει με το πολυπόθητο μποζόνιο Higgs.

### 2.1.2 Ο επιταχυντής CLIC

Ο CLIC — Compact Linear Collider — αποτελεί μια μελέτη για ένα μελλοντικό επιταχυντή που θα φτάσει ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια<sup>1</sup> σε πρωτοφανή επίπεδα ενέργειας. Όταν θα έρχονται σε επαφή μέσω σύγκρουσης, θα αλληλοκαταστρέφονται, απελευθερώνοντας όλη τους την ενέργεια για την παραγωγή νέων σωματιδίων, τα οποία μπορούν να προσφέρουν εξαιρετικά λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τους νόμους της φύσης. Έτσι ο CLIC θα προσφέρει σημαντικές θεμελιώδεις γνώσεις φυσικής, πέρα από αυτές που είναι διαθέσιμες από το Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων (Large Hadron Collider — LHC) ή από ένα γραμμικό επιταχυντή ηλεκτρονίων/ποζιτρονίων χαμηλότερης ενέργειας, λόγω του μοναδικού συνδυασμού πειραματικής ακρίβειας και υψηλής ενέργειας.

Σε αυτές τις υψηλές ενέργειες, τα ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια θα έχαναν ένα τεράστιο μέρος της ενέργειάς τους επιταχυνόμενα σε έναν κυκλικό επιταχυντή σαν τον LHC. Επομένως, τα σωματίδια πρέπει να επιταχυνθούν σε δύο γραμμικούς επιταχυντές που αντικρίζουν ο ένας τον άλλο έτσι, ώστε οι δέσμες να συγκρούονται στον κεντρικό ανιχνευτή. Αυτό συνεπάγεται ότι τα σωματίδια πρέπει να αποκτήσουν την ενέργειά τους από ένα και μόνο πέρασμα τους μέσα από τις κοιλότητες επιτάχυνσης.



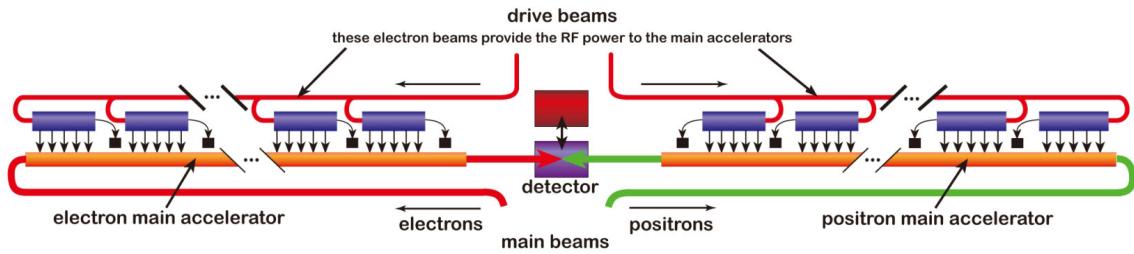
Σχήμα 2.1: Το σύστημα δύο δεσμών του CLIC [1].

Ο CLIC έχει σχεδιαστεί για να κατασκευαστεί σε στάδια αυξανόμενης ενέργειας για σύγκρουση: ξεκινώντας από  $360 \text{ GeV}$ , περίπου  $1.4 \text{ TeV}$ , και μέχρι την τελική ενέργεια των  $3 \text{ TeV}$ . Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η ενέργεια με ένα ρεαλιστικό και οικονομικά αποδοτικό τρόπο, η αύξηση της επιτάχυνσης πρέπει να είναι πολύ υψηλή. Ο CLIC αποσκοπεί σε επιτάχυνση των  $100 \text{ MV/m}$ , 20 φορές υψηλότερη από αυτή του LHC.

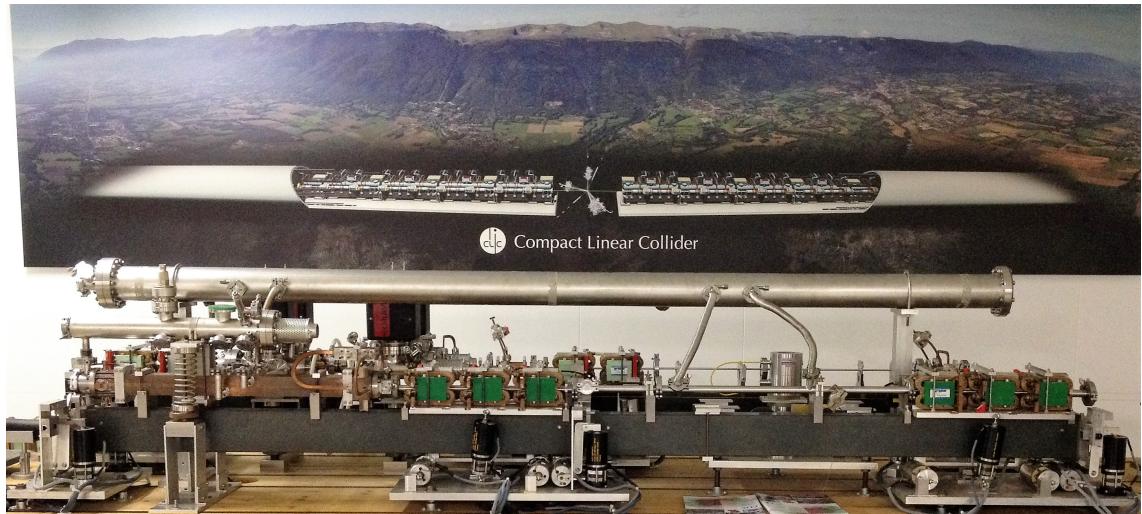
<sup>1</sup>τα ποζιτρόνια είναι τα αντισωμάτια των ηλεκτρονίων

Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται μια καινοτόμα μέθοδος επιτάχυνσης, όπου εξάγεται ενέργεια από μια δέσμη πολύ μεγάλης έντασης που περιέχει σχετικά χαμηλής ενέργειας ηλεκτρόνια (Δέσμη Οδηγός) και χρησιμοποιείται για την επιτάχυνση της χαμηλότερης σε ένταση Κύριας Δέσμης (Main Beam) σε πολύ μεγάλη ενέργεια.

Αυτή η Δέσμη Οδηγός (Drive Beam) επιβραδύνεται σε ειδικές Διατάξεις Εξαγωγής και Μεταφοράς Ισχύος — Power Extraction and Transfer Structures (PETS), και η παραγόμενη RF ισχύς μεταφέρεται στην κύρια δέσμη. Αυτό οδηγεί σε μια πολύ απλή διάταξη σήραγγας χωρίς ενεργά RF μέρη (δηλ. klystrons).

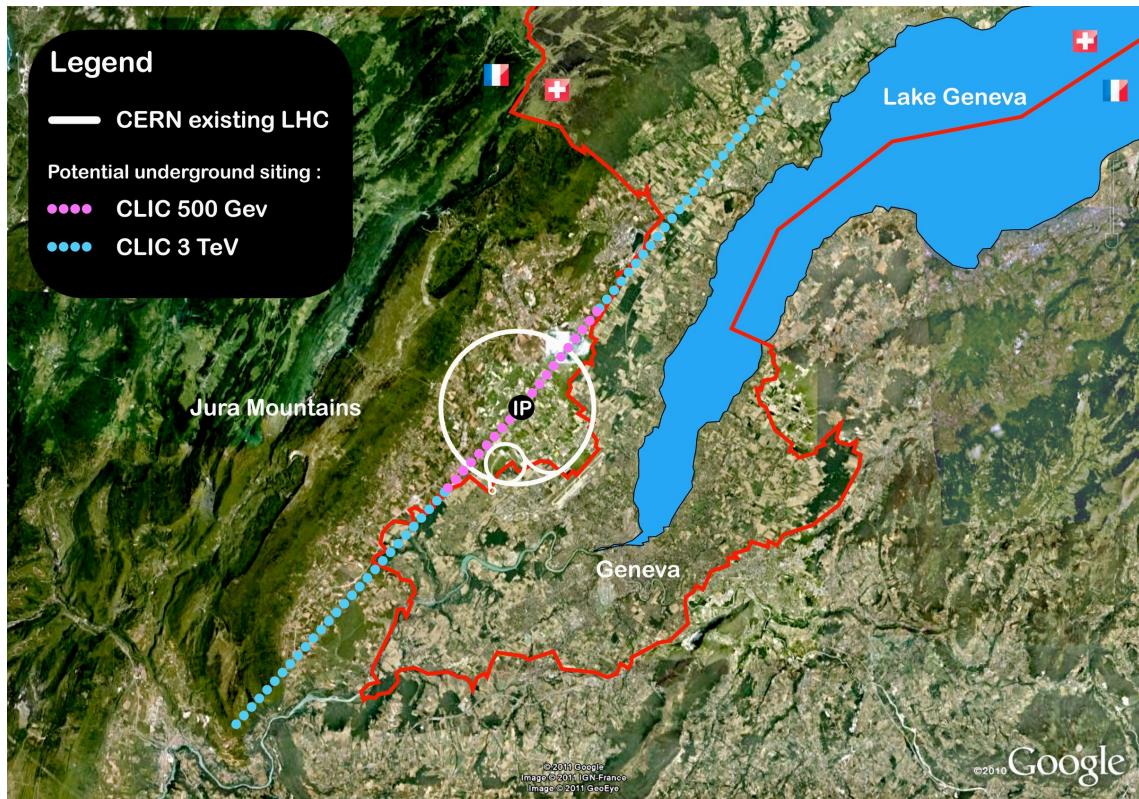


Σχήμα 2.2: Το σχεδιάγραμμα του CLIC [1].



Σχήμα 2.3: Η μακέτα του CLIC που βρίσκεται στο κτήριο δοκιμών CLIC Test Facility 3 (CTF3) του CERN.

Ο CLIC είναι μία από τις επιλογές για ένα μελλοντικό επιταχυντή κατασκευασμένο στο CERN. Η τελική απόφαση κατασκευής θα εξαρτηθεί από τα μελλοντικά αποτελέσματα του LHC.



Σχήμα 2.4: Χάρτης που δείχνει μια πιθανή θέση για τον επιταχυντή CLIC [1].

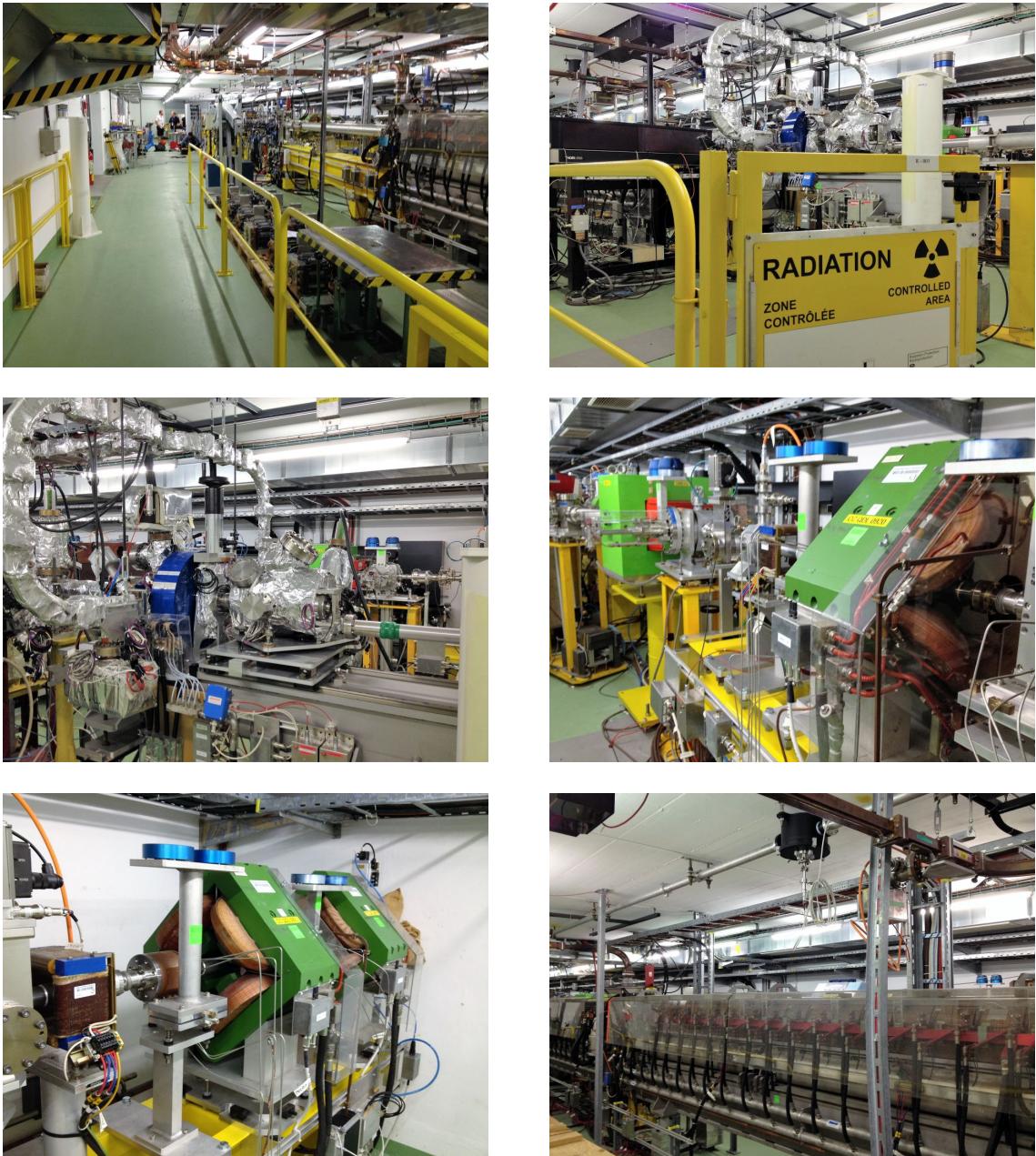
## 2.2 Ο Electron Beam Scanner

### 2.2.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο CLIC αποσκοπεί σε επιτάχυνση των  $100\text{ MV/m}$  και χρησιμοποιεί την καινοτομία των δύο δεσμών για να πετύχει αυτόν το στόχο. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο η Δέσμη Οδηγός (Drive Beam) να έχει πολύ μεγάλη ένταση, γεγονός που καθιστά πρόκληση τη μέτρηση της χωρικής έντασης (προφίλ) της δέσμης αυτής. Επεμβατικές μέθοδοι, όπως για παράδειγμα το wire scanner, χρησιμοποιούνται ευρέως σε επιταχυντές. Όμως, λόγω της έντασης της δέσμης θα καταστρέφονταν. Έτσι, οδηγούμαστε στην αναζήτηση νέων μη επεμβατικών μεθόδων για την κάλυψη αυτού του κενού.

Μια μη επεμβατική μέθοδος που εξετάζεται είναι η μέθοδος του Electron Beam Scanner, όπου μια δέσμη ανίχνευσης (probe beam) στέλνεται κάθετα προς τη Δέσμη Οδηγό (Drive Beam). Ανιχνεύοντας τη δέσμη ανίχνευσης και μετρώντας την εκτροπή της σε σχέση με την αρχική της θέση, είναι εφικτός ο υπολογισμός του προφίλ της Δέσμης Οδηγού.

Ανιχνευτές Electron Beam Scanner έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν σε άλλους επιταχυντές που έχουν συνεχείς και πολύ μακριές δέσμες, όπου η κατανομή του φορτίου θεωρείται σταθερή κατά τη μέτρηση. Η Δέσμη Οδηγός του CLIC θα έχει δέσμες μήκους μόλις  $12\text{ ps}$ . Αυτό δημιουργεί πρόσθετες προκλήσεις για τη λειτουργία του Electron Beam Scanner. Στην παρούσα εργασία θα εξετάσουμε τη λειτουργία ενός Electron Beam Scanner σε επιταχυντή



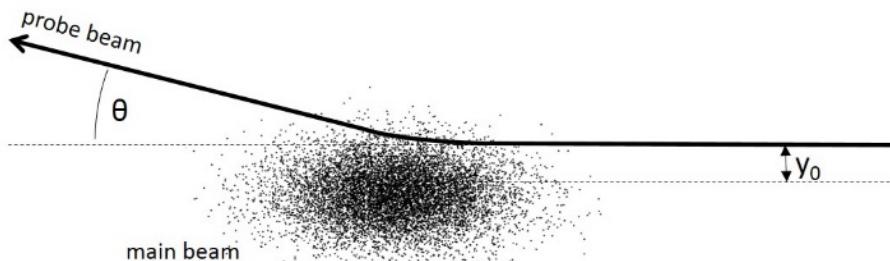
**Σχήμα 2.5:** Εικόνες από το CLIC Testing Facility 3 (CTF3), όπου γίνονται δοκιμές για τον CLIC. Λόγω της φύσης των δοκιμών, το CTF3 ψεωρείται “radiation controlled zone” και για την είσοδο κάποιου στο χώρο απαιτείται να έχει περάσει 7-ωρη εκπαίδευση (radiation training) και να φέρει ειδικό δοσίμετρο κατά την επίσκεψη.

που το μήκος της δέσμης είναι σημαντικά μικρότερο από το χρόνο σάρωσης της δέσμης ανίχνευσης. Συγκεκριμένα, η περίπτωση όπου το μήκος της δέσμης είναι μικρότερο από το χρόνο που αποτελείται για ένα σωματίδιο της δέσμης ανίχνευσης να διασχίσει την κύρια δέσμη είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί αναλυτικά. Δημιουργήθηκε για αυτό το σκοπό ένα περιβάλλον προσομοίωσης για αυτήν την κατάσταση.

### 2.2.2 Λειτουργία του Electron Beam Scanner

Ακολουθώντας την αρχική έρευνα από τους Pasour και Ngo [13], ανιχνευτές Electron Beam Scanner έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την μέτρηση του εγκάρσιου προφίλ δέσμης σε διάφορους επιταχυντές, όπως τον δωκτύλιο Spallation Neutron Source (SNS) στο Oak Ridge National Laboratory [2] [5] και τη δέσμη NTX στο Lawrence Berkeley National Laboratory [15]. Αυτοί οι επιταχυντές έχουν μεγάλο μήκος δέσμης εκατοντάδων nanoseconds. Έτσι, η εγκάρσια κατανομή φορτίου μπορεί να θεωρηθεί σταθερή κατά τη μέτρηση.

Ο Electron Beam Scanner δουλεύει μετρώντας την εκτροπή της δέσμης ανίχνευσης που αποτελείται από χαμηλής ενέργειας ηλεκτρόνια, καθώς αυτά διαπερνούν κάθετα την κύρια δέσμη (Σχήμα 2.6). Για την απεικόνιση επιλέξαμε σε αυτή τη διπλωματική εργασία ότι μετράμε το εγκάρσιο προφίλ, και ότι η δέσμη οδηγός ταξιδεύει οριζοντιώς. Φυσικά, το προφίλ μπορεί να μετρηθεί σε κάθε άξονα περιστρέφοντας κατάλληλα τη διάταξη.



Σχήμα 2.6: Εκτροπή δέσμης ανίχνευσης από την μετρούμενη δέσμη.

Η γωνία απόκλισης  $\theta$  της δέσμης οδηγού μετράται για διαφορετικές τιμές ύψους  $y_0$ , και το προφίλ της κύριας δέσμης  $\delta(y)$  είναι ανάλογο του διαφορικού [5].

$$\frac{d|\theta|}{dy_0} \propto \delta(y) \quad (2.1)$$

Η σταθερά αναλογίας εξαρτάται από την ενέργεια της δέσμης ανίχνευσης. Εδώ έχουν γίνει οι εξής απλοποιητικές υποθέσεις:

1. Η απόκλιση είναι μικρή.
2. Η μεταβολή ενέργειας της δέσμης ανίχνευσης είναι αμελητέα.
3. Η επίδραση του μαγνητικού πεδίου της κύριας δέσμης είναι πολύ μικρότερη από αυτή του ηλεκτρικού πεδίου.

Για να μετρηθεί η γωνία απόκλισης για διαφορετικά υγι σε μία εικόνα, σαρώνεται διαγώνια η αρχική θέση της δέσμης οδηγού.

Ένας Electron Beam Scanner έχει επίσης χρησιμοποιηθεί στο Budker Institute for Nuclear Physics για τη μέτρηση πολύ κοντύτερων δεσμών στον επιταχυντή VEPP-5 [12], με μήκος δέσμης της τάξης μεγέθους του 1 ns. Σε αυτήν την περίπτωση, η εγκάρσια κατανομή φορτίου μεταβάλλεται κατά τη μέτρηση. Έτσι, όχι μόνο η απόκλιση της δέσμης κατά την κάθετη διεύθυνση δεν είναι σταθερή, αλλά υπάρχει και πρόσθετη απόκλιση κατά μήκος του άξονα της δέσμης του επιταχυντή, λόγω του κατά μήκος διαφορικού του φορτίου.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, μια (μη σαρωμένη) δέσμη ανίχνευσης αποκλίνει έτσι, ώστε το ίχνος να αφήνει μια έλλειψη στην ουθόνη κάθε φορά που περνά μια δέσμη. Ο λόγος των αξόνων της έλλειψης καθορίζεται από το μήκος της δέσμης και το φορτίο. Ολόκληρο το διαμήκες προφίλ μπορεί να υπολογιστεί μετρώντας την ένταση της δέσμης ανίχνευσης γύρω από την έλλειψη [11]. Μετρώντας έναν αριθμό έλλειψεων με διαφορετικές αρχικές θέσεις, λαμβάνοντας τη μέγιστη απόκλιση κάθε έλλειψης και εφαρμόζοντας τη σχέση 2.1 δίνεται το εγκάρσιο προφίλ. Έτσι μπορούμε να μετρήσουμε το διαμήκες και το εγκάρσιο προφίλ με μία μόνο συσκευή.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ωα εξετάσουμε τη λειτουργία ενός Electron Beam Scanner σε επιταχυντή που το μήκος της δέσμης είναι σημαντικά μικρότερο από το χρόνο σάρωσης της δέσμης ανίχνευσης. Συγκεχριμένα, η περίπτωση όπου το μήκος της δέσμης είναι μικρότερο από το χρόνο που απαιτείται για ένα σωματίδιο της δέσμης ανίχνευσης να διασχίσει την κύρια δέσμη είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί αναλυτικά. Η πλήρωση αυτής της συνθήκης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως την ενέργεια της δέσμης ανίχνευσης και το μέγεθος της μετρούμενης δέσμης, αλλά μπορεί να ειπωθεί κατά προσέγγιση ότι εφαρμόζεται σε δέσμες με μήκος μικρότερο των 100 ps.

Ένα παράδειγμα τέτοιας δέσμης είναι ο προτεινόμενος επιταχυντής Compact LInear Collider (CLIC). Η δέσμη οδηγός του CLIC ωα επιταχύνει μια δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής έντασης έως τα 2.4 GeV [1]. Ο επιταχυντής της δέσμης οδηγού ωα είναι γραμμικός επιταχυντής του 1 GHz. Θα εισάγεται σε εναλλασσόμενα δοχεία, δίνοντας κενό μεταξύ των δεσμών (bunch spacing) 2 ns. Στο τέλος του γραμμικού επιταχυντή, ωα χρησιμοποιείται ένα σύστημα πολλαπλασιασμού συχνότητας [4] για να μειώσει το κενό μεταξύ των δεσμών στα 0.083 ns, πολλαπλασιάζοντας έτσι το ρεύμα κατά 24 και μειώνοντας το μήκος του παλμού κατά τον ίδιο συντελεστή. Έπειτα, η ενέργεια της δέσμης οδηγού ωα μεταφέρεται στην κύρια δέσμη με τη χρήση ειδικά σχεδιασμένων συζευγμένων κοιλοτήτων που επιτρέπουν την επιτάχυνση με ρυθμό που φτάνει πάνω από 100 MV/m [7].

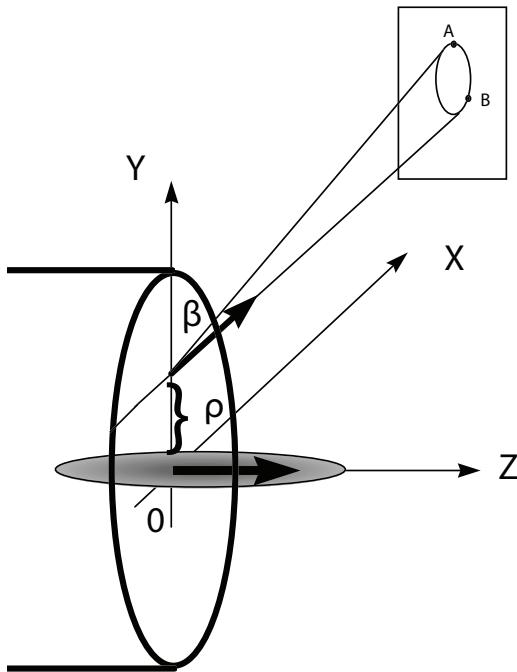
Το εγκάρσιο προφίλ της δέσμης ωα πρέπει να μετράται σε διάφορα σημεία κατά μήκος του γραμμικού επιταχυντή, και μη επεμβατικοί μετρητές προφίλ αναπτύσσονται για αυτό το σκοπό. Οι μετρητές πρέπει να έχουν ανάλυση 100 μm ή καλύτερη, ώστε να μετράει το ελάχιστο μέγεθος ακτίνας κατά τη διάρκεια quad scans. Επεμβατικές μέθοδοι, όπως οι ουθόνες OTR (Optical Transition Radiation) μπορούν να εγκατασταθούν παράλληλα για βαθμονόμηση, αλλά για χρήση μόνο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας με μειωμένο μήκος παλμών.

Μέγεθος	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
Πληθυσμός δέσμης	$5 \times 10^{10}$	$e^-$
Μήκος δέσμης	13	ps
Μήκος διάκενου	2	ns
Μήκος παλμού	140	$\mu s$
Πληθυσμός παλμού	$3 \times 10^{15}$	$e^-$
Συχνότητα επανάληψης	50	Hz

Πίνακας 2.1: Σχετικές παράμετροι για την Δέσμη Οδηγό του επιταχυντή CLIC [1]. Το μήκος της δέσμης, του διακένου ή του παλμού μπορούν να εκφραστούν και σε μονάδες χρόνου (π.χ. ps), καθώς οι δέσμες κινούνται πολύ κοντά στην ταχύτητα του φωτός

### 2.2.3 Θεωρητική ανάλυση του Electron Beam Scanner

Η λεπτή δέσμη ανίχνευσης κινείται κατά τον άξονα  $X$ , είναι κάθετη στην κίνηση της σχετικιστικής κίνησης της κύριας δέσμης (άξονας  $Z$ ), με παράμετρο απόκλισης  $\rho$  (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7: Διαδικασία ανίχνευσης της χαρακτηριστικής έλλειψης της δέσμης [11].

Τα αποτελέσματα της σάρωσης λαμβάνονται σε ουδόνη παράλληλη στο επίπεδο  $Y - Z$  και σε απόσταση  $L$  από τον άξονα  $Z$ .

Έστω ότι το κέντρο της κύριας δέσμης βρίσκεται στην αρχή των αξόνων τη χρονική στιγμή  $t = 0$ , ενώ η δέσμη ανίχνευσης έχει ομοιόμορφη πυκνότητα κατά  $X$  και διάμετρο  $d \ll \rho$ . Εδώ, υποθέτουμε ότι το  $\rho$  είναι μεγαλύτερο του τυπικού εγκάρσιου μεγέθους της κύριας δέσμης.

Τη χρονική στιγμή  $t = 0$  κάθε σωματίδιο της δέσμης ανίχνευσης αντιστοιχίζεται σε μια συγκεκριμένη θέση  $x$ . Η συνολική γωνία απόκλισης κατά  $Y$  για κάθε σωματίδιο υπό την επιρροή του ηλεκτρικού πεδίου της κύριας δέσμης μπορεί να εκφραστεί ως [11]:

$$\theta_y(x) = \frac{2\rho r_e}{\beta} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{n(z) dz}{\rho^2 + (x + \beta z)^2} \quad (2.2)$$

όπου:

- $r_e$ : η κλασική ακτίνα του ηλεκτρονίου
- $\beta = \frac{v_t}{c}$ : η σχετική ταχύτητα της δέσμης ανίχνευσης
- $c$ : η ταχύτητα του φωτός
- $x$ : η θέση σωματιδίου της δέσμης ανίχνευσης τη χρονική στιγμή  $t = 0$
- $n(z)$ : η γραμμική πυκνότητα της κύριας δέσμης κατά τον άξονα  $Z$

Η έκφραση για τη γωνία απόκλισης του σωματιδίου κατά  $Z$  μπορεί να γραφεί [11]:

$$\theta_z(x) = 2r_e \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(x + \beta z)n(z) dz}{\rho^2 + (x + \beta z)^2} \quad (2.3)$$



## Κεφάλαιο 3

# Μέθοδοι προσομοίωσης

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η υλοποίηση του συστήματος, με βάση τη θεωρητική ανάλυση που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά, παρουσιάζεται η πλατφόρμα και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται όσα υλοποιήθηκαν για τη μελέτη του αντικειμένου:

- Η μελέτη επιρροής μεταβλητών σε έναν Electron Beam Scanner, τόσο σε θεωρητικό επίπεδο όσο και στο προσομοιωμένο μοντέλο του CST
- Ο τρόπος προσομοίωσης ενός Electron Beam Scanner εξολοκλήρου στο CST
- Η βελτίωση της μεθόδου προσομοίωσης, χρησιμοποιώντας το CST ως το μέσο προσομοίωσης του ηλεκτρικού πεδίου της κύριας δέσμης και στη συνέχεια το MATLAB για τον υπολογισμό των τροχιών των σωματιδίων της δέσμης ανίχνευσης μέσα στο πεδίο που εξάγεται από το CST

### 3.1 Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν

Για την υλοποίηση των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα CST Particle Studio, της σουίτας προγραμμάτων προσομοίωσης CST Studio Suite. Για την επεξεργασία και επιπλέον ανάλυση των αποτελεσμάτων του CST, καθώς και βοηθητικά για τη βελτίωση του μοντέλου στο CST χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MATLAB. Τα προγράμματα παρουσιάζονται πιο αναλυτικά παρακάτω.

#### 3.1.1 To CST Particle Studio

To CST PARTICLE STUDIO® (CST® PS) είναι ένα εξειδικευμένο εργαλείο για την γρήγορη και ακριβή ανάλυση δυναμικών για φορτισμένα σωματίδια σε τρισδιάστατα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Είναι ένα ισχυρό εργαλείο, κατάλληλο για μεγάλο φάσμα εργασιών, από σχεδιασμό magnetrons και ρύθμιση σωλήνων ηλεκτρονίων έως μοντελοποίηση πηγών σωματιδίων και εξαρτημάτων για επιταχυντές.

Ο particle-in-cell (PIC) solver, ο οποίος μπορεί να λειτουργήσει στο πεδίο του χρόνου, μπορεί να εκτελέσει μια πλήρη προσομοίωση σωματιδίων και ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

Για σχετικιστικές εφαρμογές, ο wakefield solver μπορεί να υπολογίσει πώς τα πεδία που δημιουργούνται από σωματίδια που κινούνται στην (ή κοντά στην) ταχύτητα του φωτός, αλληλεπιδρούν με τη δομή γύρω τους.

Το CST PS έχει ενσωματωμένα τα 3D EM modules του CST STUDIO SUITE®, όπως τα CST EM STUDIO® electro- και magnetostatic solvers και το CST MICROWAVE STUDIO® eigenmode solver. Είναι πλήρως ενσωματωμένα στο περιβάλλον σχεδίασης CST STUDIO SUITE, χρησιμοποιώντας έτσι τις δυνατότητες μοντελοποίησης και τα import interfaces.

Το CST PS βασίζεται στη γνώση, την έρευνα και την ανάπτυξη των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν στο πακέτο προσομοίωσης MAFIA-4. Ο PIC solver μπορεί επίσης να εκμεταλλευτεί δυνατότητες GPU computing, προσφέροντας σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση, σε συμβατό υλικό.

### 3.1.2 To MATLAB

Το MATLAB (MATrix LABoratory) είναι ένα περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής και μια προγραμματιστική γλώσσα τέταρτης γενιάς. Το MATLAB δίνει έχει δυνατότητες όπως αποτελεσματικό πολλαπλασιασμό πινάκων, γραφική παράσταση συναρτήσεων και δεδομένων, υλοποίηση αλγορίθμων, δημιουργία user interfaces και δυνατότητα διεπαφής με προγράμματα γραφικά σε άλλες γλώσσες, όπως C, C++, C#, Java, Fortran και Python.

Αν και το MATLAB προορίζεται κυρίως για αριθμητικούς υπολογισμούς, έχει προαιρετικό toolbox που χρησιμοποιεί τη συμβολική μηχανή MuPAD, επιτρέποντας έτσι την εκτέλεση συμβολικών υπολογισμών. Ένα επιπλέον πακέτο, το Simulink, προσθέτει δυνατότητα προσομοίωσεων σε διάφορους τομείς και δυνατότητες μοντελοποίησης για δυναμικά και ενσωματωμένα συστήματα.

## 3.2 Επιρροή μεταβλητών σε έναν Electron Beam Scanner

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το πώς διάφορες μεταβλητές επηρεάζουν τα στοιχεία της χαρακτηριστικής έλλειψης που παρουσιάστηκαν. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε πώς επηρεάζουν τη χαρακτηριστική έλλειψη τα εξής μεγέθη:

1. Ένταση της κύριας δέσμης  $Q_i$  (ανά παλμό)
2. Μήκος της κύριας δέσμης  $\sigma$
3. Αρχική θέση ριπής  $\rho$  κατά  $Y$
4. Τάση της δέσμης ανίχνευσης  $V$

Το εύρος των παραμέτρων που μελετήθηκε φαίνεται στον Πίνακα 3.2.

Μέγεθος	Σύμβολο	Αρχική Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
Ένταση της κύριας δέσμης	$Q_i$	$5.9 \times 10^{-4}$	C
Μήκος της κύριας δέσμης	$\sigma$	$4 \times 10^{-3}$	m
Αρχική θέση ριπής κατά Y	$\rho$	$1 \times 10^{-2}$	m
Τάση της δέσμης ανίχνευσης	$V$	$2 \times 10^4$	V

Πίνακας 3.1: Οι αρχικές τιμές των παραμέτρων που μελετήθηκαν.

Σύμβολο	Εύρος τιμών		Μονάδα Μέτρησης
	Ελάχιστη	Μέγιστη	
$Q_i$	$5.9 \times 10^{-5}$	$5.9 \times 10^{-3}$	C
$\sigma$	$1 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-1}$	m
$\rho$	0	2	m
$V$	$2 \times 10^2$	$2 \times 10^6$	V

Πίνακας 3.2: Το εύρος των παραμέτρων που μελετήθηκαν στην μελέτη επιρροής μεταβλητών.

### 3.2.1 Μελέτη θεωρητικού μοντέλου με το MATLAB

Για τη διερεύνηση αυτή δημιουργήθηκε ένα script στο MATLAB, όπου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο που παρουσιάστηκε στην υπο-ενότητα 2.2.3 και έγιναν οι μελέτες για το πώς επηρεάζει η κάθιση παραμετρούς ξεχωριστά τη χαρακτηριστική έλλειψη της δέσμης.

Για τη διευκόλυνση του αναγνώστη παρατίθενται οι Εξισώσεις 2.2 και 2.3 εκ νέου:

$$\theta_y(x) = \frac{2\rho r_e}{\beta} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{n(z) dz}{\rho^2 + (x + \beta z)^2} \quad (2.2)$$

$$\theta_z(x) = 2r_e \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(x + \beta z)n(z) dz}{\rho^2 + (x + \beta z)^2} \quad (2.3)$$

όπου:

- $r_e$ : η κλασική ακτίνα του ηλεκτρονίου
- $\beta = \frac{v_t}{c}$ : η σχετική ταχύτητα της δέσμης ανίχνευσης
- $c$ : η ταχύτητα του φωτός
- $x$ : η θέση σωματιδίου της δέσμης ανίχνευσης τη χρονική στιγμή  $t = 0$
- $n(z)$ : η γραμμική πυκνότητα της κύριας δέσμης κατά τον άξονα Z

Για το σκοπό της ανάλυσης δημιουργήθηκε η συνάρτηση staticBeamDeflection.m στο MATLAB, η οποία δέχεται ως ορίσματα τη θέση  $x$  του σωματιδίου την  $t = 0$ , την αρχική θέση ριψής  $\rho$ , τη σχετική ταχύτητα  $\beta$  της δέσμης ανίχνευσης, τη συνάρτηση γραμμικής πυκνότητας  $n(z)$  και το μήκος  $\sigma$  της δέσμης, και δίνει ως έξοδο τις γωνίες απόκλισης  $\theta_y$  και

$\theta_z$ , σύμφωνα με τις εξισώσεις Εξισώσεις 2.2 και 2.3. Η συνάρτηση αυτή παρουσιάζεται στον Κώδικα 3.1.

Λόγω του ότι το παραπάνω μοντέλο δε έχει ως μεταβλητές κάποιες από αυτές που θέλουμε να μελετήσουμε ως έχουν χρειάστηκε να γίνουν κάποιες μετατροπές. Συγκεκριμένα, για την ένταση της κύριας δέσμης και την τάση της δέσμης ανίχνευσης, χρησιμοποιήσαμε τις παρακάτω ιδιότητες:

- Η ένταση της κύριας δέσμης  $Q_i$  ανά παλμό επηρεάζει τα ηλεκτρόνια ανά δέσμη  $N_e$  σύμφωνα με την εξίσωση  $N_e = \frac{Q_i}{N_b q_e}$ , όπου  $N_b$  ο αριθμός δεσμών ανά παλμό και  $q_e$  το στοιχειώδες φορτίο του ηλεκτρονίου. Επομένως, έτσι επηρεάζεται η γραμμική πυκνότητα της κύριας δέσμης  $n(z)$  κατά τον άξονα  $Z$  ως εξής:  $n(z) = N_e \cdot \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ .
- Η τάση της δέσμης ανίχνευσης  $V$  επηρεάζει τον παράγοντα Lorenz  $\gamma = 1 + \frac{V}{E_0}$ , όπου για το  $\gamma$  ισχύει ότι η ενέργεια  $E$  κινούμενου σωματιδίου ισούται με  $E = \gamma E_0 = \gamma m_0 c^2$ . Έτσι, επηρεάζεται η σχετική ταχύτητα  $\beta = \frac{v_t}{c}$  της δέσμης ανίχνευσης, λόγω του ότι  $\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}}$  [9].

### 3.2.2 Μελέτη επιρροής μεταβλητών με το CST

Η ίδια μελέτη έγινε και στο CST, με σκοπό να φανεί το πώς επηρεάζουν οι μεταβλητές αυτές το μοντέλο, όταν αυτό προσομοιωθεί ως κατασκευή.

Τα μεγέθη που μεταβλήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων φαίνονται στον Πίνακα 3.3.

Μέγεθος	Σύμβολο	Παράμετρος του μοντέλου CST
Ένταση της κύριας δέσμης	$Q_i$	main_beam_charge
Μήκος της κύριας δέσμης	$\sigma$	main_beam_length
Αρχική θέση ριπής κατά $Y$	$\rho$	scan_beam_vertical_offset
Τάση της δέσμης ανίχνευσης	$V$	scan_beam_energy

Πίνακας 3.3: Αντιστοιχία των μεταβλητών που μελετήθηκαν με το αντίστοιχο μέγεθος στο μοντέλο του CST.

## 3.3 Προσομοίωση Electron Beam Scanner στο CST

### 3.3.1 Περιγραφή του μοντέλου

Στη συνέχεια, ξεκίνησε η δημιουργία του CST model που θα υπολογίζει το ακριβές προφίλ της δέσμης, δηλαδή η πλήρης προσομοίωση ενός Electron Beam Scanner.

Το μοντέλο περιλαμβάνει τους δύο σωλήνες ίδιας διαμέτρου, της κύριας δέσμης και της δέσμης ανίχνευσης, οι οποίοι τέμνονται κάθετα με κέντρο την αρχή των αξόνων. Οι σωλήνες

```

1 function [theta_y, theta_z] = staticBeamDeflection( ...
2     x, rho, beta, n, r_e, sigma)
3 %STATICBEAMDEFLECTION Calculates the deflection angle of the
4 % testing beam
5 % x: position of the scanning beam, assuming the main beam is
6 % centered at x = 0
7 % rho: offset of the scanning beam in Y axis
8 % beta: relative velocity of the main beam, beta = v_t / c
9 % n(z): function expressing the main beam linear density along
10 % Z axis
11 % r_e: electron radius
12 % sigma:main beam bunch length
13
14 % compute theta Y
15 fun_y = @(z) n(z) ./ (rho .* rho + (x + beta .* z) .* ...
16     (x + beta .* z));
17 %Integral_y = integral(fun_y, -Inf, Inf);
18 Integral_y = integral(fun_y, -3 * sigma, 3 * sigma);
19 theta_y = 2 * rho * r_e / beta * Integral_y;
20
21
22 % compute theta Z
23 fun_z = @(z) ((x + beta .* z) .* n(z)) ./ (...
24     rho .* rho + (x + beta .* z) .* (x + beta .* z));
25
26 %Integral_z = integral(fun_z, -Inf, Inf);
27 Integral_z = integral(fun_z, -3 * sigma, 3 * sigma);
28 theta_z = 2 * r_e * Integral_z;
29
30 end

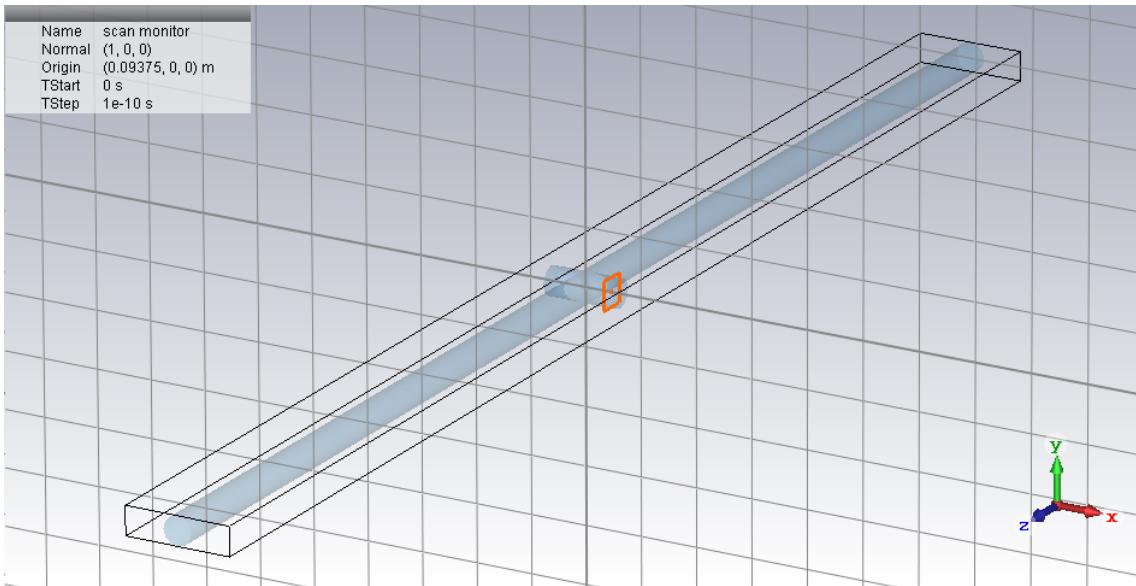
```

Κώδικας 3.1: Η συνάρτηση υπολογισμού των γωνιών απόκλισης της δέσμης.

είναι από κενό και βρίσκονται μέσα σε χώρο τέλειου αγωγού (Perfect Electric Conductor, PEC). Στην αρχή του κάθισε σωλήνα βρίσκεται από μια πηγή σωματιδίων, (Particle Source). Η κύρια δέσμη εκπέμπει 10 δέσμες σωματιδίων με Gaussian emission model, ενώ η δέσμη ανίχνευσης εκπέμπει συνεχόμενα με μοντέλο DC. Το μοντέλο απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1 και η πηγή σωματιδίων της κύριας δέσμης στο Σχήμα 3.2.

Για την ευκολότερη επαλήθευση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων του Electron Beam Scanner, προστέθηκε ένας PIC Position Monitor σε όλη την κατασκευή, κάτι που μας επιτρέπει να γνωρίζουμε ανά πάσα χρονική στιγμή τις θέσεις στις οποίες έχουμε σωματίδια. Ακόμη, προστέθηκαν δύο PIC 2D Monitors, τα οποία ανιχνεύουν τη διέλευση σωματιδίων στο επίπεδο που βρίσκονται. Το ένα τοποθετήθηκε στην κύρια δέσμη, λίγο πριν την αλληλεπίδρασή της με τη δέσμη ανίχνευσης, ενώ το δεύτερο τοποθετήθηκε στο τέλος της δέσμης ανίχνευσης. Το τελευταίο αποτελεί και το “αποτέλεσμα” του Electron Beam Scanner, από το οποίο υπολογίζεται και το προφίλ της δέσμης που ανιχνεύουμε.

Στο CST project όλες οι διαστάσεις και τα μεγέθη εισάγονται ως παράμετροι, οι οποίες μπορούν να τροποποιηθούν. Οι τελικές παράμετροι του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε παρατίθενται στο Παράρτημα B', στην ενότητα B'.1.



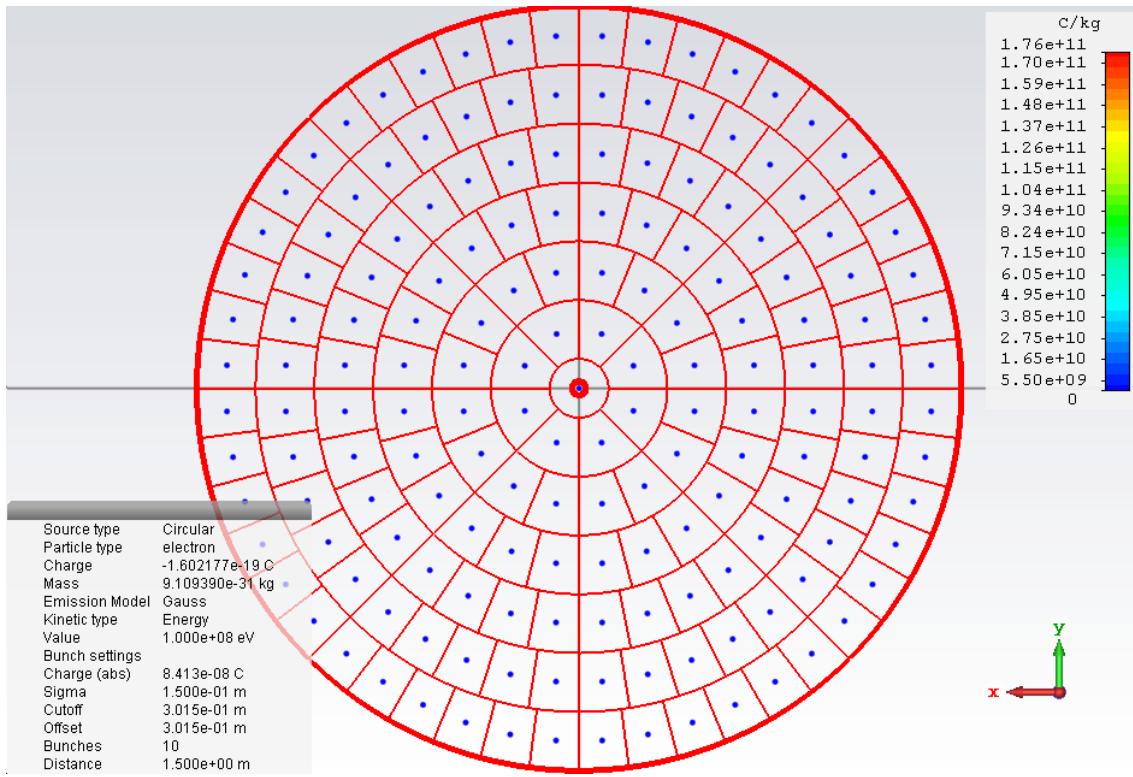
Σχήμα 3.1: Η διάταξη προσομοιωμένη στο CST. Στον σωλήνα της δέσμης ανίχνευσης φαίνεται ανιχνευτής σωματιδίων (PIC 2D monitor), όπου ανιχνεύονται η απόκλιση της δέσμης ανίχνευσης και με βάση αυτό εκτιμάται το προφίλ της κύριας δέσμης.

### 3.3.2 Υπολογισμός αποτελεσμάτων

Ο υπολογισμός των αποτελεσμάτων γίνεται αποκλειστικά μέσα στο CST, μέσω Template Based Post Processing.

Συγκεκριμένα, υπολογίζονται 26 αποτελέσματα:

- Η μέση τιμή των συντεταγμένων  $x$ ,  $y$  και  $z$  των σωματιδίων που φτάνουν στον PIC 2D

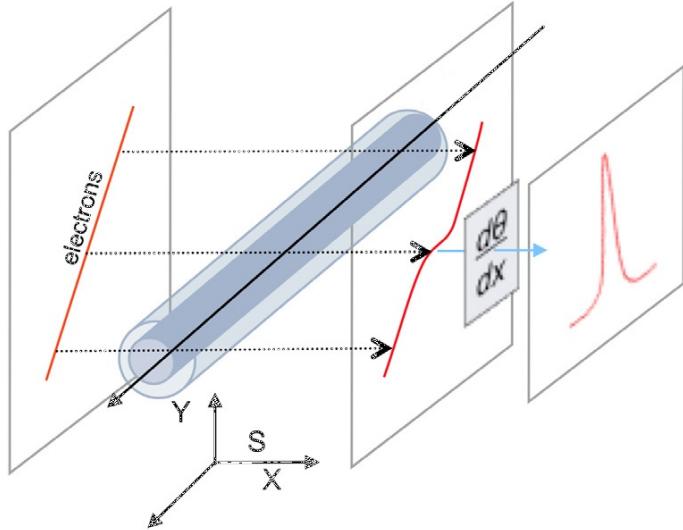


Σχήμα 3.2: Η πηγή της κύριας δέσμης στο CST. Με μπλε χρώμα φαίνονται τα “emission points”, τα σημεία απ’ όπου εκπέμπονται ηλεκτρόνια.

Monitor, δηλαδή στο πέτασμα του Electron Beam Scanner, την κάθε χρονική στιγμή.

- Οι γωνίες απόκλισης  $\theta_y$  και  $\theta_z$ , υπολογίζονται το τόξο της γωνίας με εφαπτομένη το λόγο της διαφοράς της θέσης στον αντίστοιχο άξονα από τη ριπή της δέσμης μέχρι την άφιξη στον PIC 2D Monitor προς την απόσταση του σημείου ριπής και ανίχνευσης. Δηλαδή  $\theta_y = \tan^{-1}(\frac{y-\rho}{\Delta x})$  και αντίστοιχα  $\theta_z = \tan^{-1}(\frac{z-\rho}{\Delta x})$ , αφού κατά τον άξονα Z η αρχική θέση είναι η  $z = 0$ . Οι γωνίες υπολογίζονται και προβάλλονται σε κοινή γραφική παράσταση συνολικά και για τις 10 δέσμες, αλλά και για την  $1^{\text{η}}$  και  $10^{\text{η}}$  δέσμη ξεχωριστά.
- Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των  $\theta_y$  και  $\theta_z$  συνολικά για όλες τις δέσμες μιας προσομοίωσης, αλλά και για την  $1^{\text{η}}$  και  $10^{\text{η}}$  δέσμη της προσομοίωσης ξεχωριστά.
- Το ύψος, το πλάτος και τον λόγο της χαρακτηριστικής έλλειψη της δέσμης. Το ύψος ισούται με τη  $\theta_{y,\max}$ , το πλάτος με  $\theta_{z,\max} - \theta_{z,\min}$  και ο λόγος με το ύψος προς το πλάτος της χαρακτηριστικής έλλειψης.
- Η γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής έλλειψης της δέσμης, συνδυάζοντας τις μεταβλητές  $\theta_y$  και  $\theta_z$  στους άξονες Y και X αντίστοιχα. Απεικονίζονται οι ελλείψεις όλων των δεσμών μαζί, καθώς και η έλλειψη της 1<sup>ης</sup> δέσμης ξεχωριστά.
- Τέλος, υπολογίζεται η παράγωγος των μεγίστων των  $\theta_y$ , όταν αυτή έχει υπολογιστεί μέσω parameter sweep για εύρος αρχικών θέσεων ρίψης  $\rho$ , ως προς το  $\rho$ , το οποίο

μας δίνει την τελική εκτίμηση του προφίλ της δέσμης από την κατασκευή μας, όπως περιγράφεται στην Εξίσωση 2.1.



Σχήμα 3.3: Γραφική παρουσίαση του τρόπου εκτίμησης του προφίλ δέσμης με Electron Beam Scanner [5].

Το τελικό μοντέλο προέκυψε ύστερα από πολλά στάδια δοκιμών για την ακρίβεια αποτελεσμάτων και βελτιστοποιήσεων χρονικής απόδοσης. Η αναλυτική περιγραφή όλων των μεθόδων post processing που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο στο CST βρίσκεται στην ενότητα B'.2 του Παραρτήματος B'.

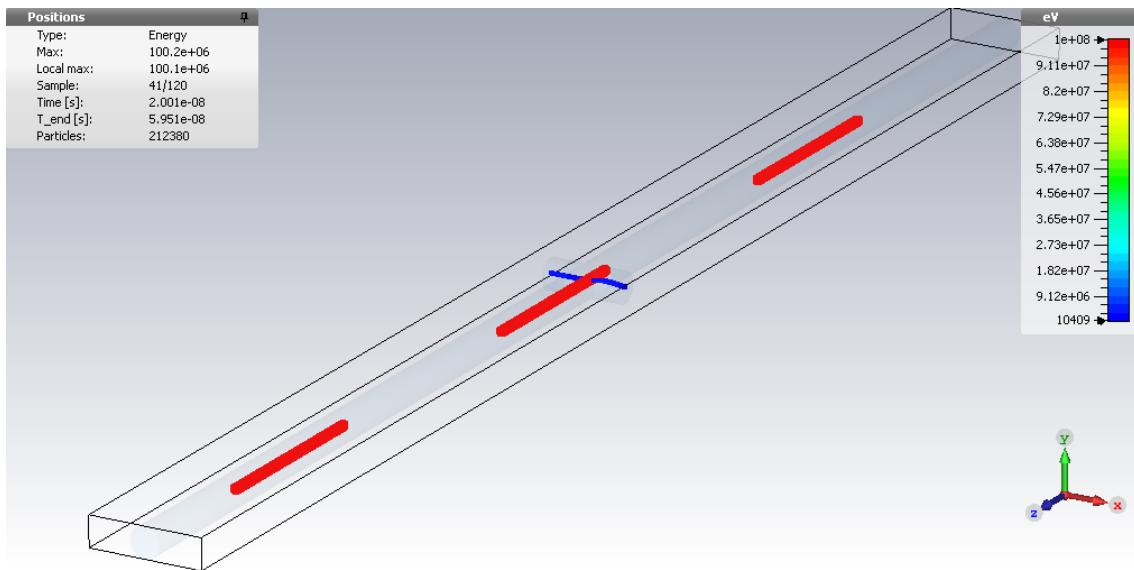
### 3.3.3 Δημιουργία Gaussian δέσμης στο CST

Για τον υπολογισμό του προφίλ μιας Gaussian δέσμης, συναντήσαμε το πρόβλημα ότι μετά τον υπολογισμό του προφίλ, το σχήμα δε φαινόταν να έχει αυτό που ήταν αναμενόμενο.

Για την επίλυση του προβλήματος αυτού, αρχικά ελέγχαμε αν το πρόβλημα βρίσκεται στον τρόπο δημιουργίας της δέσμης ή στον τρόπο ανίχνευσης. Έτσι:

1. Δημιουργήσαμε ένα νέο CST project και, αφού στήθηκε όλο το μοντέλο εκ νέου, μπήκε ένας particle monitor που ανιχνεύει τα σωματίδια της κύριας δέσμης.
2. Έγινε εξαγωγή των δεδομένων αυτών της κύριας δέσμης.
3. Τα δεδομένα αυτά εισήχθησαν στο MATLAB και δημιουργήθηκε το κατάλληλο script για την ανάλυσή τους.

Από την παραπάνω διαδικασία έγινε σαφές ότι το πρόβλημα εντοπίζεται στον τρόπο που το CST δημιουργεί την κατανομή των σωματιδίων.



Σχήμα 3.4: Η διαδικασία ανίχνευσης του προφίλ της δέσμης από τον Electron Beam Scanner στο CST. Βλέπουμε την εκτροπή της δέσμης ανίχνευσης (μπλε) από την κύρια δέσμη (κόκκινο) που αλληλεπιδρά με τη δέσμη ανίχνευσης.

### 3.3.4 Τρόπος δημιουργίας Gaussian κατανομών σωματιδίων στο CST

Μετά από αναζήτηση και επικοινωνία με το ίδιο το support του CST, έγινε σαφής ο τρόπος που γίνεται η προσομοίωση των σωματιδίων για Gaussian κυκλικές πηγές σωματιδίων. Συγκεκριμένα, αρχικά, αφού το συνολικό ποσό φορτίου που εκπέμπεται δεν μεταβάλλεται ανάλογα με τη συνάρτηση κατανομής τίθεται ο περιορισμός ότι:

$$2\pi \int_{R_{\text{in}}}^{R_{\text{out}}} f(r) \ dr = \pi (R_{\text{out}}^2 - R_{\text{in}}^2) \quad (3.1)$$

όπου:

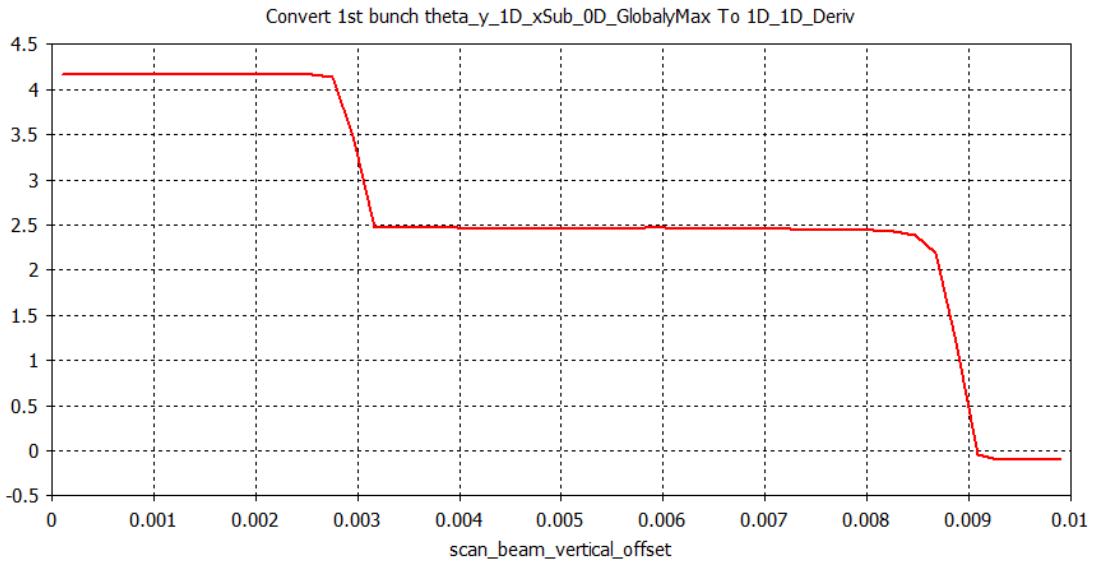
- $R_{\text{out}}$ : η εξωτερική ακτίνα της κυκλικής πηγής σωματιδίων
- $R_{\text{in}}$ : η εσωτερική ακτίνα της κυκλικής πηγής σωματιδίων (στην περίπτωσή μας  $R_{\text{in}} = 0$ )
- $f(r)$ : η συνάρτηση ακτινικής κατανομής

Η παραπάνω σχέση χρησιμοποιείται για να κλιμακοποιήσει τη συνάρτηση κατανομής. Η λογική του τρόπου υπολογισμού αυτού είναι ότι η συνάρτηση κατανομής θα πρέπει να υπολογίζεται με τρόπο, ώστε ο συνολικός φορτίο που εκπέμπεται να είναι ανεξάρτητος από την ορισμένη κατανομή. Αυτό σημαίνει ότι ο συντελεστής κατανομής  $c_{\text{scale}}$  υπολογίζεται αυτόματα.

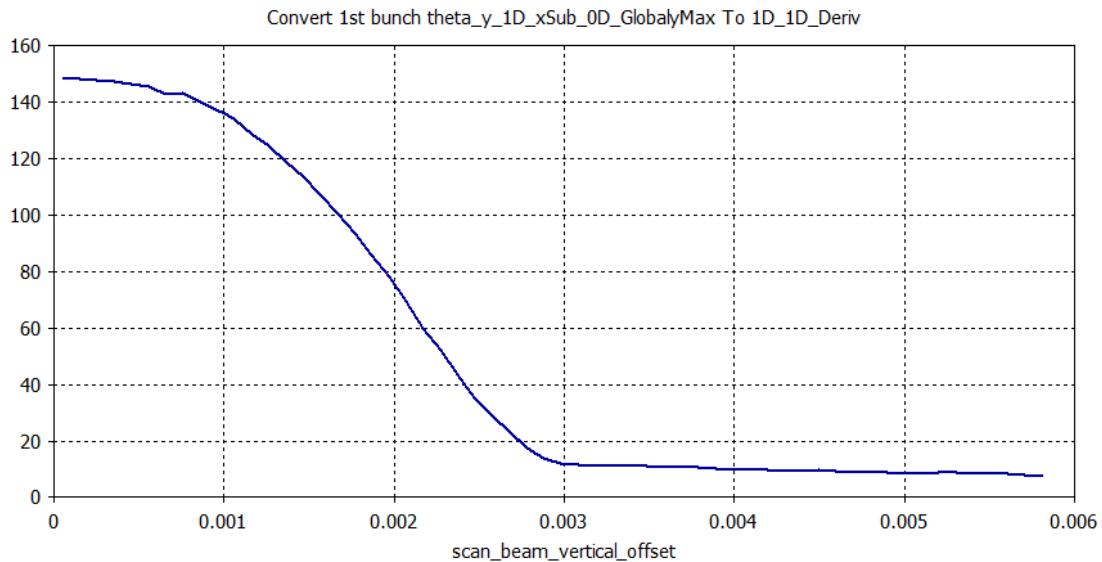
Στη συνέχεια, η Gaussian κατανομή δίνεται από τη σχέση:

$$f(r) = c_{\text{off}} + c_{\text{scale}} \left( \exp \left( -\frac{r^2}{2\sigma^2} \right) - 1 \right) \quad (3.2)$$

όπου:



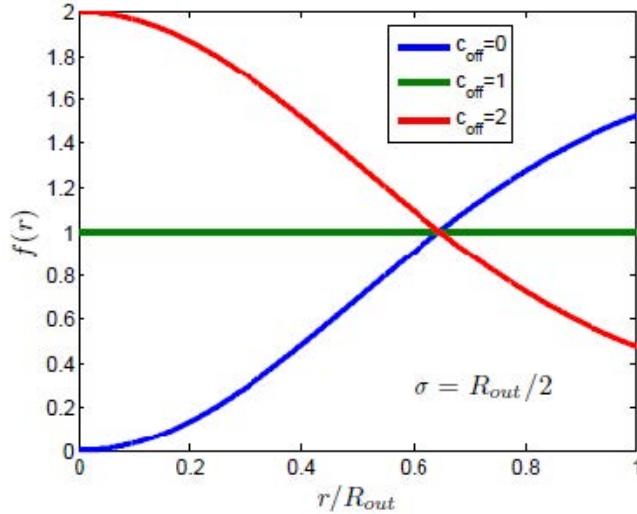
(α') Το αποτέλεσμα του υπολογισμού του προφίλ στο CST για  $c_{off} = 2$ . Η μορφή του δεν είναι Gaussian



(β') Το αποτέλεσμα του υπολογισμού του προφίλ στο CST για  $c_{off} = 8.0027$  έχει Gaussian μορφή.

Σχήμα 3.5: Σύγκριση του αποτελέσματος υπολογισμού του προφίλ της δέσμης για  $c_{off} = 2$  και  $c_{off} = 8.0027$ .

- $c_{\text{off}}$ : η τιμή της συνάρτησης για  $r = 0$
- $\sigma$ : η τυπική απόχλιση



Σχήμα 3.6: Παράδειγμα Gaussian συνάρτησης για διάφορες τιμές του συντελεστή  $c_{\text{off}}$ .

Αφού οι υπόλοιπες μεταβλητές είναι καθορισμένες από τις απαιτήσεις του επιταχυντή, απομένει να βρεθεί η τιμή του  $c_{\text{scale}}$  που θα μας δίνει τη ζητούμενη συνθήκη.

### 3.3.5 Υπολογισμός του κατάλληλου συντελεστή κλιμακοποίησης για Gaussian δέσμη

Ο τρόπος που υπολογίζει το CST την Gaussian κατανομή, όπως είδαμε παραπάνω είναι

$$\begin{aligned} f(r) &= c_{\text{off}} + c_{\text{scale}} \left( \exp \left( -\frac{r^2}{2\sigma^2} \right) - 1 \right) \\ &= (c_{\text{off}} - c_{\text{scale}}) + c_{\text{scale}} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Η πραγματική κατανομή της δέσμης στον επιταχυντή που μελετούμε όμως, έχει γενική μορφή κατανομής:

$$f(r) = a e^{-\frac{(r-b)^2}{2c^2}} \quad (3.4)$$

Επομένως, εξισώνοντας τις παραπάνω σχέσεις 3.3 και 3.4 και δεδομένου ότι πρέπει να ισχύουν  $\forall r$  προκύπτουν τα συμπεράσματα ότι:

$$\begin{aligned} a &\equiv c_{\text{scale}} \\ b &= 0 \\ c &\equiv \sigma \\ c_{\text{off}} &= c_{\text{scale}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

```

1 function cscale = calculateCscale( sigma, coff, Rout, Rin)
2 %CALCULATECSCALE Calculates the scaling factor cscale for a CST
3 %circular particle source with gaussian radial pendency
4 % create symbolic variables
5 syms r;
6 syms cscales;
7
8 % define radial function
9 f = @(r) coff + cscales * ( exp( (-r .^ 2) / ...
10 ( 2 * sigma ^ 2 ) ) - 1 );
11
12 % calculate indefinite integral
13 I = @(r) int( f(r) * r, r );
14
15 % calculate definite integral
16 Idef = subs(I, r, Rout) - subs(I, r, Rin);
17
18 % solve equation
19 % FSOLVE requires all values returned by functions to be
20 % of data type double.
21 cscale = double( solve( Idef - 0.5 * ...
22 ( Rout ^ 2 - Rin ^ 2 ), cscales ) );
23 end

```

Κώδικας 3.2: Η συνάρτηση υπολογισμού του  $c_{\text{scale}}$ .

Επομένως, πρέπει να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός τιμών ( $c_{\text{off}}, c_{\text{scale}}$ ) που να πληροί τον περιορισμό της εξίσωσης 3.1, δεδομένων των τιμών των μεταβλητών  $\sigma, R_{\text{out}}$  και  $R_{\text{in}}$  του επιταχυντή μας.

Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος δημιουργήθηκε κατάλληλο script στο MATLAB.

Αρχικά δημιουργήθηκε η συνάρτηση  $\text{cscale} = \text{calculateCscale}( \sigma, \text{coff}, \text{Rout}, \text{Rin} )$  η οποία δέχεται ως ορίσματα τις μεταβλητές:  $\sigma, c_{\text{off}}, R_{\text{out}}$  και  $R_{\text{in}}$  και δίνει στην έξοδό του την τιμή του  $c_{\text{scale}}$  που πληροί την εξίσωση 3.1.

Στη συνέχεια, τρέχοντας το script `findOptimumCoff.m` δίνουμε τις τιμές των παραμέτρων του προβλήματός μας στα  $\sigma, c_{\text{off}}, R_{\text{out}}, R_{\text{in}}$  και βρίσκουμε την τιμή του  $c_{\text{off}}$  που επαληθεύει τη σχέση  $c_{\text{off}} = c_{\text{scale}}(\sigma, c_{\text{off}}, R_{\text{out}}, R_{\text{in}})$ .

Εν τέλει, για τις τιμές του δικού μας προβλήματος, δίνουμε ως είσοδο  $(\sigma, R_{\text{out}}, R_{\text{in}}) = (0.01/4, 0.01, 0)$  και προκύπτει η ζητούμενη τιμή του συντελεστή:

$$c_{\text{off}} \approx 8.002684 \quad (3.6)$$

```

1 sigma = 0.01 / 4;
2 Rout = 0.01;
3 Rin = 0;
4
5 syms coff;
6
7 % find coff such as coff = cscale(coff)
8 fsolve(@(coff) calculateCscale(sigma, coff, Rout, Rin) - coff);

```

Κώδικας 3.3: To script υπολογισμού του κατάλληλου για τα δεδομένα μας  $c_{off}$ .

Ο υπολογισμός του συντελεστή για διαφορετικές τιμές των  $\sigma$ ,  $R_{out}$  και  $R_{in}$  δεν έχουμε παρά να αλλάξουμε τις τιμές στον Κώδικα 3.3 και να τρέξουμε εκ νέου το πρόγραμμα.

## 3.4 Ανάλυση δεσμών στο MATLAB

Με σκοπό τη βελτιστοποίηση της ταχύτητας προσομοίωσης, ώστε να είναι δυνατή η προσομοίωση παλμών (pulses, πολλαπλών δεσμών) και συρμών (trains, πολλαπλών παλμών) σωματιδίων, η διαδικασία προσομοίωσης επεκτάθηκε και στην ενεργή χρήση του MATLAB. Η διαδικασία προσομοίωσης σε αυτή την περίπτωση παίρνει τη μορφή:

1. Ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση του κύριου σωλήνα του επιταχυντή στο CST, που περιλαμβάνει την κύρια δέσμη, όσες φορές είναι επιθυμητό
2. Εξαγωγή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από το CST σε μορφή αρχείου ASCII
3. Μετατροπή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε μορφή αρχείου MATLAB formatted data (.mat) για βελτιστοποίηση στο χώρο αποθήκευσης και χρόνο προσπέλασης
4. Εισαγωγή και προεπεξεργασία των δεδομένων στο MATLAB
5. Υπολογισμός των τροχιών σωματιδίων της δέσμης ανίχνευσης μέσα από το MATLAB στο προσομοιωμένο μαγνητικό πεδίο

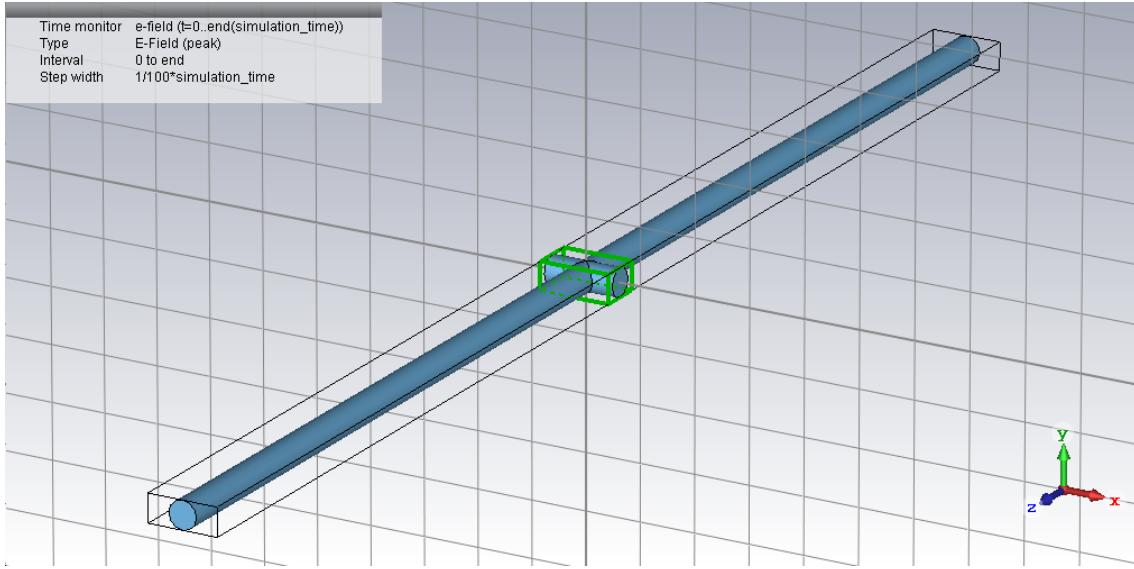
### 3.4.1 Προσομοίωση του κύριου σωλήνα του επιταχυντή στο CST

Για την προσομοίωση του κύριου σωλήνα δημιουργήθηκε ένα νέο project στο CST. Το project αυτό περιέχει τη γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε και στο project με τις δύο δέσμες, δηλαδή δύο κάθετοι σωλήνες ίδιας διαμέτρου που περιλαμβάνουν κενό, μέσα σε χώρο τέλειου αγωγού (PEC). Αυτή τη φορά έχουμε μόνο ένα Particle Source, την κύρια δέσμη, που εκπέμπει σωματίδια με Gaussian emission model.

Γύρω από το χώρο διασταύρωσης των σωλήνων της κύριας δέσμης και της δέσμης ανίχνευσης έχει τοποθετηθεί ένας E-field monitor, που αποθηκεύει τις τιμές του ηλεκτρικού πεδίου

σε κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης. Οι τιμές αυτές είναι αυτές που θα εξαχθούν για να χρησιμοποιηθούν στα επόμενα βήματα.

Η διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Η διάταξη προσομοίωσης του κύριου σωλήνα στο CST. Με πράσινο χρώμα φαίνεται ο E-field monitor.

### 3.4.2 Εξαγωγή των αποτελεσμάτων του CST

Μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης, τα αποτελέσματα εξάγονται από το πρόγραμμα, επιλέγοντας τα αποτελέσματα στο φάκελο e-field, μέσα στα 2D/3D Results και κάνοντας export από την καρτέλα Post Processing στη μορφή ASCII.

Έτσι, τα αποτελέσματα εξάγονται σε μορφή .txt, που έχει 9 στήλες: 3 στήλες για τη θέση κάθε σωματιδίου (συντεταγμένες  $x$ ,  $y$  και  $z$ ) και 6 για τις τιμές του ηλεκτρικού πεδίου στη θέση αυτή ( $\text{Re}(E_x)$ ,  $\text{Re}(E_y)$ ,  $\text{Re}(E_z)$ ,  $\text{Im}(E_x)$ ,  $\text{Im}(E_y)$ ,  $\text{Im}(E_z)$ ). Τα αποτελέσματα απεικονίζουν όλες τις παραπάνω τιμές ξεχινώντας από το πρώτο sample και συνεχίζοντας μέχρι το τελευταίο. Στον Κώδικα 3.4 φαίνεται ένα δείγμα εξόδου.

### 3.4.3 Μετατροπή των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα, όπως βγαίνουν από το CST, είναι σε μορφή εύκολη για ανάγνωση από άνθρωπο αλλά όχι για επεξεργασία ή αποτελεσματική αποθήκευση. Για το λόγο αυτό, τα αποτελέσματα μετατρέπονται σε άλλη μορφή.

Η μορφή που επιλέχθηκε για τη μετατροπή των δεδομένων είναι η μορφή αρχείου MATLAB formatted data (.mat). Η επιλογή έγινε με βάση την απόδοση του τύπου αρχείου σε χώρο αποθήκευσης και χρόνο προσπέλασης, καθώς και το γεγονός ότι χρησιμοποιείται το MATLAB για την χρήση των δεδομένων στα επόμενα στάδια της διαδικασίας.

x [m]	y [m]	z [m]	ExRe [V/m]	EyRe [V/m]	EzRe [V/m]	ExIm [V/m]	EyIm [V/m]	EzIm [V/m]
<hr/>								
Sample 1								
-0.125	-0.05	-2.5	0	0	0	0	0	0
-0.115	-0.05	-2.5	0	0	0	0	0	0
-0.105	-0.05	-2.5	0	0	0	0	0	0
-0.095	-0.05	-2.5	0	0	0	0	0	0
-0.085	-0.05	-2.5	0	0	0	0	0	0
-0.075	-0.05	-2.5	0	0	0	0	0	0
-0.065	-0.05	-2.5	0	0	0	0	0	0
Sample 2								
-0.125	-0.05	-2.5	0	0	0	0	0	0
-0.115	-0.05	-2.5	0	0	0	0	0	0
-0.105	-0.05	-2.5	0	0	0	0	0	0
-0.095	-0.05	-2.5	0	0	0	0	0	0
-0.085	-0.05	-2.5	0	0	0	0	0	0
-0.075	-0.05	-2.5	0	0	0	0	0	0
-0.065	-0.05	-2.5	0	0	0	0	0	0

Κώδικας 3.4: Δείγμα εξόδου ενός e-field monitor του CST σε μορφή ASCII.

Για τη μετατροπή αυτή δημιουργήθηκε η συνάρτηση `importField.m`, η οποία ουσιαστικά είναι parser αρχείων της μορφής που παρουσιάστηκε, και τα αποθηκεύει σε έναν πίνακα της μορφής  $\text{Field} = \text{Samples} \times \text{Μεταβλητές} \times \text{Τιμές}$ . Η συνάρτηση ανοίγει το αρχείο των αποτελεσμάτων του CST και το διαβάζει γραμμή-γραμμή αγνοώντας τις πρώτες 2 γραμμές. Αν η γραμμή περιέχει δεδομένα, τα αποθηκεύει στον πίνακα, στο τρέχον Sample, αλλιώς (αν δηλαδή περιέχει το string `Sample X`) αυξάνει το τρέχον Sample κατά 1. Κατά τη διαδικασία αυτή αγνοούμε τις 3 τελευταίες στήλες, που περιέχουν τα δεδομένα  $\text{Im}(E_x)$ ,  $\text{Im}(E_y)$  και  $\text{Im}(E_z)$ , καθώς για την περίπτωσή μας δεν έχουμε μιγαδική συνιστώσα στο ηλεκτρικό πεδίο. Τμήμα του κώδικα φαίνεται στον Κώδικα 3.5. Δεν παρατίθεται το κομμάτι που αρχικοποιεί τις διαστάσεις του πίνακα.

#### 3.4.4 Εισαγωγή και προεπεξεργασία των δεδομένων στο MATLAB

Αφού γίνει η μετατροπή του αρχείου σε επεξεργάσιμη μορφή, τα δεδομένα εισάγονται στο MATLAB για επεξεργασία και χρήση. Η μορφή πίνακα, στην οποία είναι αποθηκευμένα, αν και πιο βολική από την αρχική, χρειάζεται επιπλέον επεξεργασία για την αποτελεσματική χρήση των δεδομένων. Συγκεκριμένα, για να υπολογιστεί η τροχιά σωματιδίων στο ηλεκτρικό πεδίο που λαμβάνουμε από το CST, θα χρειαστεί να κάνουμε παρεμβολή για τη θέση του σωματιδίου σε κάθε χρονική στιγμή, για να βρούμε την τιμή του πεδίου στη θέση αυτή και να υπολογίσουμε την επόμενη. Η παρεμβολή αυτή απαιτεί τα δεδομένα να βρίσκονται σε μορφή mesh.

Έτσι, μετατρέπουμε τον πίνακα που λαμβάνουμε από το προηγούμενο πίνακα σε ένα “cell array” που περιέχει ως στοιχεία πίνακες σε mesh format, έναν για κάθε χρονική στιγμή. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται με τη συνάρτηση `convertFieldDataToCell.m`.

Τμήμα του κώδικα της συνάρτησης φαίνεται στον Κώδικα 3.6. Δεν παρατίθεται το κομμάτι που κάνει αλλαγές στη σειρά αποθήκευσης των μεταβλητών μέσα στο cell.

```

1 function Field = importField(filename)
2 %IMPORTFIELD Imports data created by ASCII export of the field
3 % in CST to a .mat file
4
5 % preprocess file for preallocation
6
7 % open file
8 fid = fopen(filename,'r');
9 while(~feof(fid))
10     % read line and convert it to array
11     line = fgetl(fid);
12     lineArray = str2num(line);
13
14
15     if (length(lineArray) > 1)
16         % if we have data save it
17         Field(currentSample, currentDataPoint, :) = ...
18             lineArray(1:6);
19         currentDataPoint = currentDataPoint + 1;
20     else
21         % if not prepare for the next sample
22         currentSample = currentSample + 1;
23         currentDataPoint = 1;
24     end
25 end
26
27 fclose(fid);
28
29 end

```

Κώδικας 3.5: Τμήμα της συνάρτησης importField.m.

```

1 function FieldCell = convertFieldDataToCell(Field)
2 %CONVERTFIELDDATATOCELL Converts the input file which is in
3 % the CST format into a cell array with mesh format.
4 % The format of the input file is timeslotsXpositionsXvalues.
5 % This is not usable to do any interpolation. This function
6 % converts it to a cell array where each cell contains the
7 % data for each timestep in mesh format.
8 % Output format: FieldCell{timestep, coordinate},
9 % where coordinate is 1: x, 2:y, 3:z, 4:Ex, 5:Ey, 6:Ez
10
11
12
13
14
15
16
17     for currTime = 1:timeslots
18         % take values from input
19         xs = Field(currTime, :, 1);
20         ys = Field(currTime, :, 2);
21         zs = Field(currTime, :, 3);
22         exs = Field(currTime, :, 4);
23         eys = Field(currTime, :, 5);
24         ezs = Field(currTime, :, 6);
25
26         % calculate number of x, y and z points
27         dim1 = length(unique(xs));
28         dim2 = length(unique(ys));
29         dim3 = length(unique(zs));
30
31         % from 1d array to 3d mesh-like matrix
32         Xtemp = reshape(xs, [dim1, dim2, dim3]);
33         Ytemp = reshape(ys, [dim1, dim2, dim3]);
34         Ztemp = reshape(zs, [dim1, dim2, dim3]);
35         ExTemp = reshape(exs, [dim1, dim2, dim3]);
36         EyTemp = reshape(eys, [dim1, dim2, dim3]);
37         EzTemp = reshape(ezs, [dim1, dim2, dim3]);
38
39         % store data to the cell
40         FieldCell{currTime, 1} = X;
41         FieldCell{currTime, 2} = Y;
42         FieldCell{currTime, 3} = Z;
43         FieldCell{currTime, 4} = Ex;
44         FieldCell{currTime, 5} = Ey;
45         FieldCell{currTime, 6} = Ez;
46
47     end
48
49
50 end

```

Κώδικας 3.6: Τυήμα της συνάρτησης convertFieldDataToCell.m.

### 3.4.5 Υπολογισμός των τροχιών της δέσμης ανίχνευσης

Στην τελευταία φάση της διαδικασίας υπολογίζουμε τις τροχιές της δέσμης ανίχνευσης. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής: ξεκινώντας από την πρώτη χρονική στιγμή, δημιουργούμε ένα σωματίδιο κάθε χρονική στιγμή στη θέση αφετηρίας της δέσμης ανίχνευσης, με δεδομένη αρχική ταχύτητα. Στη συνέχεια, υπολογίζουμε για καθένα από τα σωματίδια το διάνυσμα  $(x, y, z; v_x, v_y, v_z)$ , δεδομένης της τιμής του πεδίου στη θέση που βρίσκεται το σωματίδιο. Σε περίπτωση που το ηλεκτρικό πεδίο δεν είναι καθορισμένο στη συγκεκριμένη θέση, γίνεται γραμμική παρεμβολή για τον υπολογισμό της τιμής του, κάνοντας χρήση της συνάρτησης του MATLAB `interp3`.

Για την υλοποίηση της διαδικασίας αυτής υλοποιήθηκαν 4 συναρτήσεις.

Για τον υπολογισμό του διανύσματος  $(x, y, z; v_x, v_y, v_z)$  στην επόμενη θέση, δημιουργήθηκε η συνάρτηση `calcNextPosition.m`. Αυτή υπολογίζει τη νέα θέση σύμφωνα με την εξίσωση

$$\vec{s}_{\text{new}} = \vec{s}_{\text{old}} + \vec{v}_{\text{old}} \Delta t \quad (3.7)$$

και στη συνέχεια, αφού υπολογιστεί η τιμή του μαγνητικού πεδίου  $\vec{E}_{\text{new}}$  στη νέα θέση, υπολογίζεται η νέα ταχύτητα με βάση την εξίσωση

$$\vec{v}_{\text{new}} = \vec{v}_{\text{old}} + \vec{E}_{\text{new}} \frac{q_e \Delta t}{m_e} \quad (3.8)$$

Η συνάρτηση `calcNextPosition.m` φαίνεται στον Κώδικα 3.7.

Για τον υπολογισμό της τιμής του μαγνητικού πεδίου  $\vec{E}_{\text{new}}$  σε δεδομένη θέση, δημιουργήθηκε η συνάρτηση `calcField.m`, η οποία πραγματοποιεί τη γραμμική παρεμβολή που αναφέρθηκε παραπάνω. Η συνάρτηση `calcField.m` φαίνεται στον Κώδικα 3.8.

Η υλοποίηση της μεθόδου γίνεται στο σχετικό script, τμήμα του οποίου παρατίθεται στον Κώδικα 3.9.

```
1 function [pos_new, v_new, t_new] = calcNextPosition(...  
2     pos_old, v_old, t_old, E_field, timeUnit, finalTime)  
3 %CALCNEXTPOSITION Calculates the position and velocity of a  
4 %particle moving inside an electric field  
5  
6     % update position: x1 = x0 + v_x0t  
7     pos_new = pos_old + v_old .* timeUnit;  
8  
9     % constants  
10    m_e = 9.1093829140e-31; % kilograms  
11    q_e = -1.60217656535e-19; % coulomb  
12    const1 = q_e * timeUnit / m_e;  
13    % update field  
14    if (t_new <= finalTime)  
15        E_new = calcField(pos_new, E_field, t_new, ...  
16                           timeUnit);  
17  
18        % update velocity v1 = v0 + E1 * const1  
19        v_new = v_old + E_new .* const1;  
20    else  
21        %we are out of data  
22        v_new = NaN(1,3);  
23    end  
24  
25 end
```

Κώδικας 3.7: Η συνάρτηση calcNextPosition.m.

```

1 function E_new = calcField(pos, Field, t, timeUnit)
2 %CALCFIELD Calculates the field in the position pos from the
3 % data in Field. If the position is not in the datapoints
4 % it uses cubic interpolation to calculate the field
5
6
7 sampleNo = round(t/timeUnit);
8 % round because it sometimes gives result as double
9
10 Xq = pos(1); Yq = pos(2); Zq = pos(3);
11
12 X = Field{sampleNo, 1}; Ex = Field{sampleNo, 4};
13 Y = Field{sampleNo, 2}; Ey = Field{sampleNo, 5};
14 Z = Field{sampleNo, 3}; Ez = Field{sampleNo, 6};
15
16 Exq = interp3(X, Y, Z, Ex, Xq, Yq, Zq, 'linear');
17 Eyq = interp3(X, Y, Z, Ey, Xq, Yq, Zq, 'linear');
18 Ezq = interp3(X, Y, Z, Ez, Xq, Yq, Zq, 'linear');
19
20 E_new = [Exq, Eyq, Ezq];
21
22 end

```

Κώδικας 3.8: Η συνάρτηση calcField.m.

```

54 while (true)
55     % create particle
56     NoOfParticles = NoOfParticles + 1;
57     pos_old = startingPos(1:3);
58     v_old = startingPos(4:6);
59     t_old = timeZero + (NoOfParticles - 1) * timeUnit;
60     hasReachedMonitor = false;
61     timeStepsTravelling = 0;
62
63     % put it through the pipe and save its final position
64     while (not(hasReachedMonitor))
65         % travel in field until it reaches final destination
66         % record final position, velocity and time
67         % position = (x, y, z, v_x, v_y, v_z)
68         % calculate position and velocity in the next step
69         [pos_new, v_new, t_new] = calcNextPosition(pos_old, ...
70             v_old, t_old, Field, timeUnit, finalTime);
71         timeStepsTravelling = timeStepsTravelling + 1;
72         % did we run out of field data?
73         if (t_new >= finalTime)
74             break;
75     end
76
77     % update current position for next iteration
78     pos_old = pos_new;
79     v_old = v_new;
80     t_old = t_new;
81 end
82
83 % did the particle reach its final position?
84 if (hasReachedMonitor)
85     % save the final position
86     % TODO optimize with non-dynamical allocation
87     finalPositions = [finalPositions; endPos];
88 else
89     % we're done here, there is no more data
90     break;
91 end
92
93 end

```

Κώδικας 3.9: Τυήχα του script που εκτελεί τον υπολογισμό της τροχιάς για ένα σωματίδιο.



## Κεφάλαιο 4

# Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και προγραμμάτων που υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Η αναλυτική περιγραφή του τρόπου προσομοίωσης και υλοποίησης παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3, ενώ η θεωρητική ανάλυση παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 2. Επιγραμματικά, παρουσιάζονται:

- Τα αποτελέσματα της μελέτης επιρροής μεταβλητών σε έναν Electron Beam Scanner με βάση το θεωρητικό μοντέλο, όπως υλοποιήθηκε στο MATLAB
- Τα αποτελέσματα της μελέτης επιρροής μεταβλητών σε έναν Electron Beam Scanner, όπως αυτός προσομοιώνεται στο CST
- Τα αποτελέσματα της πλήρους προσομοίωσης ενός Electron Beam Scanner στο CST για πολλαπλές δέσμες
- Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που χρησιμοποιεί το CST ως το μέσο υπολογισμού του ηλεκτρικού πεδίου της κύριας δέσμης και στη συνέχεια το MATLAB για τον υπολογισμό των τροχιών των σωματιδίων της δέσμης ανίχνευσης μέσα στο πεδίο που εξάγεται από το CST

### 4.1 Επίδραση παραμέτρων του επιταχυντή στην ανίχνευση της δέσμης

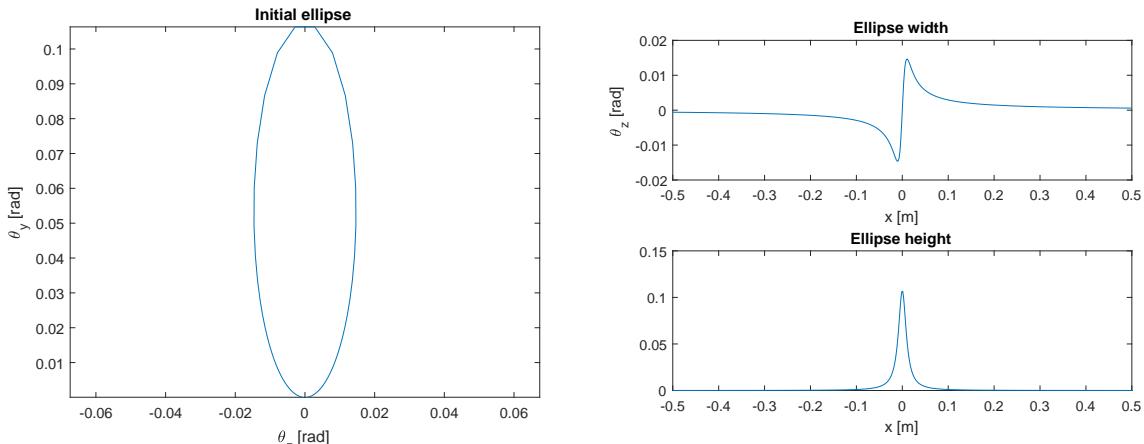
Στην ενότητα αυτή θα δούμε τα αποτελέσματα της επιρροής των παραμέτρων που αναφέρθηκαν στα στοιχεία της χαρακτηριστικής έλλειψης της δέσμης. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν επαναλαμβάνονται εδώ για τη διευκόλυνση του αναγνώστη:

1. Ένταση της κύριας δέσμης  $Q_i$  (ανά παλμό)
2. Μήκος της κύριας δέσμης  $\sigma$
3. Αρχική θέση ριπής  $\rho$  κατά  $Y$
4. Τάση της δέσμης ανίχνευσης  $V$

Η μελέτη της επιρροής των παραμέτρων έγινε αρχικά με υλοποίηση του μοντέλου που παρουσιάστηκε στην Υπο-Ενότητα 2.2.3 στο MATLAB. Στη συνέχεια εξετάστηκε η επιρροή των ίδιων μεγεθών στο προσομοιωτικό περιβάλλον του CST.

#### 4.1.1 Αποτελέσματα μελέτης θεωρητικού μοντέλου στο MATLAB

Αρχικά υπολογίστηκε και παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση της χαρακτηριστικής έλλειψης στις αρχικές τιμές των παραμέτρων. Η χαρακτηριστική έλλειψη, όπως προκύπτει από τη χρήση των αρχικών τιμών των παραμέτρων (Πίνακας 3.1) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.



(α') Η χαρακτηριστική έλλειψη στην αρχική κατάσταση.

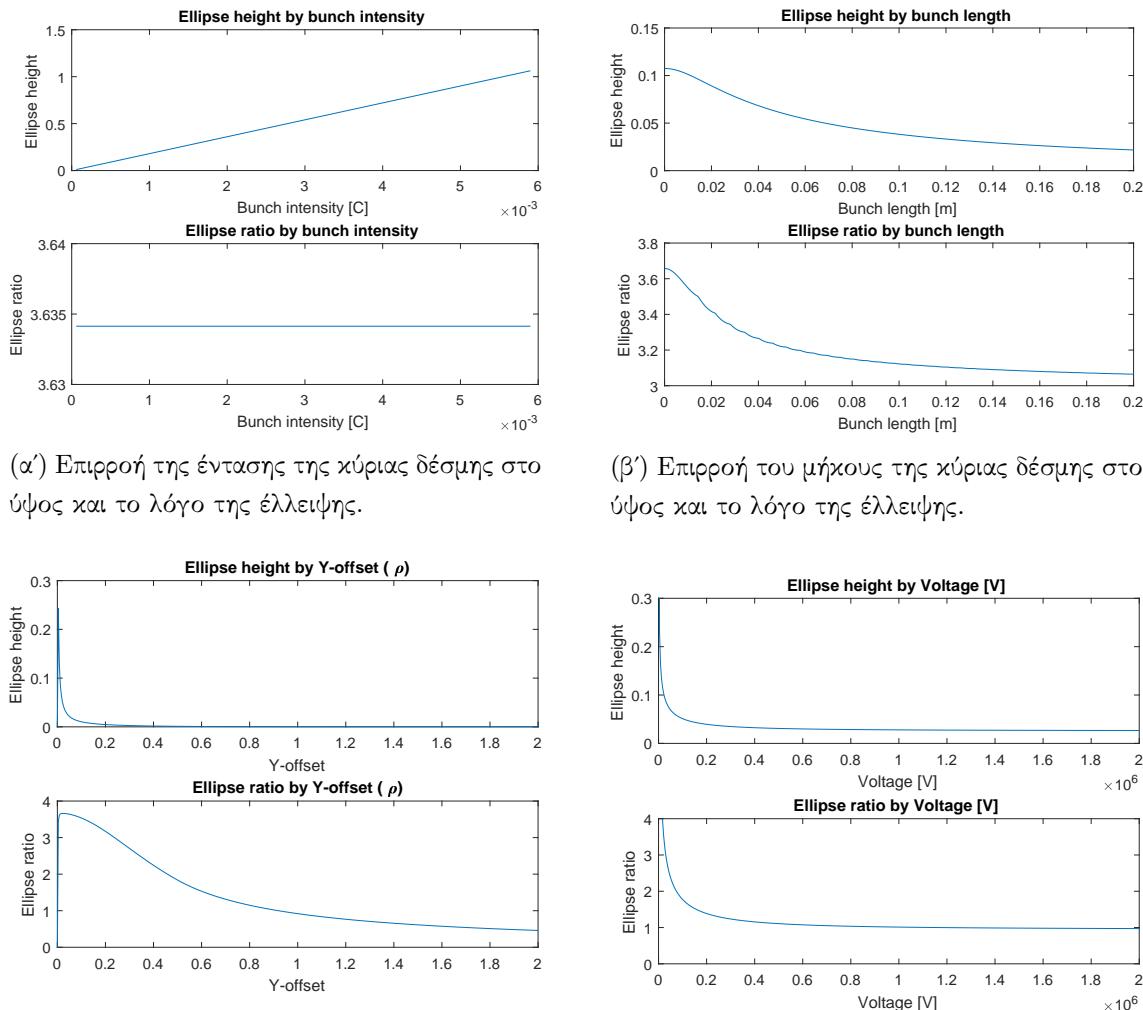
(β') Το πλάτος και ο ύψος της χαρακτηριστικής έλλειψης στην αρχική κατάσταση.

Σχήμα 4.1: Απεικόνιση και στοιχεία της χαρακτηριστικής έλλειψης στην αρχική κατάσταση.

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε και παρουσιάζεται ο τρόπος επιρροής των παραμέτρων που αναφέρθηκαν, στο εύρος τιμών του Πίνακα 3.2.

Από το Σχήμα 4.2 μπορεί κανείς να παρατηρήσει τα εξής:

- Η ένταση της δέσμης έχει γραμμική σχέση με το ύψος της έλλειψης, αλλά ο λόγος δεν επηρεάζεται, και άρα δεν εξαρτάται από αυτήν.
- Όσο αυξάνεται το μήκος της κύριας δέσμης μειώνεται το ύψος της έλλειψης. Μειώνεται επίσης και ο λόγος της έλλειψης, αλλά πολύ λιγότερο.
- Η αύξηση της αρχικής θέσης ριπής οδηγεί σε ραγδαία μείωση του ύψους και του λόγου της έλλειψης.
- Η τάση της κύριας δέσμης προκαλεί μείωση του ύψους και λόγου της έλλειψης, για μικρές τιμές της. Μετά τα  $3 \times 10^5$  kV περίπου η επιπλέον αύξηση της τάσης δεν προκαλεί αλλαγές στην έλλειψη.



(α') Επιρροή της έντασης της κύριας δέσμης στο ύψος και το λόγο της έλλειψης.

(β') Επιρροή του μήκους της κύριας δέσμης στο ύψος και το λόγο της έλλειψης.

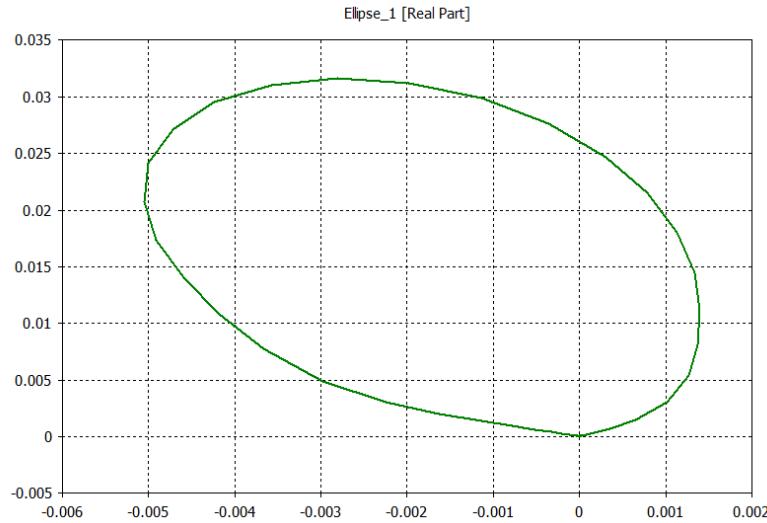
(γ') Επιρροή της αρχικής θέσης ριπής (Y-offset) της δέσμης ανίχνευσης στο ύψος και το λόγο της έλλειψης.

(δ') Επιρροή της διαφοράς δυναμικού της κύριας δέσμης στο ύψος και το λόγο της έλλειψης.

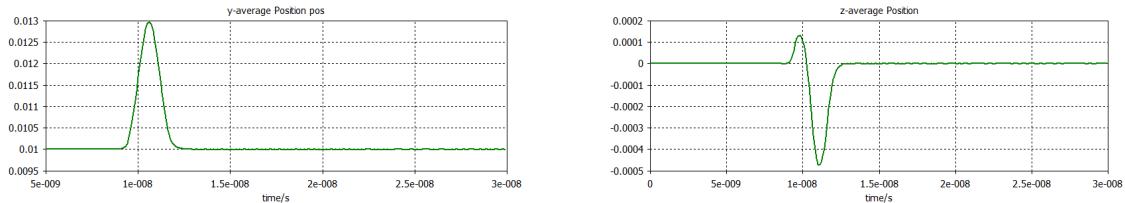
Σχήμα 4.2: Παρουσίαση της επιρροής των παραμέτρων στο πλάτος και το λόγο της έλλειψης, σύμφωνα με το θεωρητικό μοντέλο, όπως υλοποιήθηκε στο MATLAB.

#### 4.1.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο CST

Όμοια με παραπάνω, αρχικά υπολογίστηκε και παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση της χαρακτηριστικής έλλειψης στις αρχικές τιμές των παραμέτρων. Η χαρακτηριστική έλλειψη, όπως προκύπτει από τη χρήση των αρχικών τιμών των παραμέτρων (Πίνακας 3.1) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3.



(α') Η χαρακτηριστική έλλειψη στην αρχική κατάσταση.



(β') Το ύψος της χαρακτηριστικής έλλειψης στην αρχική κατάσταση.

(γ') Το πλάτος της χαρακτηριστικής έλλειψης στην αρχική κατάσταση.

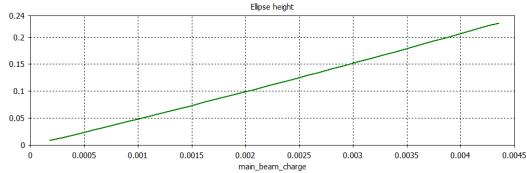
Σχήμα 4.3: Απεικόνιση και στοιχεία της χαρακτηριστικής έλλειψης στην αρχική κατάσταση.

Παρατηρούμε ότι η έλλειψη έχει μια μικρή θετική περιστροφή, λόγω του ότι το πλάτος της χαρακτηριστικής έλλειψης στο Σχήμα 4.3 (γ') παρουσιάζει ελάχιστο για τιμή μεγαλύτερη (κατά απόλυτη τιμή) από την τιμή για την οποία παρουσιάζει μέγιστο.

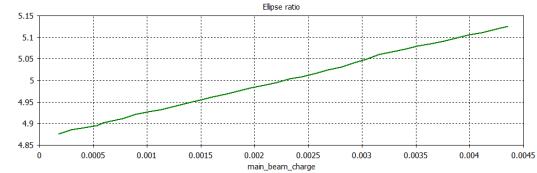
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι επιρροές των μεταβολών των μεταβλητών στο ύψος και το λόγο της έλλειψης.

Από το Σχήμα 4.4 μπορεί κανείς να παρατηρήσει τα εξής:

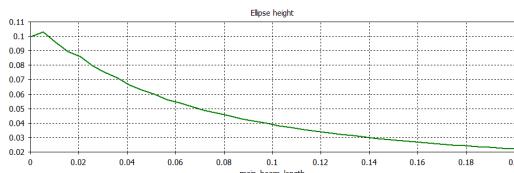
- Η ένταση της δέσμης έχει γραμμική σχέση με το ύψος της έλλειψης. Έχει επίσης γραμμική σχέση με το λόγο της έλλειψης, αλλά η κλίση της καμπύλης είναι σημαντικά μικρότερη.
- Με εξαίρεση τα πρώτα δείγματα, όσο αυξάνεται το μήκος της κύριας δέσμης μειώνεται το ύψος της έλλειψης. Ο λόγος της έλλειψης μειώνεται επίσης ως ένα σημείο όπου



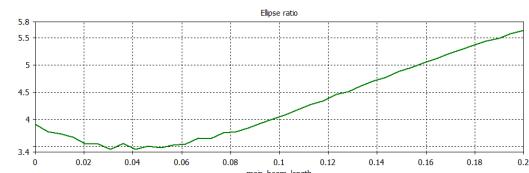
(α') Επιρροή της έντασης της κύριας δέσμης στο ύψος της έλλειψης.



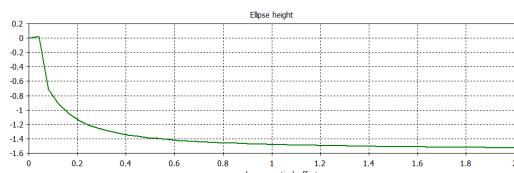
(β') Επιρροή της έντασης της κύριας δέσμης στο λόγο της έλλειψης.



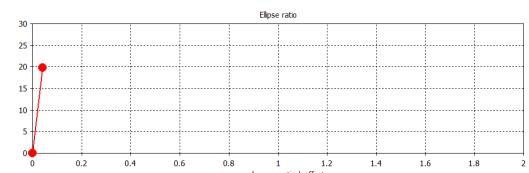
(γ') Επιρροή του μήκους της κύριας δέσμης στο ύψος της έλλειψης.



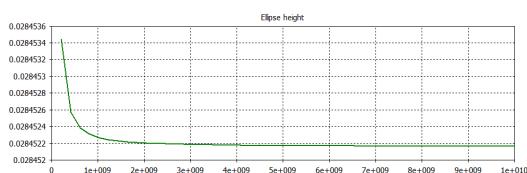
(δ') Επιρροή του μήκους της κύριας δέσμης στο λόγο της έλλειψης.



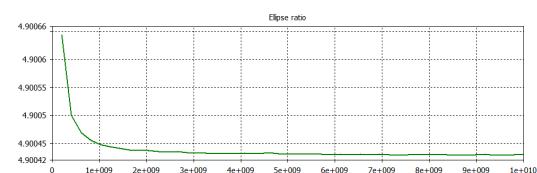
(ε') Επιρροή της αρχικής θέσης ριπής ( $Y$ -offset) της δέσμης ανίχνευσης στο ύψος της έλλειψης.



(φ') Επιρροή της αρχικής θέσης ριπής ( $Y$ -offset) της δέσμης ανίχνευσης στον λόγο της έλλειψης.



(ζ') Επιρροή της διαφοράς δυναμικού της κύριας δέσμης στο ύψος της έλλειψης.



(η') Επιρροή της διαφοράς δυναμικού της κύριας δέσμης στον λόγο της έλλειψης.

Σχήμα 4.4: Παρουσίαση της επιρροής των παραμέτρων στο πλάτος και το λόγο της έλλειψης στο περιβάλλον προσομοίωσης του CST.

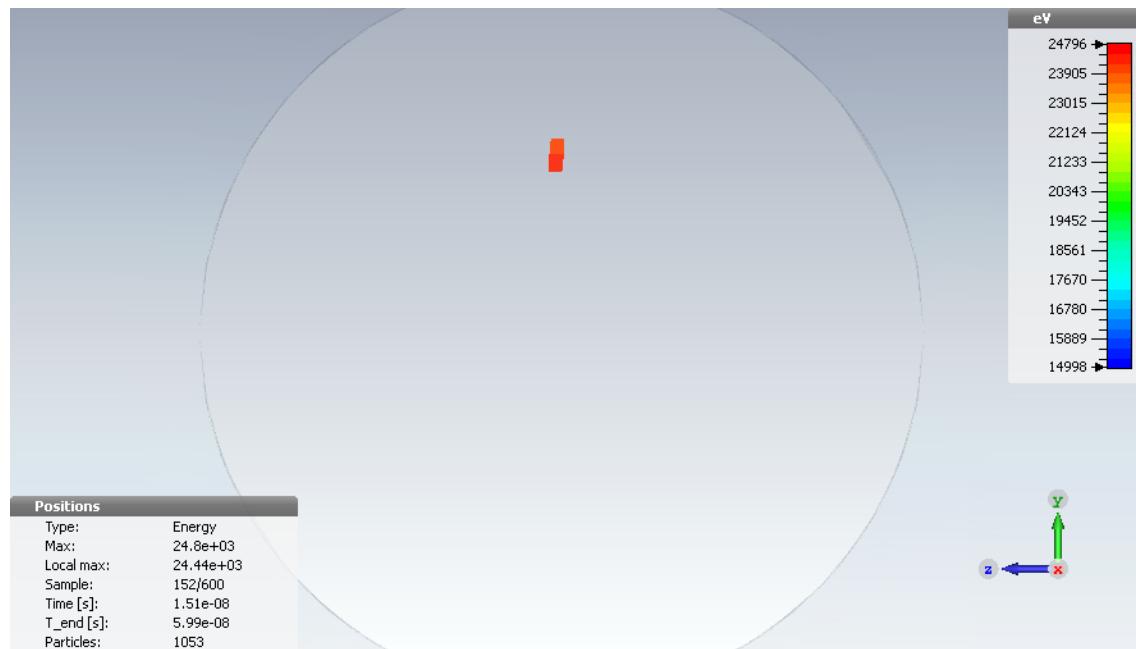
παρουσιάζει ελάχιστο, και στη συνέχεια αυξάνεται.

- Η αύξηση της αρχικής υδρογόνης οδηγεί στην αδυναμία μέτρησης, καθώς μειώνεται η επιρροή της κύριας δέσμης στη δέσμη ανίχνευσης. Βλέπουμε ότι ο λόγος της έλλειψης στο Σχήμα 4.4 ( $\tau'$ ) σταματά να έχει δείγματα μετά τα πρώτα 2, γι' αυτό και έχει σημειωθεί με κόκκινο χρώμα. Επίσης, το ύψος της δέσμης παίρνει τιμές που δεν έχουν νόημα. Αυτό γίνεται διότι η απόκλιση κατά  $Z$  είναι μηδενική, με αποτέλεσμα να ισχύει  $\theta_z = 0$  και να απειρίζεται ο λόγος.
- Η τάση της κύριας δέσμης πρακτικά δεν προκαλεί καμία επίδραση τόσο στο ύψος όσο και στο λόγο της έλλειψης.

## 4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης της μεθόδου στο CST

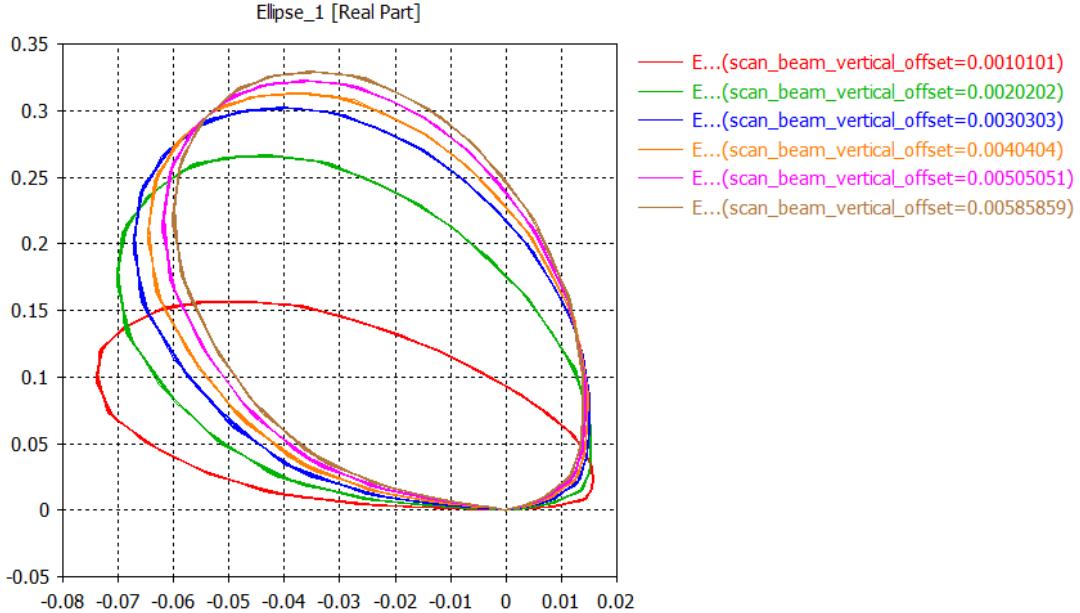
Σε αυτή την υπο-ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου που δημιουργήθηκε στο CST. Για την αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας δημιουργίας του μοντέλου, μπορεί κανείς να ανατρέξει στην Ενότητα 3.3. Επίσης, στο Παράρτημα Β' μπορεί ο αναγνώστης να δει τις τιμές όλων των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν, τις μεθόδους επεξεργασίας εντός του CST, καθώς και τις μονάδες του συστήματος.

Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται το ίχνος της δέσμης ανίχνευσης, όπως αυτό φαίνεται στον PIC 2D Monitor του CST. Το στίγμα αυτό εκτελεί ελλειπτική τροχιά δεξιόστροφα κατά το πέρασμα της κύριας δέσμης από το σημείο ανίχνευσης. Το μέγιστο ύψος της έλλειψης αποθηκεύεται και η σειρά των διαδοχικών υψών, αφού παραγωγιστεί ως προς το αρχικό σημείο ριπής, δίνει την εκτίμηση του προφίλ της κύριας δέσμης.



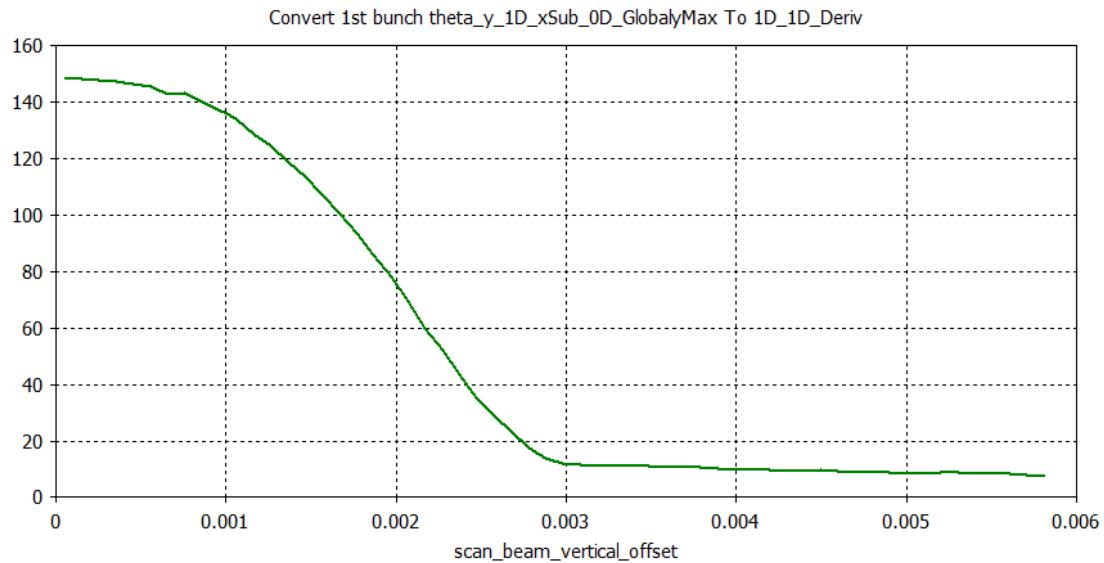
Σχήμα 4.5: Στιγμιότυπο ίχνους της δέσμης ανίχνευσης στον PIC 2D monitor.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6 οι χαρακτηριστικές ελλείψεις που προκύπτουν για διάφορες τιμές της αρχικής θέσης ριπής  $\rho$ , ή scan\_beam\_vertical\_offset όπως είναι στο CST. Παρατηρούμε ότι για μεγαλύτερες τιμές του  $\rho$ , η χαρακτηριστική έλλειψη μετατοπίζει τον κύριο άξονα της δεξιόστροφα. Παρόλα αυτά, μετά από ένα σημείο θα χαθεί το στίγμα και άρα η αποτύπωση της δέσμης ως έλλειψη, όταν πλέον το  $\rho$  μεγαλώσει σε σχέση με την ακτίνα της κύριας δέσμης.

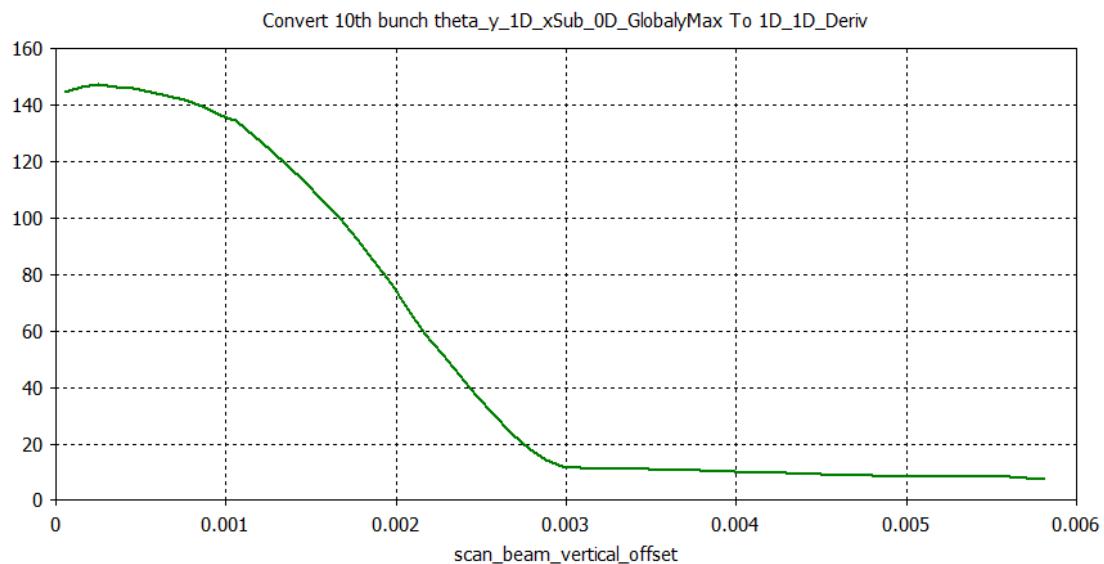


Σχήμα 4.6: Η μορφή της χαρακτηριστικής έλλειψης για διάφορες τιμές της αρχικής θέσης ριπής  $\rho$ .

Τέλος, παρατίθεται στο Σχήμα 4.7 το τελικό αποτέλεσμα του Electron Beam Scanner. Βλέπουμε ότι οι κατανομές των δεσμών είναι ομαλές και μοιάζουν πολύ με Gaussian. Επίσης, βλέπουμε ότι οι διαφορές μεταξύ της 1<sup>η</sup> και 10<sup>η</sup> δέσμης είναι μηδαμινές και παρατηρούνται κυρίως στα πρώτα δείγμα, για μικρές δηλαδή τιμές του  $\rho$ . Τα αποτελέσματα είναι εξαιρετικά ικανοποιητικά και μας δείχνουν ότι πλέον έχουμε ένα αρκετά ακριβές μοντέλο για την προσομοίωση του Electron Beam Scanner.



(α') Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την εκτίμηση του προφίλ της 1<sup>ης</sup> δέσμης.



(β') Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την εκτίμηση του προφίλ της 10<sup>ης</sup> δέσμης.

Σχήμα 4.7: Σύγκριση της εκτίμησης για την 1<sup>η</sup> και 10<sup>η</sup> δέσμη σωματιδίων της κύριας δέσμης στο CST.

## Κεφάλαιο 5

# Επίλογος

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τη διπλωματική εργασία, καθώς και ενδεχόμενες μελλοντικές επεκτάσεις όσων παρουσιάστηκαν.

### 5.1 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διπλωματική είναι τα παρακάτω:

- Το CST είναι ένα εργαλείο που μπορεί να αντεπεξέλθει αποτελεσματικά στις ανάγκες της έρευνας στην κατεύθυνση εναλλακτικών τρόπων σάρωσης του προφίλ δεσμών ηλεκτρονίων, με χρήση του εξαιρετικά ισχυρού CST Particle Studio και του particle-in-cell (PIC) solver.
- Για πολλαπλές επαναλαμβανόμενες προσομοιώσεις όπου το CST θα πρέπει να υπολογίζει ίδιες τροχιές, καθίσταται μη αποδοτικό λόγω περιορισμών του προγράμματος στο να χαρακτηρίζονται τμήματα της προσομοίωσης ως “όχι απαραίτητα για υπολογισμό εκ νέου σε κάθε προσομοίωση”. Για τέτοιες περιπτώσεις η επιστράτευση εργαλείων όπως το MATLAB διευκολύνει την απόδοση και αυξάνει την ελευθερία διαχείρισης των αποτελεσμάτων στον χρήστη τους.
- Ο Electron Beam Scanner αποτελεί έναν τρόπο ανίχνευσης του εγκάρσιου προφίλ δέσμης σωματιδίων ο οποίος, μετά από μια αρχική ανάλυση, φαίνεται να είναι ένας από τους πολλά υποσχόμενους τρόπους μη επεμβατικής ανίχνευσης.

### 5.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το σύστημα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να βελτιωθεί και να επεκταθεί περαιτέρω, τουλάχιστον ως προς τρεις κατευθύνσεις. Συγκεκριμένα:

1. Βελτιστοποίηση της απόδοσης του μοντέλου στο CST.

Παρά το γεγονός ότι η διαμόρφωση του τελικού μοντέλου στο CST είναι αποτέλεσμα πολύμηνης ασχολίας και προσπάθειας συνεχούς βελτιστοποίησης, σε συνεργασία και με την ίδια την ομάδα υποστήριξης του CST, πάντα υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης. Συγκεκριμένα, σαν επόμενο βήμα θα βλέπαμε τον εντοπισμό ακριβώς όσων δεδομένων μας είναι χρήσιμα για την εξαγωγή του προφίλ, κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της προσομοίωσης, και την προσαρμογή του μοντέλου έτσι, ώστε τα δεδομένα που δεν μας είναι χρήσιμα να μην υπολογίζονται και να μην αποθηκεύονται. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους, όπως τη δημιουργία πυκνότερου και αραιότερου πλέγματος σε άλλα σημεία της προσομοίωσης και με τη εξέταση δημιουργίας επιπλέον macros σε Visual Basic στο CST.

Επιπλέον, το μοντέλο μπορεί να χωριστεί σε δύο ξεχωριστά CST projects, όπου στο ένα θα προσομοιώνεται η λειτουργία μόνο της κύριας δέσμης, και στο δεύτερο θα εισάγεται αυτό που προσομοιώθηκε στο πρώτο και θα προσομοιώνεται εκεί η λειτουργία της δευτερεύουσας δέσμης. Κατά το χρόνο συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας η συγκεκριμένη λειτουργία δεν υποστηρίζοταν από τον particle-in-cell (PIC) solver, αλλά υποστηρίζεται από άλλους. Μετά από επικοινωνία με την ομάδα υποστήριξης του CST, ενημερωθήκαμε ότι αυτό αποτελεί feature που έχει προγραμματιστεί να προστεθεί σε επόμενες εκδόσεις του προγράμματος.

## 2. Βελτιστοποίηση της ταχύτητας εκτέλεσης της προσομοίωσης στο MATLAB.

Όπως κάθε τύπου προσομοίωσης ή προγράμματος, έτσι και το πρόγραμμα εισαγωγής του ηλεκτρικού πεδίου της κύριας δέσμης από το CST στο MATLAB και η προσομοίωσης της δέσμης ανίχνευσης επιδέχεται βελτιώσεων. Δεδομένου ότι εν τέλει αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η μέγιστη απόκλιση της δέσμης ανίχνευσης κατά τον άξονα  $Y$ , για τις διάφορες αρχικές θέσεις ριπής, μια αναλυτική μελέτη του εισαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να μας δώσει πληροφορίες που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για την προ-επεξεργασία του ηλεκτρικού πεδίου, καθώς και την μείωση των τροχιών που υπολογίζονται μέχρι τέλους, αν αυτές δεν θα αποτελούν “υποψήφια τροχιά που θα δώσει μέγιστο  $\theta_y$ .

## 3. Επαλήθευση των αποτελεσμάτων που λαμβάνουμε προσομοιωτικά με πειραματικά αποτέλεσματα.

Η μέθοδος της προσομοίωσης είναι εξαιρετικά βοηθητική για την εξαγωγή συμπερασμάτων για το κατά πόσο η μέθοδός που εξετάσαμε είναι αποτελεσματική και υλοποίησιμη. Παρόλα αυτά, η δημιουργία πειραματικών διατάξεων θα είναι το επόμενο βήμα για την αξιολόγηση της ακρίβειας της μεθόδου, και της σχέσης ακρίβειας και τιμής, ώστε εν τέλει να παρθεί η απόφαση αν έχει νόημα η επιπλέον έρευνα για τη χρήση του Electron Beam Scanner σε γραμμικούς επιταχυντές με υψηλές ενέργειες όπως τον CLIC.





# Βιβλιογραφία

- [1] M Aicheler, P Burrows, M Draper, T Garvey, P Lebrun, K Peach, N Phinney, H Schmickler, D Schulte και N Toge, επιμελητές. *A Multi-TeV linear collider based on CLIC technology: CLIC Conceptual Design Report*. CERN, Geneva, 2012.
- [2] A Aleksandrov, S Assadi, S Cousineau, V Danilov, S Henderson, M Plum, P Logatchev και A Starostenko. Feasibility study of using an electron beam for profile measurements in the SNS accumulator ring. Στο *Proc. PAC*, σελίδες 2586–2588, Knoxville, 2005.
- [3] S Baird. *Accelerators for Pedestrians*. CERN, Geneva, 2007.
- [4] C Biscari, D Alesini, A Ghigo, F Marcellini και B Jeanneret. CLIC drive beam frequency multiplication system design. Στο *Proc. PAC*, σελίδες 2673–2675, Vancouver, 2009.
- [5] W Blokland, S Aleksandrov, S Cousineau, D Malyutin και S Starostenko. Electron scanner for SNS ring profile measurements. Στο *Proc. DIPAC*, σελίδες 155–157, Basel, 2009.
- [6] J Bosser, C Dimopoulou, A Feschenko και R Maccaferri. Transverse profile monitor using ion probe beams. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A484(1-3):1–16, 2002.
- [7] A Degiovanni, S Doeberl, W Farabolini, A Grudiev, J Kovermann, E Montesinos, G Riddone, I Syratchev, R Wegner, W Wuensch, A Solodko και B Woolley. High-gradient test results from a CLIC prototype accelerating structure: TD26CC. Στο *Proc. IPAC*, σελίδες 2285–2287, Dresden, 2014.
- [8] V Dudnikov και A Aleksandrov. Ribbon electron beam profile monitor for bunched beam tomography. Στο *Proc. IPAC*, σελίδες 472–474, New Orleans, 2012.
- [9] G Forshaw J, Smith. *Dynamics and Relativity*. Manchester Physics Series. Wiley, 2014.
- [10] P Gross, R Dölling, T Weis, H Klein, J Pozimski και J Wiegand. An electron beam probe for ion beam diagnosis. Στο *Proc. EPAC*, σελίδες 806–808, Nice, 1990.

- [11] P V Logatchov, P A Bak, A A Starostenko, N S Dikansky, V S Tupikov, K V Gubin, V M Mishnev, M B Korabelnikov και M G Fedotov. Non-destructive singlepass monitor of longitudinal charge distribution in an ultrarelativistic electron bunch. Στο *Proc. PAC*, σελίδες 2167–2169, New York, 1999.
- [12] P V Logatchov, D A Malyutin και A A Starostenko. Low energy electron beam as a nondestructive diagnostic tool for high power beams. Στο *Proc. RuPAC*, σελίδες 40–42, Novosibirsk, 2006.
- [13] J A Pasour και M T Ngo. Nonperturbing electron beam probe to diagnose charged-particle beams. *Review of Scientific Instruments*, 63(5):3027–3039, 1992.
- [14] J A Pasour και M T Ngo. Ion probe for beam position and profile measurement. Στο *Proc. AIP*, τόμος 333, σελίδες 377–383, 1995.
- [15] P K Roy, S S Yu, E Henestroza, S Eylon, D B Shuman, J Ludvig, F M Bieniosek, W L Waldron, W G Greenway, D L Vanecek, R Hannink και M Amezcuia. Electron-beam diagnostic for space-charge measurement of an ion beam. *Review of Scientific Instruments*, 76, 2005.
- [16] V Shestak, C J Kost, R Burge, D B Steski και S Kornak. Electron beam probe for ion beam diagnostics. Τεχνική Αναφορά υπ. αριθμ., TRIUMF TRI-DN-87-36, Vancouver, 1987.
- [17] A A Starostenko, P A Bak, Y A Gusev, N S Dikansky, P V Logatchov και A R Frolov. Non-destructive singlepass bunch length monitor: experiments at VEPP-5 preinjector electron linac. Στο *Proc. EPAC*, σελίδες 1720–1722, Vienna, 2000.
- [18] R Thurman-Keup, JCT Thangaraj, W Blokland, AH Lumpkin, AS Johnson και D Zhang. Initial characterization of a commerical electron gun for profiling high intensity proton beams in project X. Στο *Proc. PAC*, σελίδες 525–527, 2011.
- [19] S Tsujino και H H Braun. Electron fork: noninvasive beam size monitor based on field emitter array. Τεχνική Αναφορά υπ. αριθμ., PSI, Villigen, 2012.
- [20] E Tsyganov, R Meinke, W Nexsen, S Kauffmann, A Zinchenko και A Taratin. Electron beam emittance monitor for the SSC. Στο *Proc. PAC*, σελίδες 2489–2491, Washington D.C., 1993.

## Παράρτημα Α'

# Μεταφράσεις ξένων όρων

### Μετάφραση

Δέσμη Ανίχνευσης  
Δέσμη Οδηγός  
διαμήκες προφίλ δέσμης  
εγκάρσιο προφίλ δέσμης  
επιταχυντής  
Κύρια Δέσμη  
Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων  
προφίλ (χωρική ένταση) δέσμης  
Σαρωτής Δεσμών Ηλεκτρονίων

### Αγγλικός όρος

Probe Beam  
Drive Beam  
longitudinal beam profile  
transverse beam profile  
accelerator  
Main Beam  
Large Hadron Collider (LHC)  
beam profile  
Electron Beam Scanner (EBS)



## Παράρτημα Β'

# Το μοντέλο στο CST Particle Studio

### B'.1 Λίστα παραμέτρων

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται όλες οι παράμετροι που έχει το τελικό CST project που χρησιμοποιήθηκε για την πλήρη προσομοίωση του Electron Beam Scanner.

Όνομα παραμέτρου	Τιμή	Περιγραφή
simulation_time	2e-8	Simulation Time
scan_pipe_length	0.25	Scan pipe length
scan_pipe_diameter	main_pipe_diameter	Scan pipe diameter
scan_monitor_step	1e-10	Scan beam monitor step width
scan_monitor_start_time	0	Scan beam monitor start time
scan_beam_vertical_offset	0.01	Scan Beam vertical offset
scan_beam_rise_time	1e-9	Scan beam rise time
scan_beam_pulse_charge	1	Scan beam charge per pulse
scan_beam_offset	0	Scan beam offset
scan_beam_length	4e-3	Scan beam length (sigma)
scan_beam_energy	2e4	Scan beam energy
scan_beam_emission_lines	5	Scan beam emission lines (density)
scan_beam_diameter	1e-4	Scan beam diameter
scan_beam_cutoff	1e-3	Scan beam cutoff length
scan_beam_current	1e-6	Scan beam current
scan_beam_bunches	1	Scan beam number of bunches

Συνεχίζεται στην επόμενη σελίδα

Πίνακας B'.1: Λίστα παραμέτρων του περιβάλλοντος προσομοίωσης στο CST.

Όνομα παραμέτρου	Τιμή	Περιγραφή
scan_beam_bunch_distances	1e-3	Scan beam distance between bunches
pic_monitor_xcut	3 / 4 *	X coordinate of PIC 2D monitor
scan_pipe_length		
monitor_step_width	5e-10	PIC position monitor step width
main_pipe_length	5	Main pipe length
main_pipe_diameter	0.1	Main pipe diameter
main_beam_rise_time	1e-9	Main beam rise time
main_beam_offset	main_beam_length * 2.01	Main beam offset
main_beam_number_of_bunches	10	Main beam number of bunches
main_beam_lines	7	Main beam emission lines (density)
main_beam_length	0.15	Main beam bunch length (sigma)
main_beam_energy	1e8	Main beam energy
main_beam_diameter	1e-2	Main Beam diameter
main_beam_cutoff	main_beam_length * 2.01	Main beam cutoff length
main_beam_current	4.2	Main beam current
main_beam_charge_per_main_beam_charge	/	Main beam charge per bunch
bunch	70128	
main_beam_charge	590e-6	Main beam charge per pulse
main_beam_bunch_distances	main_beam_length * 10	Main beam distance between bunches

Πίνακας Β'.1: (συνέχεια) Λίστα παραμέτρων του περιβάλλοντος προσομοίωσης στο CST.

## B'.2 Template Based Post Processing

#	Result name	Type	Expression	Template name
1	x-average Position	1D	x-average position	Evaluate PIC 2D monitor with average
2	y-average Position	1D	y-average position	Evaluate PIC 2D monitor with average
3	z-average Position	1D	z-average position	Evaluate PIC 2D monitor with average
4	theta_y	1D	Atn( (y-average Position - scan_beam_vertical_offset) / pic_monitor_xcut)	Mix template results
5	theta_z	1D	Atn( (z-average position - 0) / pic_monitor_xcut)	Mix template results
6	theta_y_1D_xSub	1D	Extract data in subrange, theta_y for $x \in [5 \times 10^{-9}, 1]$	0D or 1D Result from 1D Result
7	1st bunch theta_y_1D_xSub	1D	Extract data in subrange, theta_y for $x \in [0.8 \times 10^{-8}, 1.3 \times 10^{-8}]$	0D or 1D Result from 1D Result
8	10th bunch theta_y_1D_xSub	1D	Extract data in subrange, theta_y for $x \in [5.3 \times 10^{-8}, 5.8 \times 10^{-8}]$	0D or 1D Result from 1D Result
9	theta_z_1D_xSub	1D	Extract data in subrange, theta_z for $x \in [5 \times 10^{-9}, 1]$	0D or 1D Result from 1D Result
10	theta_y_0D_GlobalyMax	0D	Global y-Maximum, theta_y	0D or 1D Result from 1D Result
11	1st bunch theta_y_1D_xSub_0D_GlobalyMax	0D	Global y-Maximum, 1st bunch theta_y_1D_xSub	0D or 1D Result from 1D Result
12	10th bunch theta_y_1D_xSub_0D_GlobalyMax	0D	Global y-Maximum, 10th bunch theta_y_1D_xSub	0D or 1D Result from 1D Result

Συνεχίζεται στην επόμενη σελίδα

Πίνακας B'.2: Οι μεταβλητές και ο τρόπος υπολογισμού τους στο Template Based Post Processing του CST.

#	Result name	Type	Expression	Template name
13	theta_y_1D_xSub_0D_GlobalyMin	0D	Global y-Minimum, 1st bunch theta_y_1D_xSub	0D or 1D Result from 1D Result
14	theta_z_0D_GlobalyMax	0D	Global y-Maximum, theta_z	0D or 1D Result from 1D Result
15	theta_z_0D_GlobalyMin	0D	Global y-Minimum, theta_z	0D or 1D Result from 1D Result
16	Ellipse height	0D	theta_y_0D_GlobalyMax - 0	Mix template results
17	Ellipse width	0D	theta_z_0D_GlobalyMax - theta_z_0D_GlobalyMin	Mix template results
18	Ellipse ratio	0D	Ellipse height / Ellipse width	Mix template results
19	Ellipse	1DC	Parametric X-Y plot, X: theta_z, Y: theta_y	0D or 1D Result from 1D Result
20	Ellipse_1	1DC	Parametric X-Y plot, X: theta_z_1D_xSub, Y: theta_y_1D_xSub	0D or 1D Result from 1D Result
21	Convert theta_y_0D_GlobalyMax To 1D	1D	Table Values in Dependence on Parameter scan_beam_vertical_offset	Convert Template Type
22	Convert 1st bunch theta_y_1D_xSub_0D_GlobalyMax To 1D	1D	Table Values in Dependence on Parameter scan_beam_vertical_offset	Convert Template Type
23	Convert 10th bunch theta_y_1D_xSub_0D_GlobalyMax To 1D	1D	Table Values in Dependence on Parameter scan_beam_vertical_offset	Convert Template Type
24	Convert theta_y_0D_GlobalyMax To 1D_1D_Deriv	1D	Derivative, theta_y_0D_GlobalyMax	0D or 1D Result from 1D Result

Συνεχίζεται στην επόμενη σελίδα

#	Result name	Type	Expression	Template name
25	Convert 1st bunch theta_y_1D_xSub_0D_GlobalyMax To 1D_1D_Deriv	1D	Derivative, 1st bunch theta_y_1D_xSub_0D_GlobalyMax	0D or 1D Result from 1D Result
26	Convert 10th bunch theta_y_1D_xSub_0D_GlobalyMax To 1D_1D_Deriv	1D	Derivative, 10th bunch theta_y_1D_xSub_0D_GlobalyMax	0D or 1D Result from 1D Result

Πίνακας B'.2: (συνέχεια) Οι μεταβλητές και ο τρόπος υπολογισμού τους στο Template Based Post Processing του CST.

Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης
Dimentions	m
Temperature	Kelvin
Frequency	Hz
Time	s
Voltage	V
Current	A
Resistance	Ohm
Conductance	S
Inductance	nH
Capacitance	pF

Πίνακας Β'.3: Οι μονάδες μέτρησης του περιβάλλοντος του CST.

### B'.3 Μονάδες Μέτρησης (Units)

Στον Πίνακα Β'.3 φαίνονται οι μονάδες μέτρησης του περιβάλλοντος στο CST, όπως αυτές ζητείται να οριστούν. Οι μονάδες είναι όλες μονάδες του SI, χωρίς τη χρήση πολλαπλασιαστών (προιθεμάτων), εκτός από τη χωρητικότητα και την επαγωγή, τα οποία δε χρησιμοποιήθηκαν στο project μας.

# Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Το σύστημα δύο δεσμών του CLIC [1]. . . . .	4
2.2	Το σχεδιάγραμμα του CLIC [1]. . . . .	5
2.3	Η μακέτα του CLIC. . . . .	5
2.4	Χάρτης που δείχνει μια πιθανή θέση για τον επιταχυντή CLIC [1]. . . . .	6
2.5	Εικόνες από το CLIC Testing Facility 3. . . . .	7
2.6	Εκτροπή δέσμης ανίχνευσης από την μετρούμενη δέσμη. . . . .	8
2.7	Διαδικασία ανίχνευσης της χαρακτηριστικής έλλειψης της δέσμης [11]. . . . .	10
3.1	Η διάταξη προσομοιωμένη στο CST. . . . .	18
3.2	Η πηγή της κύριας δέσμης στο CST. . . . .	19
3.3	Γραφική παρουσίαση του τρόπου εκτίμησης του προφίλ δέσμης με Electron Beam Scanner [5]. . . . .	20
3.4	Η διαδικασία ανίχνευσης του προφίλ της δέσμης από τον Electron Beam Scanner στο CST. . . . .	21
3.5	Σύγκριση του αποτελέσματος υπολογισμού του προφίλ της δέσμης για $c_{off} = 2$ και $c_{off} = 8.0027$ . . . . .	22
3.6	Παράδειγμα Gaussian συνάρτησης για διάφορες τιμές του συντελεστή $c_{off}$ . . .	23
3.7	Η διάταξη προσομοίωσης του κύριου σωλήνα στο CST. . . . .	26
4.1	Απεικόνιση και στοιχεία της χαρακτηριστικής έλλειψης στην αρχική κατάσταση.	36
4.2	Παρουσίαση της επιρροής των παραμέτρων στο πλάτος και το λόγο της έλλειψης, σύμφωνα με το θεωρητικό μοντέλο, όπως υλοποιήθηκε στο MATLAB. .	37
4.3	Απεικόνιση και στοιχεία της χαρακτηριστικής έλλειψης στην αρχική κατάσταση.	38
4.4	Παρουσίαση της επιρροής των παραμέτρων στο πλάτος και το λόγο της έλλειψης στο περιβάλλον προσομοίωσης του CST. . . . .	39
4.5	Στιγμιότυπο ίχνους της δέσμης ανίχνευσης στον PIC 2D monitor. . . . .	40
4.6	Η μορφή της χαρακτηριστικής έλλειψης για διάφορες τιμές της αρχικής θέσης ριπής $\rho$ .	41
4.7	Σύγκριση της εκτίμησης για την $1^{\text{η}}$ και $10^{\text{η}}$ δέσμη σωματιδίων της κύριας δέσμης στο CST. . . . .	42



# Κατάλογος Πινάκων

2.1	Σχετικές παράμετροι για την Δέσμη Οδηγό του επιταχυντή CLIC.	10
3.1	Οι αρχικές τιμές των παραμέτρων που μελετήθηκαν.	15
3.2	Το εύρος των παραμέτρων που μελετήθηκαν στην μελέτη επιρροής μεταβλητών.	15
3.3	Αντιστοιχία των μεταβλητών που μελετήθηκαν με το αντίστοιχο μέγεθος στο μοντέλο του CST.	16
B'.1	Λίστα παραμέτρων του περιβάλλοντος προσομοίωσης στο CST.	51
B'.2	Οι μεταβλητές και ο τρόπος υπολογισμού τους στο Template Based Post Processing του CST.	53
B'.2	Οι μεταβλητές και ο τρόπος υπολογισμού τους στο Template Based Post Processing του CST.	54
B'.3	Οι μονάδες μέτρησης του περιβάλλοντος του CST.	56



# Περίληψη

Ο Compact LInear Collider (CLIC) ως χρησιμοποιεί μια καινοτόμα μέθοδο επιτάχυνσης, στην οποία ενέργεια που εξάγεται από μια υψηλής έντασης δέσμη ηλεκτρονίων σχετικά χαμηλής ενέργειας (τη Δέση Οδηγό), χρησιμοποιείται για την επιτάχυνση μιας χαμηλότερης σε ένταση Κύριας Δέσμης σε πολύ υψηλή ενέργεια. Η υψηλή ένταση της Δέσμης Οδηγού, με παλμούς που περιέχουν πάνω από  $10^{15}$  ηλεκτρόνια, αποτελεί τροχοπέδη στη χρήση συμβατικών μεθόδων μέτρησης προφίλ, όπως τους wire scanners. Έτσι, εξετάζονται νέες μη επεμβατικές μέθοδοι μέτρησης προφίλ.

Μια υποψήφια μέθοδος είναι ο Σαρωτής Δεσμών Ηλεκτρονίων (Electron Beam Scanner). Μια δέσμη ανίχνευσης ηλεκτρονίων σε χαμηλή ενέργεια διασχίζει κάθετα την δέσμη του επιταχυντή. Η δέσμη αυτή αποκλίνει από την πορεία της λόγω των πεδίων της δέσμης του επιταχυντή. Σαρώνοντας τη δέσμη ανίχνευσης και μετρώντας την απόκλιση της σε σχέση με την αρχική της θέση, το εγκάρσιο προφίλ της δέσμης του επιταχυντή μπορεί να ανακατασκευαστεί.

Αναλυτικές εκφράσεις για την απόκλιση υπάρχουν για την περίπτωση δεσμών μεγάλου μήκους, όπου η κατανομή φορτίου μπορεί να θεωρηθεί σταθερή κατά τη μέτρηση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζουμε την επίδοση του σαρωτή δεσμών ηλεκτρονίων σε έναν επιταχυντή όπου το μήκος της δέσμης είναι πολύ μικρότερο από τη διάρκεια σάρωσης της δέσμης ανίχνευσης. Συγκεκριμένα, η περίπτωση όπου το μήκος της δέσμης είναι μικρότερο από το χρόνο που απαιτεί ένα σωματίδιο της δέσμης ανίχνευσης για να διασχίσει την κύρια δέσμη είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί αναλυτικά. Αναπτύξαμε ένα περιβάλλον προσομοίωσης που επιτρέπει τη μοντελοποίηση αυτής της περίπτωσης.

## Λέξεις Κλειδιά

Σαρωτής Δεσμών Ηλεκτρονίων, προφίλ δέσμης, επιταχυντής CLIC, μη επεμβατική μέτρηση προφίλ



# Abstract

The Compact LInear Collider (CLIC) will use a novel acceleration scheme in which energy extracted from a very intense beam of relatively low-energy electrons (the Drive Beam) is used to accelerate a lower intensity Main Beam to very high energy. The high intensity of the Drive Beam, with pulses of more than  $10^{15}$  electrons, poses a challenge for conventional profile measurements such as wire scanners. Thus, new non-invasive profile measurements are being investigated.

One candidate is the Electron Beam Scanner. A probe beam of low-energy electrons crosses the accelerator beam perpendicularly. The probe beam is deflected by the space-charge fields of the accelerator beam. By scanning the probe beam and measuring its deflection with respect to its initial position, the transverse profile of the accelerator beam can be reconstructed.

Analytical expressions for the deflection exist in the case of long bunches, where the charge distribution can be considered constant during the measurement. In this thesis we consider the performance of an electron beam scanner in an accelerator where the bunch length is much smaller than the probe-beam scanning time. In particular, the case in which the bunch length is shorter than the time taken for a particle of the probe beam to cross the main beam is difficult to model analytically. We have developed a simulation framework allowing this situation to be modelled.

## Keywords

Electron Beam Scanner, beam profile, CLIC accelerator, linear accelerator, non-intercepting profile measurement



