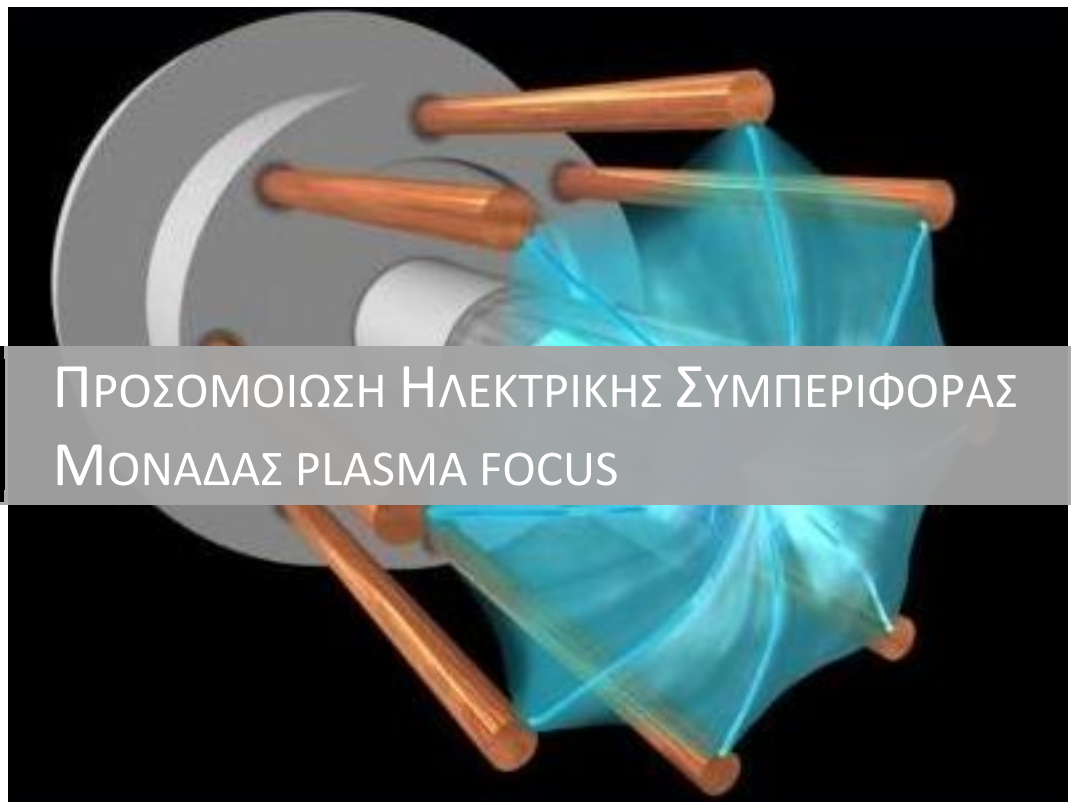




ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ  
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε



ΠΤΥΧΙΑΚΗ  
ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ  
ΜΟΝΑΔΑΣ PLASMA FOCUS

ΣΑΡΡΗΣ ΔΟΜΕΤΙΟΣ Α.Μ 3820

ΧΑΝΙΑ 2014

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Μιχαήλ Ταταράκης  
Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης

# Πτυχιακή Εργασία

**Θέμα:** Προσομοίωση Ηλεκτρικής Συμπεριφοράς Μονάδας Plasma Focus

**Επιμέλεια:** Σαρρής Δομέτιος

**Επιβλέπων καθηγητής :** Δρ. Μιχαήλ Ταταράκης

**Χανιά 2014**

## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	7
Abstract.....	8
1 Κεφάλαιο.....	9
1.1 Δομή της έκθεσης.....	9
1.2 Εισαγωγή.....	10
1.2.1 Πλάσμα (φυσική).....	10
2 Κεφάλαιο.....	12
2.1 Αρχή λειτουργίας Εισαγωγή.....	12
2.2 Αρχή λειτουργίας του πλάσματος εστίασης ( plasma focus).....	15
2.3 Ακτινική Δυναμική του πλάσματος εστίασης.....	18
2.4 Θάλαμος κενού- καυσίμου/ηλεκτρόδια ανόδου-καθόδου.....	20
3 Κεφάλαιο.....	18
3 Μοντέλο του Lee.....	18
3.1 Εισαγωγή.....	18
3.2 Περιγραφή του κώδικα του μοντέλου του Lee.....	18
3.3 Οι 5 φάσης.....	19
4 Κεφάλαιο.....	26
4 Εισαγωγή στο φύλλο εργασίας.....	26
4.1.1 Άνοιγμα φύλλου εργασίας (EXEL).....	26
4.2 Προκαταρκτικός Προσανατολισμός για τις Ρυθμίσεις Έλεγχου.....	28
4.2.1 Διαμόρφωση και Ρύθμιση συσκευής.....	28
4.2.2 Επεξήγηση των κελιών και ανάλυση αποτελεσμάτων.....	32
Κεφάλαιο 5.....	36
5.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	36
5.2. Παρατηρήσεις στις υπολογιζόμενες ποσότητες από το μοντέλο κώδικα του Lee (Computed Διαγράμματα απο το Worksheet 2).....	42
Κεφάλαιο 6.....	50
6.1 Σημειώσεις.....	50
6.2 Συμπέρασμα.....	52
7 Βιβλιογραφία.....	53

## Κατάλογος εικόνων

<b>Εικόνα 1:</b> Δυναμική συμπεριφορά της θήκης του ρεύματος μιας τυπικής συσκευής DPF (α) και τα σχετιζόμενα σήματα της τάσης και του ρεύματος του θαλάμου, που δείχνουν τις κύριες φάσεις της εκφόρτισης (b) [Εικόνα από αναφ. 78].....	11
<b>Εικόνα 2.</b> Σχηματικό διάγραμμα της αξονικής και ακτινικής φάσης. Το αριστερό τμήμα απεικονίζει την αξονική φάση, το δεξιό τμήμα της ακτινικής φάσης. Στο αριστερό τμήμα, z είναι η πραγματική θέση του sheath-shock ρεύματος εμπρόσθια δομή. Στο δεξιό τμήμα η rs έχει τη θέση του εσωτερικά εμπρόθετου κινούμενου shock οδηγούμενο από το έμβολο στη θέση rr. Μεταξύ rs και rr είναι το ακτινικό εκρήξης slug, που επιμηκύνετε με μήκος zf. Ο πυκνωτής, στατικής αυτεπαγωγής ενεργοποιείται και τροφοδοτεί το πλάσμα εστίασης που φαίνεται στην αξονική φάσης μόνο.....	13
<b>Εικόνα 3.</b> Συσκευή Dense Plasma Focus. Εικόνα από Glen Millam.[2].....	15
<b>Εικόνα 4.</b> Σχεδιασμός, χαρακτηρίστηκες και δυναμικές.....	16
<b>Εικόνα 5:</b> Απλοποιημένο μοντέλο των φάσεων σχηματισμού του «pinch» [εικόνα από αναφ. 79].....	21
<b>Εικόνα 6:</b> Τροχιές του μαγνητικού εμβόλου (rp) και του κρουστικού μετώπου (rs & rr) κατά την διάρκεια της ακτινικής φάσης. [εικόνα από αναφ. 78] .....	21
<b>Εικόνα 8.</b> Εμφάνιση των worksheet-EXCEL 2007.....	31
<b>Εικόνα 9a.</b> Εμφάνιση αποτελεσμάτων στο Worksheet μετά τη βολή.....	43
<b>Εικόνα 9b.</b> Εμφάνιση αποτελεσμάτων στο Worksheet μετά τη βολή.....	43
<b>Εικόνα 10:</b> Εγκάρσια τομή του θαλάμου κενού-καυσίμου. 1- τμήμα του θαλάμου (κάθοδος), 2 - τμήμα του θαλάμου (άνοδος), 3 - βασικό ηλεκτρόδιο της ανόδου, 4 - περίβλημα ηλεκτρικής απομόνωσης, 5 - αποστάτης ηλεκτρικής απομόνωσης, 6 – δακτύλιος (o-ring) διατήρησης του κενού.....	17

## Κατάλογος πινάκων

<b>Πίνακας 1:</b> Διαστάσεις θαλάμου και ηλεκτροδίων.....	17
<b>Πίνακας 2:</b> Οδηγός απεικόνισης και σχεδίασης των σχημάτων (figures) του Φύλλου 1 του Worksheet.....	38
<b>Πίνακας 4:</b> Ο παραπάνω πίνακας αναφέρετε στα αποτελέσματα του Worksheet στην γραμμή Dataline.....	41
<b>Πίνακας 5:</b> Αριθμητικός πίνακας ρυθμίσεων Bank, Tube,Λειτουργιάς και Taper στην πειραματική συσκευή του Plasma Focus.....	42

## Κατάλογος Σχημάτων

<b>Σχήμα 7a.</b> $I_{total}$ συνολικό ρεύμα.....	22
<b>Σχήμα 7b.</b> $I_{total}$ & $I_{plasma}$ Συνολικό ρεύμα και ρεύμα πλάσματος.....	22
<b>Σχήμα 7c.</b> Τάση στο σωλήνα (Tube).....	23
<b>Σχήμα 7d.</b> Αξονική καμπύλη τροχιάς και ταχύτητα.....	23
<b>Σχήμα 7e.</b> Ακτινική τροχιά κρούσης και ανάκλασης .....	24
<b>Σχήμα 7f.</b> Διάρκεια της Ακτινικής Δομής.....	24
<b>Σχήμα 7g.</b> Ακτινική Ταχύτητα, κρούση, αντανάκλαση κρούσης και επιμήκυνση.....	25
<b>Σχήμα 7h.</b> Αυτεπαγωγή σωλήνα σε ακτίνα και άξονα.....	25
<b>Σχήμα 7i.</b> Συνολική ενεργεία επαγωγής.....	26
<b>Σχήμα 7j.</b> Σύγκριση της εξασθένιση της ενεργείας απο την δυναμικής αντίστασης (DR) με την λειτουργεί του Έμβολου.....	26
<b>Σχήμα 7k.</b> Μέσος ορός και κορυφή πυκνότητας ιόντων.....	27
<b>Σχήμα 7i.</b> Κορυφές μέσος Όρος και κορυφαίες θερμοκρασίες του πλάσματος.....	27
<b>Σχήμα 7o.</b> Ισχύς μαλακών ακτινών-X (SXR) σε Νέον.....	28
<b>Σχήμα 1:</b> (επάνω αριστερά) συνολικό ρεύμα αποφόρτισης και τάση tube.....	34
<b>Σχήμα 2:</b> (επάνω δεξιά) αξονική τροχιά και ταχύτητα.....	34
<b>Σχήμα 3:</b> ακτινική τροχιά.....	35
<b>Σχήμα 4:</b> συνολική τάση tube κατά την ακτινική φάση.....	35
<b>Σχήμα 5:</b> ακτινικές ταχύτητες.....	36
<b>Σχήμα 6:</b> θερμοκρασία πλάσμα.....	36
<b>Σχήμα 7:</b> θερμότητα joule και ακτινοβολία ενέργειας.....	37
<b>Σχήμα 8:</b> ενέργειας Joule και ακτινοβολία ισχύος.....	37
<b>Σχήμα 9:</b> Αριθμός Φόρτισης.....	38

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Μιχάλη Ταταράκη κυρίως για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, και την υπομονή που έκανε κατά τη διάρκεια υλοποίησης της πτυχιακής εργασίας, δίνοντας μου την ευκαιρία να αναζητήσω πηγές πληροφοριών για ένα τόσο σημαντικό και επίκαιρο θέμα.

Θα θελα επίσης να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στους γονείς μου, τον πατέρα μου Νικόλαο Σαρρή, την μητέρα μου Κυριακή Σαρρή και τον αδελφό μου Γιώργο Σαρρή οι οποίοι στήριξαν τις σπουδές μου με διάφορους τρόπους, φροντίζοντας για την καλύτερη δυνατή μόρφωση μου.

## Περίληψη

Για τις ερευνητικές και πειραματικές ανάγκες του εργαστηρίου CPPL (Center of Plasma Physic and Laser) δημιουργήθηκε συσκευή παραγωγής ηλεκτρονίων, πλάσματος εστίασης (Dense plasma focus).

Σκοπός της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας είναι η παρουσίαση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς της μονάδας πλάσματος εστίασης, μέσω προγράμματος όπου είναι βασισμένο στο μαθηματικό μοντέλο και τον κώδικα του S. Lee σε VISUAL Microsoft EXEL 2007. Το φύλλο Excel διατίθεται ελεύθερα και δωρεάν στην ιστοσελίδα [www.plasmafocus.net](http://www.plasmafocus.net).

Επίσης γίνεται αναφορά στην φυσική του πλάσματος. Ανάλυση του πλάσματος εστίασης σε θεωρητικό επίπεδο και μια γεωμετρική παρουσίαση της συσκευής, όπου λαμβάνει μέρος το φαινόμενο. Επιπλέον γίνεται παρουσίαση του φύλλου εργασίας, όπως και η σωστή θύμηση των παραμέτρων του φύλλου εργασίας για την συσκευή του εργαστηρίου. Τέλος λαμβάνουμε και παραθέτουμε τα αποτελέσματα όπου γίνεται η αξιολόγηση αυτών

## Abstract

For the research and experimental needs of CPPL laboratory (Center of Plasma physic and Laser) was created electron production devise, a miniature plasma focus device .

The purpose of this bachelor thesis is the presentation of the electrical behavior of the plasma focus, through program where it is based on the mathematical model and the code of S. Lee in VISUAL Microsoft Excel 2007. The Excel sheet is available free at the website [www.plasmafocus.net](http://www.plasmafocus.net).

Reference is also made to plasma physics. Analysis of plasma focus on a theoretical level and a geometric presentation of the device, where it takes place. Furthermore made presentation of the worksheet, as well as the correct configuration of worksheet for the diagnostic laboratory. Finally we present and put together the results for evaluation of these.



## 1 Κεφάλαιο

### 1.1 Δομή της πτυχιακής εργασίας

Η δομή της εργασίας έχει κατανεμηθεί στα εξής κεφάλαια: Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στο πλάσμα και στην φυσική του. Στο δεύτερο μέρος γίνεται μια εισαγωγική παρουσίαση της συσκευής του πλάσματος εστίασης (plasma focus), των συγκριτικών της πλεονεκτημάτων και της αρχής λειτουργίας της με έμφαση στους μηχανισμούς παραγωγής των νετρονίων. Παρακάτω περιγράφεται η αρχή λειτουργίας του πλάσματος εστίασης, περιγραφή της ακτινικής και αξονικής φάσης καθώς και μια περιγραφή της ακτινικής δυναμικής. Τελειώνοντας το κεφάλαιο με μια περιγραφή της τομής της κατασκευής με τις διαστάσεις της όπου παίρνει μέρος το φαινόμενο. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται το μοντέλο του S.Lee. Γίνεται περιγραφή του κώδικα και μια ανάλυση των 5 υποδιαιρέσεων της ακτινικής φάσης. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής περιγραφή του φύλλου EXEL, των αποτελεσμάτων και ανάλυση των χαρακτηριστικών. Στο τελευταίο κεφάλαιο βλέπουμε τα αποτελέσματα από το μοντέλο του Lee καθώς και παρατηρήσεις πάνω σε αυτά, σημειώσεις και τελικά συμπεράσματα.

## 1.2 Εισαγωγή

### 1.2.1 Πλάσμα (φυσική)

Τόσο στη φυσική όσο και στη χημεία ονομάζουμε **πλάσμα** την κατάσταση της ύλης στην οποία αυτή δεν έχει συγκεκριμένο όγκο και σχήμα που να οφείλεται στην ίδια (όπως συμβαίνει στα αέρια), και επιπλέον βρίσκονται ελεύθερα και όχι σε μοριακούς δεσμούς τα ηλεκτρικά φορτισμένα ατομικά της σωματίδια (ιόντα και ηλεκτρόνια). Υπάρχουν τρεις τουλάχιστον ορισμοί του πλάσματος:

- Πλάσμα είναι ιονισμένο αέριο σε θερμοκρασία ,περίπου,  $10^9$  βαθμών Kelvin.
- Πλάσμα είναι ένα μερικώς ιονισμένο<sup>61</sup> αέριο. Δηλαδή ένα αέριο στο οποίο κάποια (αλλά όχι όλα) από τα σωματίδια από τα οποία αποτελείται είναι ιόντα και ηλεκτρόνια. Το μερικώς ιονισμένο πλάσμα μπορεί να έχει πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία από το πλήρως ιονισμένο πλάσμα, για παράδειγμα της τάξης των 500 βαθμών Κελσίου. Τα ηλεκτρόνια σε ένα μερικώς ιονισμένο πλάσμα είναι πολύ πιο «θερμά» και δεν βρίσκονται σε θερμική ισορροπία με τα υπόλοιπα σωματίδια του αερίου. Ο βαθμός ιονισμού εξαρτάται από τη θερμοκρασία (και αντίστροφα) σύμφωνα με την εξίσωση Saha<sup>62</sup>.

(Με την εξίσωση του Saha μπορούμε να βρούμε το ποσοστό των ατόμων, τα οποία έχουν ιονισθεί σε ένα δεδομένο βαθμό σε σχέση με τον αριθμό των ατόμων στον προηγούμενο βαθμό ιονισμού  $N_1/N_0$ . Έτσι εάν  $N_1/N_0$  λόγος αυτός, σύμφωνα με τον νόμο του Saha θα ισούται:  $N_1/N_0$  είναι ο αριθμός που εκφράζει τον λόγο των ιονισμένων προς τα ουδέτερα άτομα ενός στοιχείου, τότε ο λόγος αυτός συμφώνα με το νόμο του saha θα ισούται:

$$\frac{N_1}{N_0} = \frac{(2\pi m_e)^{3/2}}{h^3} \frac{(kT)^{5/2}}{P_e} \frac{2u_1(T)}{u_0(T)} e^{-x_1/kT}$$

οπου  $m_e$ , η μάζα του ηλεκτρονίου  $P_e = n_e kT$  είναι η πίεση των ηλεκτρονίων.  $T$ , η θερμοκρασία ιονισμού που ορίζεται από το σχετικό αριθμό των ιόντων του δεδομένου στοιχείου που βρίσκονται σε διάφορες δυνατές καταστάσεις ιονισμού,  $T_1/T_0$ , ο λόγος της συνάρτησης επιμερισμού των ιονισμένων ατόμων προς τη συνάρτηση επιμερισμού των ουδέτερων ατόμων,  $x_1$ , η ενέργεια ιονισμού)

- Πλάσμα είναι η κατάσταση της ύλης η οποία αποτελείται από ελεύθερα ιόντα και ηλεκτρόνια.

Ο ένας ορισμός θεωρεί το πλάσμα μορφή αερίου ενώ ο άλλος το κατατάσσει ως την *τέταρτη κατάσταση της ύλης* (οι υπόλοιπες τρεις είναι η στερεή, η υγρή και η αέρια). Το να γίνονται ελεύθερα (ελεύθερα ηλεκτρόνια). Το πλάσμα συνίσταται επομένως από ελεύθερα ηλεκτρόνια και ιόντα (άτομα ή μόρια που έχουν χάσει ή αποκτήσει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια), και είναι υπερτονισμένη κατάσταση της ύλης. Το πλάσμα μπορεί να προκύψει από ένα αέριο στο οποίο έχει δοθεί αρκετή ενέργεια για να αποχωριστούν τα άτομα από τα ηλεκτρόνια τους (ιονισμός) ώστε να παραχθεί ένα νέφος από ιόντα και πλάσμα διαφέρει από ένα μη-ιονισμένο αέριο. Σχηματίζεται όταν ένα αέριο γίνει πολύ θερμό με αποτέλεσμα ηλεκτρόνια να δραπετεύσουν από το άτομό τους και ηλεκτρόνια.

### Πού συναντάται

Πλάσμα συναντάται στον Ήλιο, στους αστέρες, στον μεσοαστικό χώρο, στους κεραυνούς κλπ. Ο ηλιακός άνεμος επίσης αποτελείται από πλάσμα. Σε συνθήκες εργαστηρίου δημιουργείται σε θερμοπυρηνικούς αντιδραστήρες, σε σωλήνες φωτισμού που περιέχουν αέρια όπως νέων σε χαμηλή πίεση κλπ.

### Ιδιότητες

Σε αντίθεση με τα αέρια το πλάσμα είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού. Λόγω των ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων που το απαρτίζουν, το πλάσμα συμπεριφέρεται διαφορετικά από ένα αέριο, για παράδειγμα όταν εφαρμόζονται σε αυτό ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Έτσι ο όγκος και το σχήμα του καθορίζεται σημαντικά από εφαρμοζόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία (από τα οποία συνήθως και δημιουργείται).

Η θερμοκρασία του πλάσματος είναι υπερβολικά υψηλή, αλλά η πίεσή του είναι υπερβολικά χαμηλή καθώς είναι πολύ αραιό. Έτσι το πλάσμα που συνήθως δημιουργείται τεχνητά σε εργαστήριο, ερχόμενο σε επαφή με κάποιο σώμα ψύχεται αμέσως χωρίς να θερμαίνει το άλλο σώμα. Δεν ισχύει το ίδιο βέβαια με έναν κεραυνό που πέφτει στο έδαφος.

Το πλάσμα εκδηλώνει διαφορετικές θερμοδυναμικές ιδιότητες από τις αντίστοιχες των αερίων. Η θερμοκρασία, για παράδειγμα, στην οποία τα σωματίδια του πλάσματος αποκτούν συγκεκριμένη κατανομή ταχυτήτων εξαρτάται από τον βαθμό ιονισμού (και κατ' επέκταση την ένταση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου που προκαλεί τον ιονισμό, ή την ένταση της ακτινοβολίας αν αυτή είναι η αιτία του ιονισμού). Η παραγωγή πλάσματος με εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου έχει σημαντικές τεχνολογικές εφαρμογές, καθώς τεχνολογικές διεργασίες που μέχρι τώρα πραγματοποιούνταν με χρήση μη-ιονισμένων-αερίων σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες μπορούν πλέον να γίνονται με χρήση πλάσματος σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Το οικονομικό όφελος είναι προφανές, καθώς δαπανάται λιγότερη ενέργεια. Επίσης, διεργασίες ανέφικτες με χρήση αερίων γίνονται τεχνικά δυνατές με χρήση πλάσματος.

## Κεφάλαιο 2

### 2.1 Αρχή λειτουργίας Εισαγωγή

Η συσκευή πλάσματος εστίασης που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο (CPPL) για πειραματικούς και ερευνητικούς σκοπούς ανήκει στην κατηγορία των συσκευών παραγωγής και εστίασης πυκνού πλάσματος (Dense Plasma Focus, DPF), των οποίων η ανακάλυψη έγινε παράλληλα από τους Mather (USA) [1] και Filippov (USSR) [2] στα τέλη της δεκαετίας του 50.

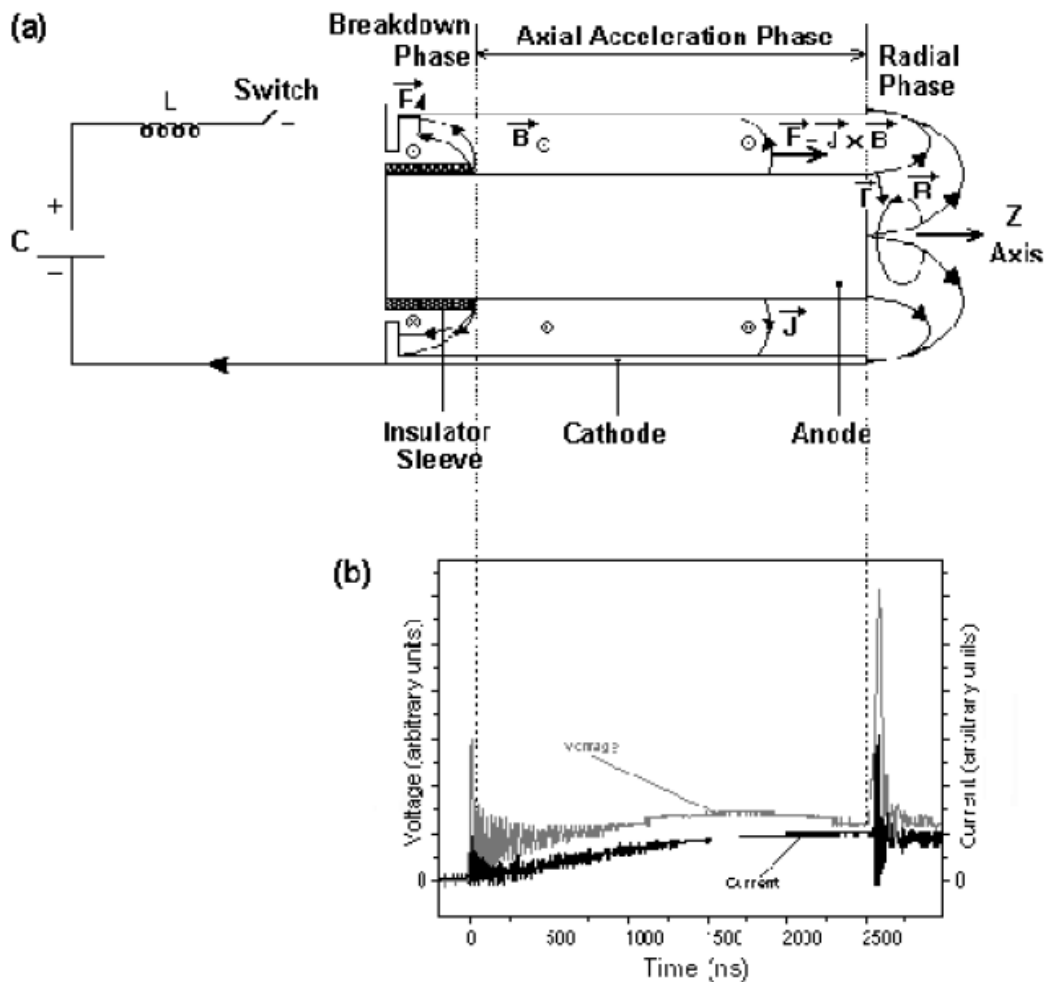
Απο τότε έχουν κατασκευαστεί διάφορες συσκευές Plasma Focus (PF) (όπως καλούνται συνήθως) μέσης ισχύος (2-10kJ) [3-6], μεγάλης ισχύος (10-500kJ) [7-10] και πολύ μεγάλης ισχύος (MJ) [11,12] και έχουν μελετηθεί εκτενώς τις δεκαετίες που πέρασαν.

Η συσκευή dense **plasma focus** είναι μια μικρή συμπαγές κατασκευή, αρκετά ισχυρή, που παράγει πολλαπλές ακτινοβολίες [1]. Ακόμη και μια μικρή συσκευή μεγέθους 3 kJ πλάσματος εστίασης, μπορεί και παράγει μία έντονη ριπή ακτινοβολίας με εξαιρετικά υψηλή ισχύς. Για παράδειγμα, όταν λειτουργεί με νέον, οι εκπομπές ακτινών χ η ισχύς του κορυφώνεται στα 109 W για μια πολύ μικρή περίοδο μερικών νάνο δευτερολέπτων. Ενώ όταν λειτουργεί με δευτέριο η παραγωγή των νετρονίων συνήθως αγγίζει τα  $10^5$  νετρόνια ανά δευτερόλεπτο, σε διάρκεια περιόδου δέκατων του ενός νάνο δευτερολέπτου. Αυτή η τεράστια εκπομπή νετρονίων καθιστούν αυτές τις συσκευές από τις πιο ισχυρές εργαστηριακές πηγές ακτινοβολίας στον κόσμο. Αυτές οι πηγές είναι βασισμένες στο πλάσμα εστίασης.

Όταν η υλη θερμαίνεται σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία, ιονίζεται και γίνεται το πλάσμα. Εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Το φάσμα εξαρτάται από την θερμοκρασία και το υλικό. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία και η πυκνότητα του υλικού, τόσο πιο έντονη είναι η ακτινοβολία. Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι εκπέμπονται δέσμες ηλεκτρονίων και ιόντων. Αν το υλικό που χρησιμοποιείτε είναι δευτέριο και η πυκνότητα με την θερμοκρασία είναι σε αρκετά υψηλά επίπεδα μπορεί να επιτευχθεί πυρηνική σύντηξη. Σε αυτή την περίπτωση εκπέμπονται και νετρόνια. Συνήθως οι θερμοκρασίες είναι πάνω από μερικά εκατομμύρια K και η συμπίεση της πυκνότητας είναι πάνω από την ατμοσφαιρική πυκνότητα χρησιμοποιώντας ένα αέριο στο ένα εκατοστό της ατμοσφαιρικής πυκνότητας.

Ένας τρόπος για να επιτευχθεί μια τέτοια άκρως υψηλή θέρμανση της ύλης είναι μέσω μιας ηλεκτρικής αποφόρτισης των αερίων. Καθώς το αέριο θερμαίνεται, διαστέλλεται, μειώνοντας έτσι την πυκνότητα του και το καθιστά αρκετά δύσκολο στην περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας του. Με τον τρόπο αυτό, είναι αναγκαίο να συμπιεστεί το αέριο κατά την διάρκεια της θέρμανσης, προκειμένου να επιτευχθούν κατάλληλες συνθήκες. Μια ηλεκτρική αποφόρτιση ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια παράγει ένα αζιμουθιακό μαγνητικό πεδίο που αλληλεπιδρά με τη στήλη του ρεύματος, δίνοντας μια αύξηση σε μια αυτό μια δύναμη συμπίεσης που τείνει να στενεύσει (ή να συμπιεστεί (pinch)) τη στήλη. Προκειμένου να γίνει η συμπίεση "pinch", ή να κρατήσει μαζί, μια στήλη αερίου σε ατμοσφαιρική πυκνότητα και σε θερμοκρασία του ενός εκατομμύριου  $K$ , μια μεγάλη πίεση θα πρέπει να ασκείται από το συμπιεσμένο μαγνητικό πεδίο. Έτσι, απαιτείτε ένα ηλεκτρικό ρεύμα τουλάχιστον μερικών εκατοντάδων  $kA$ , για μια μικρή στήλη ακτίνας  $1\text{ mm}$ . Επιπλέον, η δυναμική διαδικασία προϋποθέτει ότι το ρεύμα αυξάνεται πολύ γρήγορα, συνήθως σε κάτω από  $0,1\ \mu s$ , προκειμένου να έχουμε μια αρκετά θερμή και αρκετά πυκνή συμπίεση (pitch). Μια τέτοια λειτουργία είναι γνωστή σαν μια πολύ γρήγορη και πολύ πυκνή συμπίεση. Επιπλέον απαιτείτε αγωγός ισχύος μερικών  $MA$  με ταχεία υπερύψωση, λίγων  $ns$  (fast-rise ( $ns$ ) pulsed-lines.). Αυτοί οι αγωγοί μπορούν να τροφοδοτούνται από συστοιχίες πυκνωτών, και υποκύπτουν στο μειονέκτημα της μετατροπής απολήτων και υψηλού κόστους λόγω του κόστους της υψηλής τεχνολογίας των αγωγών pulse-shaping line.

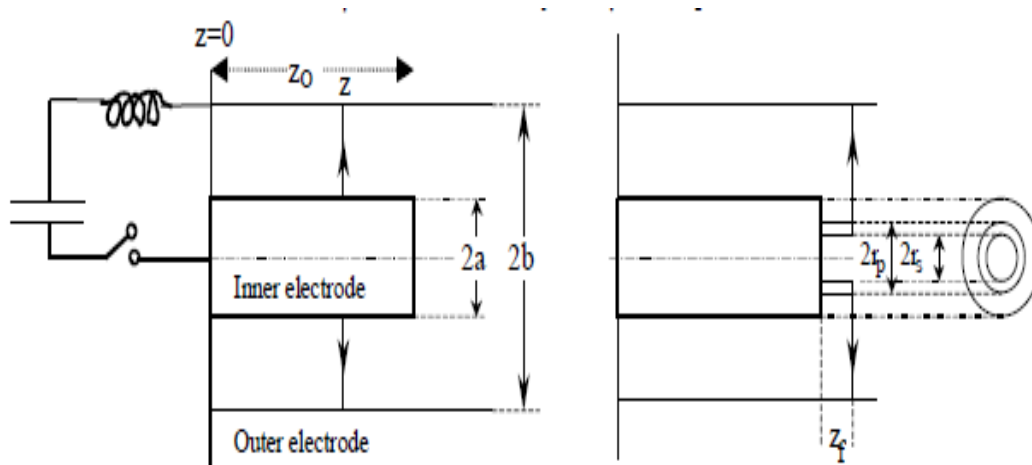
Μια εξαιρετική μέθοδος παραγωγής μιας πολύ πυκνής και πολύ θερμής συμπίεσης είναι η χρήση του πλάσματος εστίασης (plasma focus). Αυτή η συσκευή όχι μόνο παράγει εξαιρετικές πυκνότητες και θερμοκρασίες, αλλά επιπλέον δεν απαιτείται παραπάνω συσκευές και τεχνολογία και αποφεύγουμε τον ακριβό κόστος των αγωγών pulse-shaping line. Μια απλή αποφόρτιση του πυκνωτή είναι αρκετή για να τροφοδοτήσει το πλάσμα εστίασης.



**Εικόνα 1:** Δυναμική συμπεριφορά της θήκης του ρεύματος μιας τυπικής συσκευής DPF (α) και τα σχετιζόμενα σήματα της τάσης και του ρεύματος του θαλάμου, που δείχνουν τις κύριες φάσεις της εκφόρτισης (β) [Εικόνα από αναφ. 47].

## 2.2 Αρχή λειτουργίας του πλάσματος εστίασης (plasma focus)

Το πλάσμα focus υποδιαιρείται σε δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα είναι το τμήμα πριν την συμπίεσης (αξονικό τμήμα). Η λειτουργία αυτού του τμήματος είναι πρωτίστως να καθυστερήσει την συμπίεση μέχρι ο πυκνωτής να αποφορτιστεί καθώς πλησιάζει το μέγιστο ρεύμα (αύξηση της ημιτονοειδούς συνάρτησης). Αυτό γίνεται καθώς το ρεύμα οδηγείται στο αξονικό τμήμα (επιτάχυνση) μέχρι το ρεύμα του πυκνωτή να προσεγγίσει την κορυφή. Στη συνέχεια, το ρεύμα περνάει στην μετάβαση της ακτινική φάσης συμπίεσης. Έτσι, η λειτουργία συμπίεσης ξεκινάει και εμφανίζεται στην κορυφή του παλμού του ρεύματος. Αυτό ισοδυναμεί με την οδήγηση της συμπίεσης με ένα πολύ γρήγορο ρεύμα ανόδου, χωρίς να είναι αναγκαία η τεχνολογία fast line αγωγών. Επιπλέον, η ένταση που επιτυγχάνεται είναι ανώτερη από αυτή των αγωγών.



**Εικόνα 2.** Σχηματικό διάγραμμα της αξονικής και ακτινικής φάσης. Το αριστερό τμήμα απεικονίζει την αξονική φάση, το δεξιό τμήμα της ακτινικής φάσης. Στο αριστερό τμήμα,  $z$  είναι η πραγματική θέση του sheath-shock ρεύματος εμπρόσθια δομή. Στο δεξιό τμήμα η  $r_s$  έχει τη θέση του εσωτερικά εμπρόθετου κινούμενου shock οδηγούμενο από το έμβολο στη θέση  $r_p$ . Μεταξύ  $r_s$  και  $r_p$  είναι το ακτινικό εκρήξης slug, που επιμηκύνετε με μήκος  $z_f$ . Ο πυκνωτής, στατικής αυτεπαγωγής ενεργοποιείται και τροφοδοτεί το πλάσμα εστίασης που φαίνεται στην αξονική φάσης μόνο.[59]

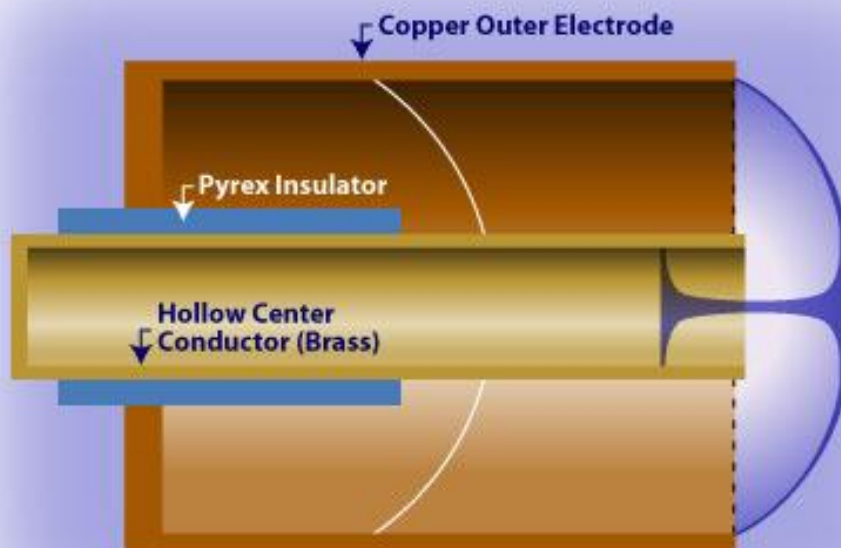
Ο μηχανισμός των 2 φάσεων του πλάσματος εστίασης [1] εμφανίζεται στο σχήμα 1. Το εσωτερικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) διαχωρίζεται από την εξωτερική ομόκεντρη κάθοδο, από ένα μονωτή. Τα ηλεκτρόδια είναι κλεισμένα σε ένα θάλαμο, απομάκρυνα ,και τυπικά γεμάτο με αέριο στο  $1/100$  περίπου της ατμοσφαιρικής πίεσης. Όταν η τάση του πυκνωτή λειτουργήσει σαν διακόπτης μέσα στο σωλήνα της εστίασης, παρατηρείται μια κατάρρευση που παρουσιάζει αξονική ισομετρία μεταξύ ανόδου και καθόδου σε όλο το μονωτή. Το ρεύμα ανασηκώνει το μονωτή καθώς το μαγνητικό πεδίο ( $BB \theta$ ) και το ρεύμα ( $Jr$ ) ανεβαίνουν σε μια ικανοποιητική τιμή.

**Αξονική φάση:** Η  $Jr \times B\theta$  αναγκάζει και στη συνέχεια πιέζει το ρεύμα, να επιταχύνει την υπερηχητικά κατά μήκος του σωλήνα. Η ταχύτητα του ρεύματος , το μήκος του σωλήνα και ο χρόνος ανόδου εκφόρτισης του πυκνωτή συνδυάζονται έτσι ώστε το ρεύμα να φτάνει στο τέλος του αξονικού μήκους, όπως η αποφόρτιση φτάνει στο ένα τέταρτο της περιόδου. Αυτή η φάση συνήθως διαρκεί περίπου  $1-3 \mu s$  για μια συσκευή πλάσματος εστίασης μερικών  $kJ$ .

**Ακτινική φάση:** Η επιφάνεια του ρεύματος που έρχεται σε επαφή με την άνοδο "στρέφεται" από το άκρο της "επιφάνειας" της ανόδου σχηματίζοντας έτσι έναν κύλινδρο ρεύματος, στον οποίο γίνεται εσωτερική συμπίεση. Το τοίχωμα του κυλινδρικού πλάσματος που εκρήγνυται έχει δύο όρια (βλέπε σχήμα 1 της ακτινικής φάση). Η εσωτερική επιφάνεια του τοίχους, με ακτίνα  $r_s$  είναι μια κρούση που εκρήγνυται. Στην εξωτερική πλευρά του τοίχου, ακτίνας  $r_p$  είναι το ρεύμα που εκρήγνυται ή το μαγνητικό εμβολο. Μεταξύ της κρούσης και του μαγνητικού εμβόλου είναι το δακτυλιοειδές στρώμα του πλάσματος. Έτσι λοιπόν έχουμε μια εσωτερική έκρηξη υψηλής πυκνότητα και υψηλής ταχύτητα, τότε παρατηρούμε ότι η κρούση συμπυκνώνεται στον άξονα και μια πολύ πυκνή και πολύ θερμή στήλη πλάσματος συμπυκνώνεται πάνω στο άξονα (βλέπε σχήμα 2) [2].



Αυτή η στήλη παραμένει εξαιρετικά θερμή και πολύ πυκνή για περίπου δέκα ns για μια μικρή συσκευή εστίασης πλάσματος. Η στήλη κατόπιν διαμελίζεται και εκρήγνυται. Για ένα μικρό το plasma focus αρκετών kJ, η φάση εκπομπής διαρκεί περισσότερα ns. Η πηγή ακτινοβολίας μοιάζει με τελεία (1 mm διάμετρος) όταν την παρατηρούμε στο τέλος.



**Εικόνα 3.** Συσκευή Dense Plasma Focus. Εικόνα από Glen Millam.[52]

## 2.3 Ακτινική Δυναμική του πλάσματος εστίασης

Η Εικόνα 4 δείχνει το σχέδιο ενός τυπικού plasma focus, που τροφοδοτείται με ρεύμα από ένα πυκνωτή όπου ενεργοποιείται με έναν απλό παράλληλο διακόπτη σπινθηρισμού (spark gap).

Η άνοδος μπορεί να είναι μία κούφια χάλκινη σωλήνα, έτσι ώστε κατά την φάση ακτινικής συμπίεσης το πλάσμα δεν καταφέρνει μόνο να επιμηκυνθεί μακριά από την επιφάνεια της ανόδου, αλλά επεκτείνεται και επιμηκύνεται στο κούφιο μέρος της ανόδου (βλέπε εικόνα 4).

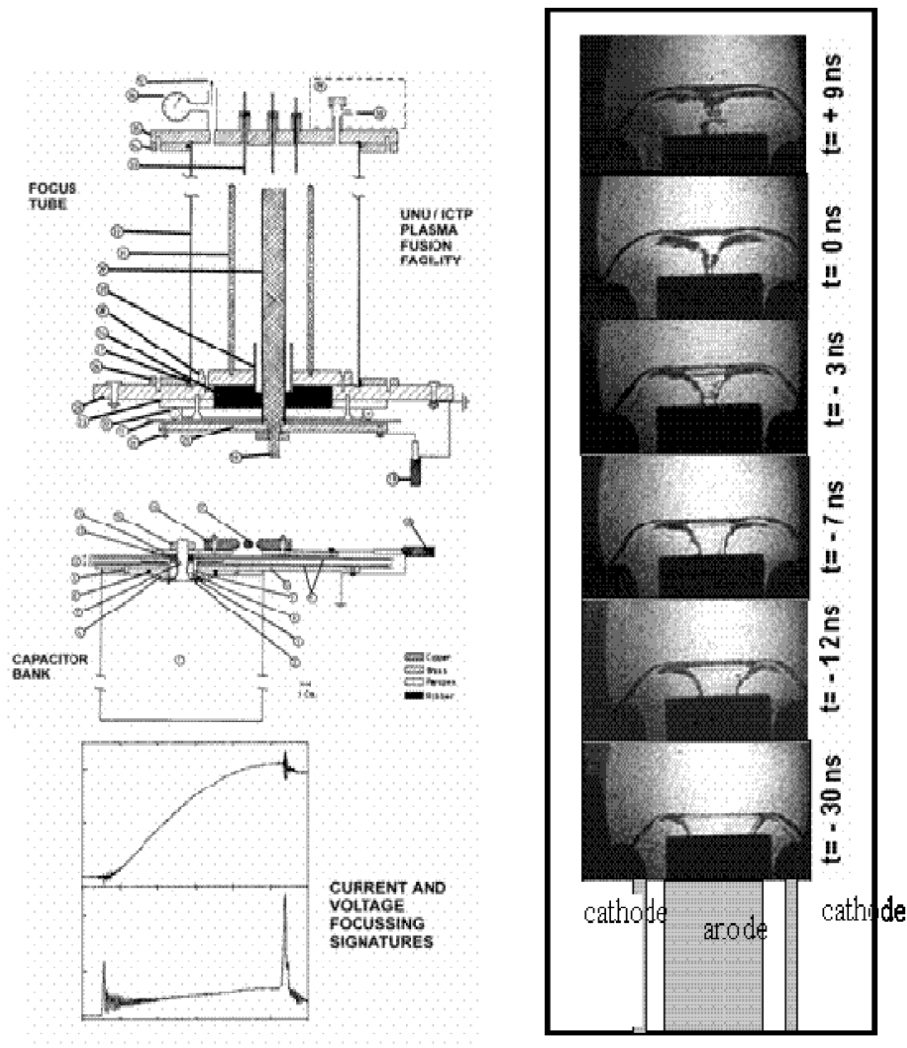
Στην εικόνα 4 παρουσιάζεται το σημείο όπου το ρεύμα επιταχύνει αξονικά και στον ακτινικό τομέα. Επίσης αυτό που εμφανίζεται στο ίδιο σχήμα είναι οι σκιαγραφίες (shadowgraphic) [53] που λαμβάνονται από την ακτινική (εσωτερική έκρηξη) κρούση (radially imploding current sheet-shock front structure).

Οι σκιαγραφίες (shadowgraphic) λαμβάνονται με μια ακολουθία, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Οι χρόνοι που αναφέρονται στο shadowgraphic είναι σε σχέση με την κρίσιμη χρονική στιγμή ώστε να είναι η στιγμή της μέγιστης συμπίεσης.

Εκείνη τη στιγμή είναι που λαμβάνεται ως  $t=0$ . Η ποιότητα του πλάσματος συμπίεσης μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι πολύ καλή, με άριστη αξονική συμμετρία, και με πολύ καλή φάση συμπιεσμένης πυκνότητας.

Στο κάτω αριστερό τμήμα της εικόνας 4 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές του ρεύματος και η τάση της ακτινικής εσωτερικής έκρηξης (radial implosion)[54], που συμβαίνουν στο ρεύμα κορυφής. Οι ταχύτητες εσωτερικής έκρηξης έχουν μετρηθεί και έχουν μια μέγιστη τιμή που πλησιάζει τα 30  $cm/\mu s$ .

Αυτό συμφωνεί και εξετάζοντας τη θεωρία του κύματος κρούσης (shock wave) μαζί με το μοντέλο [55] του επερχομένου ανακλώμενου κύματος κρούσης (shock wave) και των συμπιεσμένων επιδράσεων, τότε παρατηρείται μια θερμοκρασία της τάξεως των *6 εκατομμύριων K* ( $0.5 \text{ keV}$ ) που έχει υπολογιστεί για τη στήλη στην κορύφωση της συμπίεσης, με πυκνότητα κοντά στα  $2 \times 10^{19}$  ιόντα ανά  $\text{cm}^3$ .



Sequence of compression in  
UNU/ICFP PFF at 4.0 mbar deuterium

Εικόνα 4. Σχεδιασμός, χαρακτηριστικές και δυναμικές

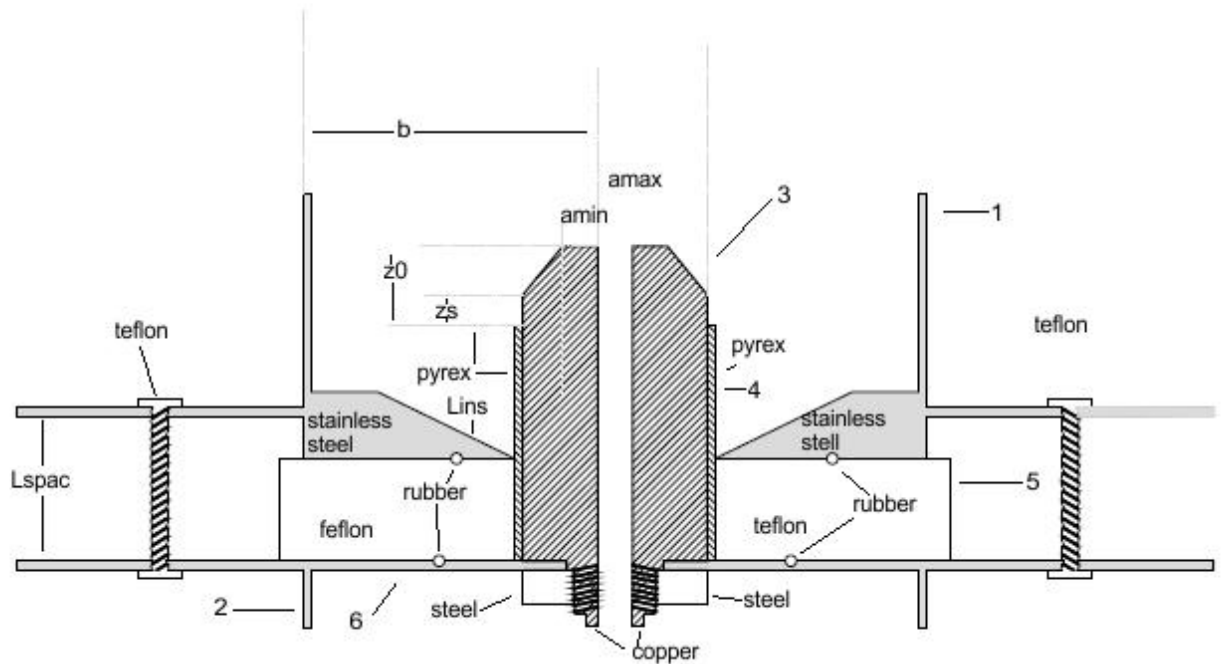
## 2.4 Θάλαμος κενού- καυσίμου/ηλεκτρόδια ανόδου-καθόδου

Ο θάλαμος του κενού-καυσίμου αποτελείται από δύο κοίλους μεταλλικούς κυλίνδρους ίδιας διαμέτρου, τοποθετημένοι στον ίδιο άξονα συμμετρίας. Οι κύλινδροι αυτοί έχουν ο κάθε ένας αντίστοιχα, τα δυναμικά της ανόδου (+) και της καθόδου (-).

Για την αποφυγή δημιουργίας ηλεκτρικής εκκένωσης στην εξωτερική πλευρά περιβάλλεται από κατάλληλο μονωτικό αποστάτη, κυλινδρικής μορφής. Το βασικό ηλεκτρόδιο της ανόδου που συνδέεται στον αντίστοιχο κύλινδρο, έχει τοποθετηθεί ομοαξονικά στον κύλινδρο της καθόδου.

Ένα μονωτικό περίβλημα απομονώνει ηλεκτρικά την κάθοδο. Ακόμη, ο θάλαμος έχει σφραγιστεί κατάλληλα από ελαστικά δακτύλιο απομόνωσης για την αποφυγή εισροής αέρα. Στην παρακάτω Εικόνα φαίνεται η εγκάρσια τομή του θαλάμου και περιγράφονται τα κύρια μέρη του.

Συμφώνα με τις διαστάσεις αυτές, τροφοδοτήθηκε αρχικά ο αλγόριθμος προσομοίωσης και στην συνέχεια καθοριστήκαν οι τελικές τιμές τους, μέσω μεγάλου πλήθους αριθμητικών πειραμάτων. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1) συνοψίζονται οι τελικές τιμές των διαστάσεων του θαλάμου/ηλεκτροδίων.



**Εικόνα 10:** Εγκάρσια τομή του θαλάμου κενού-καυσίμου. 1- τμήμα του θαλάμου (κάθοδος), 2 - τμήμα του θαλάμου (άνοδος), 3 - βασικό ηλεκτρόδιο της ανόδου, 4 - περίβλημα ηλεκτρικής απομόνωσης, 5 - αποστάτης ηλεκτρικής απομόνωσης, 6 – δακτύλιος (o-ring) διατήρησης του κενού.

Διατομή	Τιμή (mm)
Ενεργό μήκος Ανόδου( $z_0$ )	9,5
Ευθύγραμμο Τμήμα Ανόδου	2,8
"Tapered" τμήμα ανόδου ( $z_0-z_s$ )	6,7
Μεγάλη Αντίνα Ανόδου ( $a_{max}$ )	5,7
Μικρή Ακτίνα Ανόδου ( $a_{min}$ )	4
Ακτίνα Καθόδου ( $b$ )	23,8
Μήκος "κατάρρευσης" Μονωτικού Χιτωνίου	15
Απόσταση Ηλεκτρικής Απομόνωσης( $L_{spac}$ )	20

**Πίνακας 1:** Διαστάσεις θαλάμου και ηλεκτροδίων

## 3 Κεφάλαιο

### 3 Μοντέλο του Lee

#### 3.1 Εισαγωγή

Ο κώδικας του μοντέλου του S.Lee παρουσιάζει το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα συνδυάζοντας το με την δυναμική του πλάσματος και με τους νόμους της θερμοδυναμικής και της ακτινοβολίας.

Ακόμα επιτρέπει την ρεαλιστική προσομοίωση όλων των σύνθετων εργασιών του πλάσματος εστίασης (plasma focus). Το βασικό μοντέλο περιγράφηκε για πρώτη φορά το 1984 [46] και από τότε έχει εξελιχθεί σε ένα ισχυρό και χρεσιμο εργαλείο σχεδιασμού και προσομοίωσης της συμπεριφοράς των συσκευών εστίασης πλάσματος.

Στην αναλυτική αναφορά του S.Lee [47] (και στις αναφορές που περιέχει) γίνεται μια πλήρης περιγραφή σχετικά με τη χρονική εξέλιξη του μοντέλου, τη θεωρητική του ανάλυση, καθώς και την τεκμηρίωση των δυνατοτήτων του, όπως προκύπτει από την ευρεία του χρήση σε διάφορα έργα.

#### 3.2 Περιγραφή του κώδικα του μοντέλου του Lee

Σε αυτήν την ενότητα θα περιγράψουμε την λειτουργία του κώδικα του μοντέλου του Lee. Η ακτινική φάση διαιρείται σε 5 επιμέρους τμήματα τα οποία διαφέρουν με αυτά που έχουμε είδη προ αναφέρει. Η διάφορα είναι ότι το μοντέλο στηρίζεται περισσότερο στην μαθηματική θεωρία παρά στις πειραματικές παρατηρήσεις

Η φάση συμπίεσης περιλαμβάνει περισσότερες απο μια μοντέλου, την radial inward shock phase (ακτινική φάση κρούσης προς τα εσύ), reflected shock phase (φάση ανάκλασης κρούσης) και στο πρώτο μέρος της slow compression phase (φάση αργής συμπίεσης)

Η φάση ηρεμίας καλύπτει το δεύτερο μέρος της φάσης αργής συμπίεσης. Παρατηρείται ότι η ασταθής φάση δεν έχει καμιά αντιστοιχία, δεδομένου ότι το μοντέλο δεν περιλαμβάνει τα φαινόμενα που σχετίζονται με τις MHD αστάθειες.

Η φάση αποσύνθεσης αντιστοιχεί χρονικά σε μια απλοποιημένη Expanded column phase, (φάση διευρυμένης στήλης) χωρίς όμως να περιλαμβάνονται σε αυτήν οι απώλειες λόγω εκπομπής.

Ο υπολογισμός της ακτινοβολίας και των νετρονίων γίνεται μέσω φαινομενολογικής προσέγγισης και εμπειρικών σχέσεων. Παρακάτω θα δούμε μια σύντομη περιγραφή των πέντε φάσεων του μοντέλου Lee καθώς όπως και την απλοποιημένη απεικόνιση των τεσσάρων πρώτων, πιο σημαντικών φάσεων που γίνεται παρακάτω (Εικόνα 5):

### 3.3 Οι 5 φάσης

a) Axial phase (Εικόνα 5(a)): Η αξονική φάση, αυτή περιγράφει ένα μοντέλο «snowplow» που περιλαμβάνει την εξίσωση της κίνησης της θήκης του πλάσματος, σε συνδυασμό με την εξίσωση του ηλεκτρικού κυκλώματος. Η εξίσωση της κίνησης ενσωματώνει τις παραμέτρους  $f_m$  και  $f_c$ , για την μάζα και το ρεύμα, αντίστοιχα. Ο παράγοντας «σάρωσης» (swept)  $f_m$  δείχνει το ποσοστό της μάζας που περιέχει η θήκη του πλάσματος κατά την κίνηση της (απόσταση  $z$ ) και ενσωματώνει την επίδραση πολλών φαινομένων που το επηρεάζουν. Με αντίστοιχο τρόπο, ορίζεται και ο παράγοντας  $f_c$  για το ρεύμα, που δείχνει το ποσοστό του ολικού ρεύματος του κυκλώματος, που ρέει μέσα από την θήκη και την επιταχύνει, μέσω της δύναμης Lorentz ( $F_{z1}$ ) μέχρι το τέλος της αξονικής φάσης (μήκος  $z_0$ ).

b) Radial Inward Shock Phase (Εικόνα 5(b)): Η φάση αυτή περιγράφεται από ένα μοντέλο «slug», χρησιμοποιώντας ένα σύστημα τεσσάρων εξισώσεων. Με τις εξισώσεις αυτές υπολογίζονται οι εξής μεταβλητές: η ακτινική ταχύτητα του κρουστικού μετώπου (shock front) που κινείται προς το κέντρο (ακτίνα  $r_s$ ), υπό την επίδραση της μαγνητικής πίεσης, η αξονική ταχύτητα της επιμήκυνσης (elongation) σε ύψος ( $z_f$ ) της στήλης του πλάσματος, υπό την επίδραση της δύναμης Lorentz ( $F_{z2}$ ), η ακτινική ταχύτητα του μαγνητικού εμβόλου (magnetic piston) που κινείται προς το κέντρο (ακτίνα  $r_p$ ), υπό την επίδραση της δύναμης Lorentz ( $F_{r2}$ ), επιτρέποντας έτσι τον διαχωρισμό της θήκης (sheath) του πλάσματος από το κρουστικό μέτωπο μέσω της προσέγγισης που περιλαμβάνει διαβατική συμπίεση και το ρεύμα του κυκλώματος. Φαινόμενα θερμοδυναμικής που οφείλονται στον ιονισμό και την διέγερση περιέχονται στην φάση αυτή, αν και δεν είναι σημαντικά για τα αέρια υδρογόνο και δευτέριο. Επίσης, υπολογίζονται η θερμοκρασία και η πυκνότητα του πλάσματος. Το μαγνητικό εμβολο, καθώς κινείται, δημιουργεί μια μικρή διαταραχή στη πίεση, η οποία ταξιδεύει με πεπερασμένη ταχύτητα δημιουργώντας έτσι μια καθυστέρηση στην «επικοινωνία» του με το κρουστικό κύμα. Η διαδικασία αυτή είναι κρίσιμη και λαμβάνεται υπόψη σε αυτήν τη φάση. Ακόμη, χρησιμοποιούνται αντίστοιχα για την μάζα και το ρεύμα οι παράμετροι οι  $f_{mr}$  και  $f_{cr}$ , με φυσική σημασία ανάλογη με αυτών που χρησιμοποιούνται στην αξονική φάση.

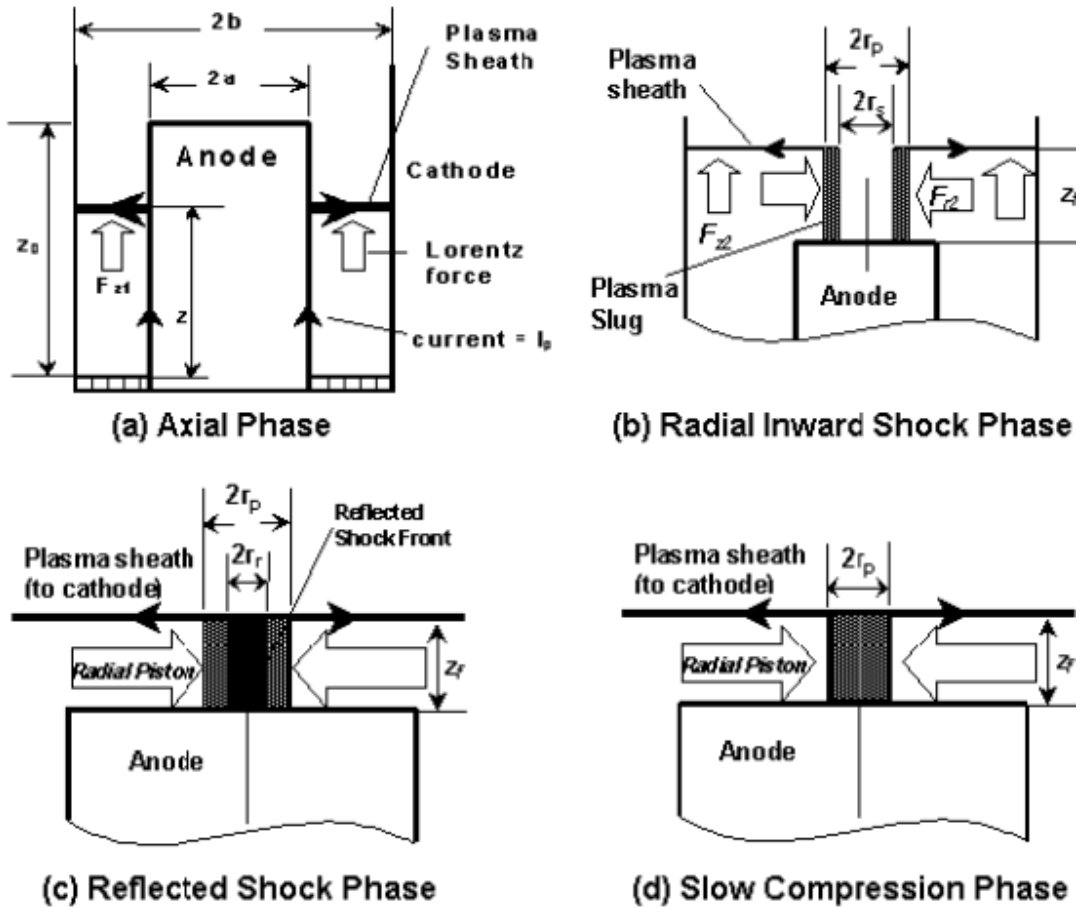


c) Radial Reflected Shock (RS) Phase (Εικόνα 5(c)): Η φάση αυτή ξεκινά όταν το κρουστικό μέτωπο, φτάνοντας στον κεντρικό άξονα, ανακλάται και αρχίζει να κινείται ακτινικά προς τα έξω (ακτίνα  $r_r$ ), ενώ το μαγνητικό εμβολο συνεχίζει την κίνησή του προς το κέντρο (ακτίνα  $r_p$ ). Σύστημα τεσσάρων εξισώσεων, ανάλογο με αυτό της προηγούμενης φάσης και οι ίδιες παράμετροι,  $f_{mr}$  και  $f_{cr}$ , χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ταχυτήτων του ανακλώμενου μετώπου, του μαγνητικού εμβόλου και του ύψους της στήλης του πλάσματος, καθώς και για τον υπολογισμό του ρεύματος. Ακόμη, υπολογίζονται η θερμοκρασία και η πυκνότητα πλάσματος.

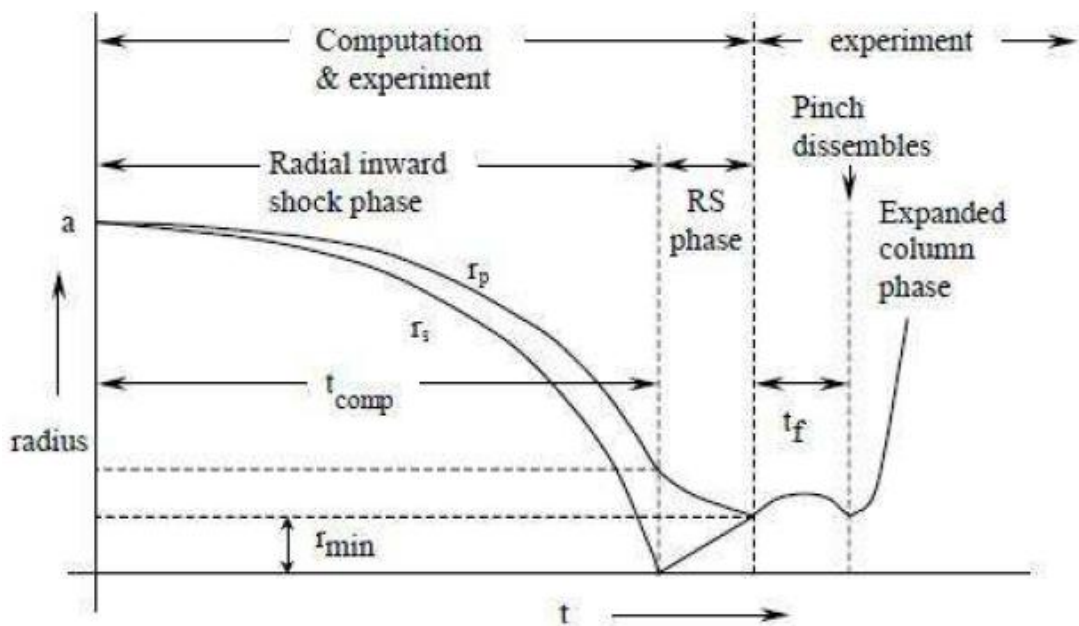
d) Slow Compression (Εικόνα 5(d)): Η φάση αυτή ξεκινά όταν το ανακλώμενο μέτωπο συναντήσει το κινούμενο μαγνητικό έμβολο και χαρακτηρίζεται, επίσης, ως φάση ακτινοβολίας (radiative), όπου η συμπίεση ενισχύεται λόγω απώλειας θερμικής ενέργειας μέσω ακτινοβολίας. Όροι που υπολογίζουν αυτήν την απώλεια, αλλά και την αύξηση της ενέργειας λόγω θέρμανσης (Joule heating), περιέχονται στην εξίσωση της κίνησης του μαγνητικού εμβόλου. Το σύστημα των εξισώσεων συμπληρώνεται με εκείνες που υπολογίζουν το ύψος της στήλης του πλάσματος και το ρεύμα του κυκλώματος, χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους με αυτές των δυο προηγούμενων φάσεων. Η διάρκειά της λαμβάνεται ίση με τον χρόνο διάδοσης μιας μικρής διαταραχής που διατρέχει όλο το πλάτος της στήλης του πλάσματος.

e) Expanded Column Phase: Για την προσομοίωση του ίχνους του ρεύματος σε αυτή την φάση, η ακτίνα της στήλης του πλάσματος θεωρείται ότι «ξαφνικά» επεκτείνεται μέχρι αυτή να καλύψει όλο το πλάτος της ανόδου και στην συνέχεια διατηρείται σταθερή. Στην τελική αυτή φάση, ένα «snowplow» μοντέλο, αντίστοιχο με αυτό της αξονικής φάσης, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ύψους της στήλης και του ρεύματος. Η φάση αυτή δεν θεωρείται σημαντική αφού λαμβάνει χώρα μετά την εστίαση (focus) και τη δημιουργία «pinch». Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 6) απεικονίζονται, συναρτήσει του χρόνου, οι τροχιές (trajectories) του μαγνητικού εμβόλου ( $r_p$ ) και του κρουστικού μετώπου (inward- $r_s$  και reflected- $r_r$ ) στη διάρκεια των επιμέρους φάσεων της ακτινικής φάσης. Ακόμη, στο σχήμα αυτό σημειώνονται ο χρόνος συμπίεσης ( $t_{comp}$ ), ο χρόνος ζωής ( $t_f$ ) του συμπιεσμένου πλάσματος (pinch lifetime) και η ελάχιστη ακτίνα του ( $r_{min}$ ). Τα χαρακτηριστικά αυτά, όπως ορίζονται σε σχέση με τηνακτίνα της ανόδου ( $a$ ), εξαρτώνται μόνο από την φύση του αερίου πλήρωσης και είναι ανεξάρτητα από την ισχύ της συσκευής [49].





Εικόνα 5: Απλοποιημένο μοντέλο των φάσεων σχηματισμού του «pinch» [εικόνα από αναφ. 48].



Εικόνα 6: Τροχιές του μαγνητικού εμβόλου ( $r_p$ ) και του κρουστικού μετώπου ( $r_s$  &  $r_r$ ) κατά την διάρκεια της ακτινικής φάσης. [εικόνα από αναφ. 47]

## 4 Κεφάλαιο

### 4Εισαγωγή στο φύλλο εργασίας

#### 4.1.1 Άνοιγμα φύλλου εργασίας (EXEL)

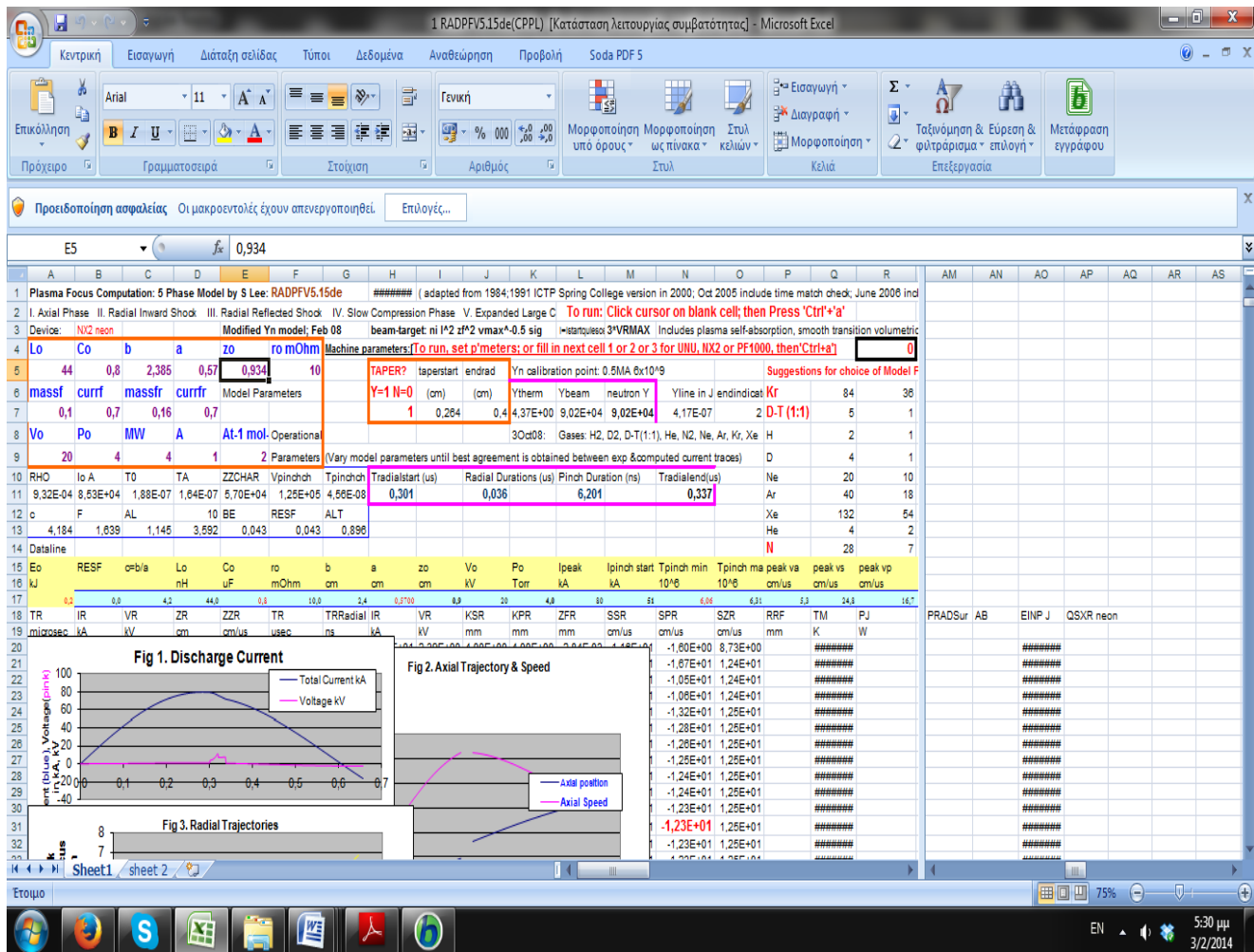
##### Το υλικό

Θα πρέπει να διαθέτουμε το RADPFV5.15de.xls στον Η/Υ μας για να μπορέσουμε να προσομοιώσουμε το plasma focus του εργαστηρίου. Το συγκεκριμένο αρχείο μπορούμε να κάνουμε download απο την ιστοσελίδα [www.plasmafocus.net](http://www.plasmafocus.net) . Καλό θα ήταν να έχουμε διατηρήσει ένα αντίγραφο "ασφάλειας" σε ένα φάκελο. Στην συγκεκριμένη περίπτωση εργαστήκαμε με το αντίγραφο στο density και κάθε φορά που χρειαστήκαμε να το μεταβάλουμε ή να αλλάξουμε τις ρυθμίσεις κάναμε save και ανατρέχαμε στον φάκελο ασφάλειας για χρήση του αντιγράφου

Κάνουμε διπλό κλικ στο "RADPFV5.15de(CPPL).xls" (για χάρη της προσομοίωσης του plasma focus που έχουμε στο εργαστήριο ονομάσαμε το αρχείο σε RADPFV5.15de(CPPL).xls )

Θα εμφανιστεί το φύλλο εργασίας και θα πρέπει να μοιάζει με αυτό στο σχήμα 1 [εμφανίζονται μόνο ως παράδειγμα].

Προειδοποίηση ασφαλείας "macros has been disabled" εμφανίζεται στην επάνω αριστερή γωνία του φύλλου εργασίας με πλευρικό κουτί "options". Κάνουμε κλικ στις "options" και επιλέγουμε το κουμπί "enable this content" μετέπειτα κάνουμε κλικ στο "OK". Τέλος, μετά από αυτή τη διαδικασία, το φύλλο εργασίας είναι macro-enabled και είναι έτοιμο για πυροδότηση.



Εικόνα 8. Εμφάνιση των worksheet-EXCEL 2007

## 4.2 Προκαταρκτικός Προσανατολισμός για τις Ρυθμίσεις Έλεγχου

### 4.2.1 Διαμόρφωση και Ρύθμιση συσκευής:

(Σημείωση: Κάθε κελί του φύλλου εργασίας Excel (2003 ή ανώτερο) ορίζεται από μια στήλη του αλφάβητου *A, B ή C.....* και με αριθμημένες σειρές *1, 2 ή 3 κ.λπ.* Η στήλη της αλφάβητου εμφανίζονται κατά μήκος στο επάνω άκρο του φύλλου εργασίας. Η σειρά με τους αριθμούς εμφανίζονται κατά μήκος του αριστερού άκρου του φύλλου εργασίας. Για παράδειγμα, το πεδίο *A4* βρίσκεται στην στήλη *A* στη σειρά *4*.

Ένα άλλο παράδειγμα: Τα *A4-F9* αναφέρεται στο μπλοκ των κελιών εντός του ορθογωνίου παραλληλογράμμου που συνορεύει με σειρά *A4-F4*, στήλη *A4-A9*, της σειράς *A9-F9* και *20* στηλών *F4-F9*, το μεγάλο κόκκινο-πορτοκαλί ορθογώνιο, περιέχει *6x6* κελία, κοντά στην πάνω αριστερή γωνία του Σχήματος 1.)

Θα ρυθμίσουμε το φύλλο EXEL που είδη έχουμε, έτσι ώστε να λειτουργεί σύμφωνα με της προδιαγραφές της συσκευής και της "βολής" που πραγματοποιήθηκε.

Εντοπίζουμε στο αρχείο τα κελία *A4 έως F9*. Αυτά τα κελία είναι για την ρύθμιση παραμέτρων της bank, οι παράμετροι του σωλήνα (tube), οι παράμετροι λειτουργίας και οι παράμετροι του μοντέλου.

### Οι παράμετροι είναι οι εξής:

**Τράπεζα(Bank):**  $L_0 = 44 \text{ nH}$ ,  $C_0 = 0,8 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $r_0 = 10 \text{ m}\Omega$ , όπου  $L_0$  η αυτεπαγωγή του πηνίου,  $C_0$  η ηλεκτρική χωρητικότητα του πυκνωτή και  $r_0$  η μεικτή αντίσταση.

**Σωλήνας(Tube):**  $b=2,385 \text{ cm}$ ,  $a=0,54 \text{ cm}$ ,  $z_0 = 0.934 \text{ cm}$ . Πρόκειται για τις τιμές των διαστάσεων του σωλήνα όπου  $b$  είναι η ακτίνα καθόδου,  $a$  ακτίνα ανόδου και  $z_0$  το ύψος της ανόδου.

**Λειτουργία(Operation):**  $V_0 = 20 \text{ kV}$ ,  $P_0 = 4 \text{ Torr}$ ,  $MW=4$ ,  $A=1$ ,  $At\text{-Mol} = 2$ , όπου  $V_0$  τάση λειτουργίας,  $P_0$  πίεση στο θάλαμο,  $MW$  μοριακό βάρος,  $A$  ο αριθμός νετρονίων στον πυρήνα του δευτέρου και  $At\text{-Mol}$  ατομική μάζα του δευτέρου σε σύγκριση με το υδρογόνο.

**Μοντέλο(Model):**  $massf (f_m) = 0,1$ ,  $currf (f_c) = 0,7$ ,  $massfr (f_{mr}) = 0,16$ ,  $currfr (f_{cr}) = 0,7$ , Ο συντελεστής  $f_m$  δείχνει το ποσοστό της μάζας που περιέχει η θήκη του πλάσματος κατά την κίνηση της, ο συντελεστής  $f_c$  αναφέρεται στο ποσοστό του ολικού ρεύματος του κυκλώματος, που ρέει μέσα από την θήκη και την επιταχύνει, ο συντελεστής μάζας  $f_{mr}$  αναφέρετε σε ταχύτητα μάζας και ο συντελεστής  $f_{cr}$  προσδιορίζει ταχύτητα ρεύματος.

	A	B	C	D	E	F
1	Plasma Focus Computation: 5 Phase Model by S Lee: RADPFV5.1!					
2	I. Axial Phase		II. Radial Inward Shock		III. Radial Reflected Shock	
3	Device:	Deuterio			Modified Yn model; Fet	
4	Lo	Co	b	a	zo	ro mOhm
5	44	0,8	2,385	0,57	0,934	10
6	massf	currf	massfr	currfr	Model Parameters	
7	0,1	0,7	0,16	0,7		
8	Vo	Po	MW	A	At-1 mol	Operational
9	20	4	4	1	2	Parameters

**Εικονα1EXEL:** Τράπεζα (bank), έτσι όπως παρουσιάζεται στο πρώτο φύλλο εργασία στο αρχείο 1 RADPFV5.15de(CPPL). Στον πίνακα μπορούμε να διακρίνουμε τα μεγέθη που έχουν τοποθετηθεί στα κελιά.

**Taper:** Τα κελία έλεγχου για την κωνική άνοδο (taper), συνήθως είναι απενεργοποιημένα έχοντας την τιμή " 0" (αριθμός μηδέν) στο κελί H7. Στην δική μας συσκευή έχουμε κωνική άνοδο όποτε επιλεγούμε "1" και συμπληρώνουμε τις τιμές στα αντίστοιχα κελιά I7 με 0,264 όπου αντιστοιχεί στο taperstart και στο J7 με 0,4 για endrad. Οι τιμές στα κελιά I7 και J7 είναι σε εκατοστά (cm).

**Κώνος (taper):**  $H7=1$ ,  $I7=0,264$ ,  $J7=0,4$  πρόκειται για την επιλογή ύπαρξης η όχι κώνου (taper) και οι διαστάσεις έναρξης I7 και λήξης J7

H	I	J
#####	( adapted from 1984;'	
I. Axial Phase II. Radial Inward Shock III. Radial Reflected Shock IV. Slow Compression Phase V. Expanded Large C		
beam-target: ni I^2 zf^2 vmax^.		
arameters: [To run, set p'meter		
TAPER?	taperstart	endrad
Y=1 N=0	(cm)	(cm)
1	0,264	0,4

**Εικόνα2 EXCEL:** Κώνος (Taper), διακρίνουμε την επιλογή τις χρήσης και τις διαστάσεις που μπορούμε να δηλώσουμε στη περίπτωση ύπαρξης του.

**One Click Device:** Το κελί ελέγχου R4 επιτρέπει την επιλογή ενός συγκεκριμένου πλάσματος εστίαση με τη χρήση αριθμών, μέχρι σήμερα διατίθενται 3 τύποι συσκευών και τους επιλέγονται με αριθμούς 1, 2, ή 3. Λοιπόν, έχουμε βεβαιωθεί ότι το R4 είναι συμπληρωμένο με τον αριθμό 0. (Αλλιώς θα πρέπει να προκαθορίσουμε στον κώδικα το επιλεγμένο μηχανήμα " 1" ή " 2" ή " 3".)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	
1	Plasma Focus Computation: 5 Phase Model by S Lee: RADPFV5.15de																	#####	( adapted from 1984;1991 ICTP Spring College version in 2000; Oct 2005 include time match check; June 2008 incl
2	I. Axial Phase II. Radial Inward Shock III. Radial Reflected Shock IV. Slow Compression Phase V. Expanded Large C																	To run: Click cursor on blank cell; then Press 'Ctrl+a'	
3	Device:	Deuterio			Modified Yn model:	Feb 08	beam-target:	ni I^2 zf^2 vmax^0.5 sig											
4	Lo	Co	b	a	zo	ro	mOhm	Machine parameters: [To run, set p'meters; or fill in next cell 1 or 2 or 3 for UNU, NX2 or PF1000, then 'Ctrl+a']											0
5	44	0,8	2,385	0,57	0,934	10		TAPER?	taperstart	endrad	Yn calibration point: 0.5MA 6x10^9				Suggestions for choice of Model F				
6	massf	currf	massfr	curfr	Model Parameters			Y=1 N=0	(cm)	(cm)	Ytherm	Ybeam	neutron Y	Yline in J	endindicat	Kr	84	36	
7	0,1	0,7	0,16	0,7				1	0,264	0,4	4,37E+00	9,02E+04	9,02E+04	4,17E-07	2	D-T (1:1)	5	1	
8	Vo	Po	MW	A	At-1 mol.	Operational													
9	20	4	4	1	2	Parameters	(Vary model parameters until best agreement is obtained between exp & computed current traces)										D	4	1
10	RHO	Io A	T0	TA	ZZCHAR	Vpinch	Tpinch	Tradialstart (us)	Radial Durations (us)	Pinch Duration (ns)	Tradialend(us)	Ne	20	10					
11	9,32E-04	8,53E+04	1,88E-07	1,64E-07	5,70E+04	1,25E+05	4,56E-08	0,301	0,036	6,201	0,337	Ar	40	18					
12	c	F	AL	10	BE	RESF	ALT					Xe	132	54					
13	4,184	1,639	1,145	3,592	0,043	0,043	0,898					He	4	2					
14	Dateline											N	28	7					

**Εικόνα3EXCEL:** είναι το σημείο όπου μπορούμε να επιλέξουμε διάφορες συσκευές πλάσματος εστίασης. Στην δική μας περίπτωση χρησιμοποιούμε το '0'.

A5	B5	C5	D5	E5	F5
44	0,8	2,385	0,57	0,934	10
A9	B9	C9	D9	E9	
20	4	4	1	2	
A7	B7	C7	D7		
0,1	0,7	0,16	0,7		
H7	I7	J7			
1	0,264	0,4			

**Πίνακας 5.** Γρήγορος πίνακας ρυθμίσεων Bank, Tube, Λειτουργίας και Tapen στην πειραματική συσκευή του Plasma Focus

Για σκοπούς αναγνώρισης πληκτρολογούμε στο **B3 "δευτέριο"**.

Τέλος, για την πυροδότηση τοποθετούμε το δρομέα σε ένα οπουδήποτε κενό ή μη ενεργό χώρο, π. χ. ομάδα G8. (Τοποθετούμε το σημείο του κέρσορα στο κελί G8 και κάνουμε δεξί κλικ). Πατάμε τα πλήκτρα **"Ctrl"** και **"A"** ταυτόχρονα (που ισοδυναμεί με την πυροδότηση shot). Το πρόγραμμα λειτουργεί και σε λιγότερο από ένα λεπτό, η εκτέλεση έχει ολοκληρωθεί.

## 4.2.2 Επεξήγηση των κελιών και ανάλυση αποτελεσμάτων.

Τα κελία A10-G13 υπολογίζουν της χαρακτηριστικές των ποσοτήτων του διαμορφωμένου plasma focus.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Plasma Focus Computation: 5 Phase Model by S Lee: RADPFV5.15de										##### ( adapted from 1984;1991 ICTP Spring College version in 2000; Oct 2005 include			
2	I. Axial Phase II. Radial Inward Shock III. Radial Reflected Shock IV. Slow Compression Phase V. Expanded Large C										To run: Click cursor on blank cell; then			
3	Device: Deuterio		Modified Yn model; Feb 08				beam-target: ni I^2 zf^2 vmax^-0.5 sig		I=istartqlessc 3*VRMAX		Includes plasr			
4	Lo	Co	b	a	zo	ro mOhm	Machine parameters: To run, set p'meters; or fill in next cell 1 or 2 or 3 for UNU, NX2 or PF100							
5	44	0,8	2,385	0,57	0,934	10	TAPER?	taperstart	endrad	Yn calibration point: 0.5MA 6x10^9				
6	massf	currf	massfr	currfr	Model Parameters			Y=1 N=0	(cm)	(cm)	Ytherm	Ybeam	neutron Y	Yline in J
7	0,1	0,7	0,16	0,7				1	0,264	0,4	4,37E+00	9,02E+04	9,02E+04	4,17E-07
8	Vo	Po	MW	A	At-1 mol.	Operational Parameters			3Oct08: Gases: H2, D2, D-T(1:1), He, N2, Ne, Ar, Kr, Xe					
9	20	4	4	1	2	Parameters (vary model parameters until best agreement is obtained between exp & computed current traces)								
10	RHO	Io A	T0	TA	ZZCHAR	Vpinchch	Tpinchch	Tradiatstart (us)	Radial Durations (us)	Pinch Duration (ns)	Tradiatend(us)			
11	9,32E-04	8,53E+04	1,88E-07	1,64E-07	5,70E+04	1,25E+05	4,56E-08	0,307	0,036	6,201	0,337			
12	c	F	AL	10	BE	RESF	ALT							
13	4,184	1,839	1,145	3,592	0,043	0,043	0,896							
14	Device line													
15	Eo	RESF	0,001	0,001	0,001	0,001	b	a	zo	Vo	Po	Ipeak	Ipinch start	Tpinch min
16	kJ		nH	uF	mOhm	cm	cm	cm	kV	Torr	kA	kA	10^6	

Εικόνα4EXCEL: Παρατηρούμε τα αποτελέσματα του διαμορφωμένου plasma focus

Τα κελία K6-M7 υπολογίζουν την απόδοση των νετρονίων, των στοιχείων και το συνολικό, εάν και μόνο αυτό λειτουργεί με δευτέριο.

	I	J	K	L	M	N	O
	adapted from 1984;1991 ICTP Spring College version in 2000; Oct 2005 include						
	Phase V. Expanded Large C To run: Click cursor on blank cell; then						
	ni I^2 zf^2 vmax^-0.5 sig I=istartqlessc 3*VRMAX Includes plasma self-abs						
	run, set p'meters; or fill in next cell 1 or 2 or 3 for UNU, NX2 or PF100						
	perstart	endrad	Yn calibration point: 0.5MA 6x10^9				
	(cm)	(cm)	Ytherm	Ybeam	neutron Y	Yline in J	endindicat
	0,264	0,4	4,37E+00	9,02E+04	9,02E+04	4,17E-07	2
	3Oct08: Gases: H2, D2, D-T(1:1), He, N2, Ne, Ar, Kr, Xe						
	until best agreement is obtained between exp & computed current traces)						
	us)	Radial Durations (us)	Pinch Duration (ns)	Tradiatend(us)			
		0,036	6,201	0,337			

Εικόνα5EXCEL: Απόδοση νετρονίων σε λειτουργία δευτερίου



Τα κελία N6-N7 υπολογίζουν την γραμμική ακτινοβολία SXR.

I	J	K	L	M	N	O
adapted from 1984;1991 ICTP Spring College version in 2000; Oct 2005 includ						
Phase V. Expanded Large C <b>To run: Click cursor on blank cell; then</b>						
ni I^2 zf^2 vmax^-0.5 sig   I=Istartqlesoc 3*VRMAX   Includes plasma self-absc						
<b>run, set p'meters; or fill in next cell 1 or 2 or 3 for UNU, NX2 or PF100!</b>						
perstart	endrad	Yn calibration point: 0.5MA 6x10^9				
(cm)	(cm)	Ytherm	Ybeam	neutron Y	Yline in J endindicat	
0,264	0,4	4,37E+00	9,02E+04	9,02E+04	4,17E-07	2
3Oct08: Gases: H2, D2, D-T(1:1), He, N2, Ne, Ar, Kr, Xe						
until best agreement is obtained between exp & computed current traces)						
us)	Radial Durations (us)	Pinch Duration (ns)	Tradialleng(us)			
	0,036	6,201	0,337			

Εικόνα6EXCEL: Γραμμή ακτινοβολίας SXR

Τα κελία H10-N11 υπολογίζουν την διάρκεια της αξονικής φάσης, της ακτινικής φάσης, της φάσης συμπίεσης (pinch) και τον τελικό χρόνο της ακτινικής φάσης.

G	H	I	J	K	L	M	N	O
5de ##### ( adapted from 1984;1991 ICTP Spring College version in 2000; Oct 2005 includ								
IV. Slow Compression Phase V. Expanded Large C <b>To run: Click cursor on blank cell; then</b>								
b 08 beam-target: ni I^2 zf^2 vmax^-0.5 sig   I=Istartqlesoc 3*VRMAX   Includes plasma self-absc								
<b>Machine parameters:[To run, set p'meters; or fill in next cell 1 or 2 or 3 for UNU, NX2 or PF100</b>								
	TAPER?	taperstart	endrad	Yn calibration point: 0.5MA 6x10^9				
	Y=1 N=0	(cm)	(cm)	Ytherm	Ybeam	neutron Y	Yline in J endindicat	
	1	0,264	0,4	4,37E+00	9,02E+04	9,02E+04	4,17E-07	2
3Oct08: Gases: H2, D2, D-T(1:1), He, N2, Ne, Ar, Kr, Xe								
(Vary major parameters until best agreement is obtained between exp & computed current traces)								
Tpinch	Tradialleng(us)	Radial Durations (us)	Pinch Duration (ns)	Tradialleng(us)				
4,56E-08	0,301	0,036	6,201	0,337				
ALT								
0,898								

Εικόνα7EXCEL:Διάρκεια ακτινικής και αξονικής φάσης και φάσης συμπίεσης

Τα κελία A15-A17 φαίνετε ως μια γραμμή στοιχείων και πληροφοριών, που περιέχει δεδομένα της σειράς 17 με τις αντίστοιχες ετικέτες (και μονάδες) στις σειρές 15 και 16.

### Δεδομένα:

E0, RESF,  $c=b/a$ , L0, C0, r0, b, a, z0, V0, P0, Ipeak, Ipinchstart, Tpinchmin, Tpinchmax, peak va, peak vs, peak vp, amin (which is rmin), zmax, pinch duration, Vmax, nIpinchmax, Yn, Qsxr, Qsxr%, fm, fc, fmr, fcr, EINP, taxialend, SF, ID and Qline;, κάποια άλλα ακόμα μπορεί να προστεθούν απο σταδιακά.

Στον συγκεντρωτικό πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 4), αναφέρονται όλα τα στοιχεία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Στήλες γραμμές	A	B	C	D	E	F
15	E0	RESF	C=b/a	L0	C0	r0
16	KJ	-	-	nH	μF	mOhm
17	0,2	0,042	4,2	44	0.8	10
Στήλες γραμμές	G	H	I	J	K	L
15	b	a	z0	V0	P0	Ipeak
16	Cm	Cm	Cm	Kv	Torr	KA
17	2,4	0,57	0,9	2	4	8
Στήλες γραμμές	M	N	O	P	Q	R
15	Ipinchstart	Tpinchmin	Tpinchma	peakVa	peakVs	peakVp
16	KA	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	Cm/μs	Cm/μs	Cm/μs
17	51	6,06	6,31	5,3	24,8	16,7
Στήλες γραμμές	S	T	U	V	W	X
15	amin	zmax	pnch	Vmax	nIpinchmax	Yn
16	Cm	Cm	Cm	KV	(1023)/m	10 <sup>10</sup>
17	0,07	0,7	6,2	10,6	3,2	9,02
Στήλες γραμμές	Y	Z	AA	AB	AC	AD
15	Deleted	Deleted	fm	fc	fmr	fcr
16	J	%	-	-	-	-
17	4,1*10 <sup>-7</sup>	2,6*10 <sup>-7</sup>	0,1	0,7	0,16	0,7
Στήλες γραμμές	AE	AF	AG	AH	AI	
15	EINP	taxialend	Sf	ID	Yline	
16	μs	μs	-	Ka/cm	-	
17	0,3	0,3	70Y/	-	4,1	

Πίνακας 4: Ο παραπάνω πίνακας αναφέρετε στα αποτελέσματα του Worksheet στην γραμμή Data line.

Ένα πολύ χρήσιμο χαρακτηριστικό το οποίο είναι κάλο να αναφέρουμε είναι ότι μας επιτρέπει τα υπολογιζόμενα δεδομένα απο κάθε βολή να μπορούν να αντιγράφουν και κατά συνέπεια να επικολληθούν σε ένα άλλο φύλλο. Έτσι, διαφορετικές λήψεις μπορούν να τοποθετηθούν σε μια ακολουθία, ούτως ώστε να δημιουργηθούν συγκριτικοί πίνακες. Οι στήλες απο *A20* έως *AP20* υπολογίζουν τα αποτελέσματα απο σημείο σε σημείο (τα δεδομένα είναι αντίστοιχα τοποθετημένα στη σειρά *A18* και στη σειρά *19*) για τις ακόλουθες ποσότητες αντίστοιχα:

Ο χρόνος σε *μs*, το συνολικό ρεύμα τάση tube, η αξονική θέση, η αξονική ταχύτητα, ο χρόνος της ακτινικής φάσης σε *μs* ξεκινώντας να μετράμε από την έναρξη της αξονικής φάσης, ο χρόνος της ακτινικής φάσης σε *ns* από την έναρξη της ακτινικής φάσης, οι αντίστοιχες ποσότητες του ρεύματος, η τάση, η ακτινική θέση συμπίεσης (shock), η ακτινική θέση εμβόλου, η ακτινική διάκια συμπίεσης (pinch), η ακτινική κρούση (shock), οι ταχύτητες επιμήκυνσης του εμβόλου και συμπίεσης (pinch), η θέση ανακλώμενης κρούσης (shock), η θερμοκρασία πλάσματος, η ισχύς Joule, η ενεργεία Bremsstrahlung, ο ανασυνδιασμού (recombination), η γραμμική εκπομπή ισχύος, η συνολική ακτινοβολία ισχύος, η συνολική ισχύς, η ενεργεία Joule, η συνολική ενέργεια, ο συντελεστής διόρθωσης (correction factor) του αυτό απορροφημένου πλάσματος, η ισχύς back-body, η συγκεκριμένη αναλογία θερμότητας και ο αριθμός της αποτελεσματικής φόρτισης, ο αριθμός των θερμοπυρηνικών νετρονίων, ο αριθμός των νετρονίων στόχου-ακτίνας (beam-target), ο συνολικός αριθμός νετρονίων, η πυκνότητα των ιόντων, η ένταση της ισχύς της ακτινοβολία, η επιφανειακή ακτινοβολία ισχύος, ο συντελεστής διόρθωσης του αυτό απορροφημένου (self-absorption) πλάσματος, η ακτινική φάση του εμβόλου που λειτουργεί σε % της *E0*, νέον εκπομπών ενέργειας SXR.

Κάθε ποσότητα, οπός προαναφέραμε, υπολογίζεται ως μια συνάρτηση του χρόνου (εμφανίζεται στη σχετική στήλη στο φύλλο εργασίας EXEL) και εμφανίζεται στη αντίστοιχη στήλη. Μετά απο κάθε εκτέλεση (Ctrl + A), κάθε μία από αυτές τις στήλες γεμίζει αρκετές χιλιάδες κελία.

Μετά την πυροδότηση θα παρατηρήσουμε ότι εμφανίζονται τα υπολογισμένα αποτελέσματα σε 8 Σχήματα (διαγράμματα):

## Κεφάλαιο 5

### 5.1.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Οι παράμετροι του μοντέλου  $fm$ ,  $fmr$ ,  $fc$  και  $fcr$  επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση στην παραγωγή νετρονίων. Οι τιμές τους ορίστηκαν μέσα στα συνήθη πειραματικά όρια για το δευτέριο, με γνώμονα η μειωμένη απόδοση που προκύπτει από τα αποτελέσματα να καλύπτει τις προδιαγραφές της πηγής.

Στα γραφήματα που ακολουθούν απεικονίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια (90J). Ειδικότερα: Στο πρώτο γράφημα (Σχήμα 1) απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη, για όλες τις φάσεις, της έντασης του ολικού ηλεκτρικού ρεύματος (Total Current), της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος που ρέει μόνο μέσα από το πλάσμα (Plasma Current) και της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου (Tube Voltage) στα σημεία σύνδεσης της εξωτερικού κυκλώματος.

Στο δεύτερο γράφημα (Σχήμα 2) απεικονίζονται η τροχιά και η ταχύτητα της θήκης του πλάσματος, κατά την διάρκεια της αξονικής φάσης και της φάσης διευρυμένης στήλης.

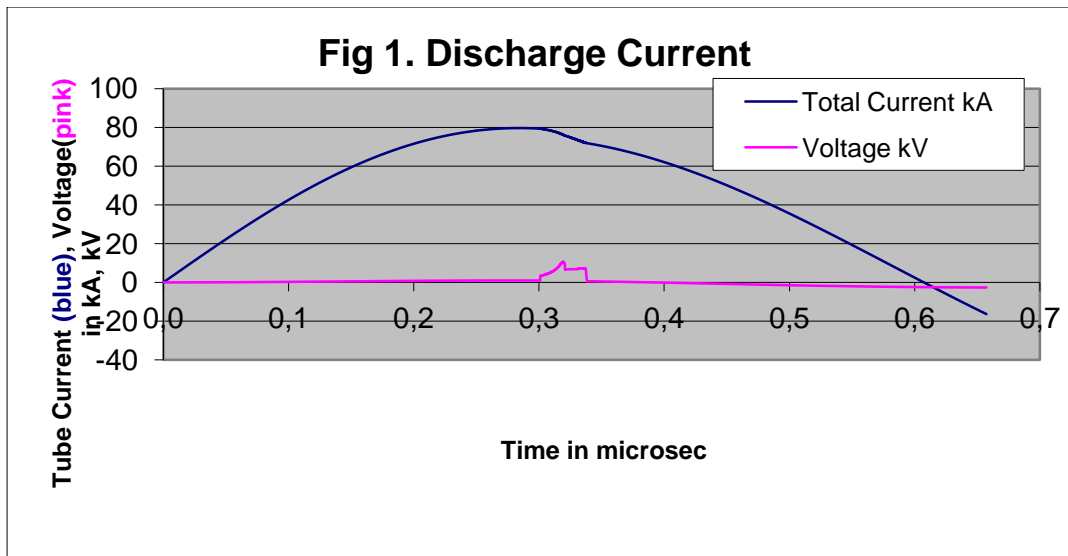
Στο τρίτο γράφημα (Σχήμα 3) απεικονίζονται οι τροχιές (trajectories) του μαγνητικού εμβόλου (rp), του κρουστικού μετώπου (inward-rs και reflected-rr) και της επιμήκυνσης (elongation) της στήλης του πλάσματος σε ύψος (zf) για το χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί στην ακτινική φάση.

Στο τέταρτο γράφημα (Σχήμα 4) απεικονίζεται ο δυναμικός συντελεστής της αυτεπαγωγής του θαλάμου σωληνοειδούς μορφής (Tube Inductance), όπου φαίνεται το «άλμα» (jump) στη μεταβολή της τιμής του, που ευθύνεται για την εμφάνιση της «δυναμικής αντίστασης= $1/2 \cdot dLch/dt$ » [60] του πλάσματος και την επακόλουθη «βύθιση» που παρατηρείται στην ένταση του ρεύματος (Σχήμα 1) κατά την διάρκεια της αξονικής φάσης.

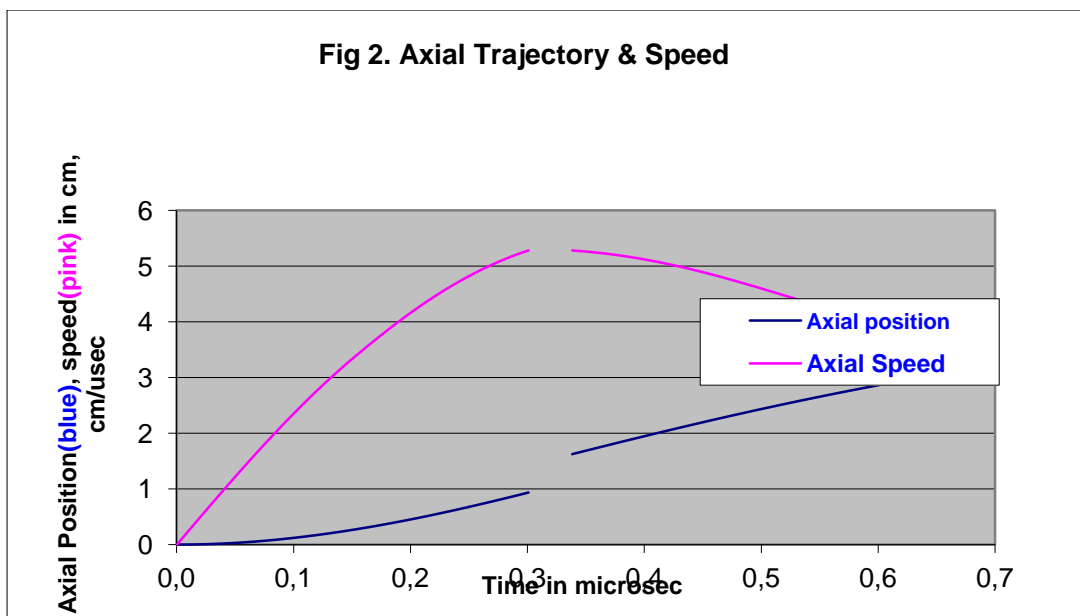
Στο πέμπτο γράφημα (Σχήμα 5) απεικονίζονται οι ταχύτητες που αντιστοιχούν στις τροχιές του δεύτερου γραφήματος,

Στο έκτο (Σχήμα 6) και έβδομο (Σχήμα 7) γράφημα απεικονίζονται, αντίστοιχα, η θερμοκρασία και η πυκνότητα του πλάσματος κατά την διάρκεια της ακτινικής φάσης.

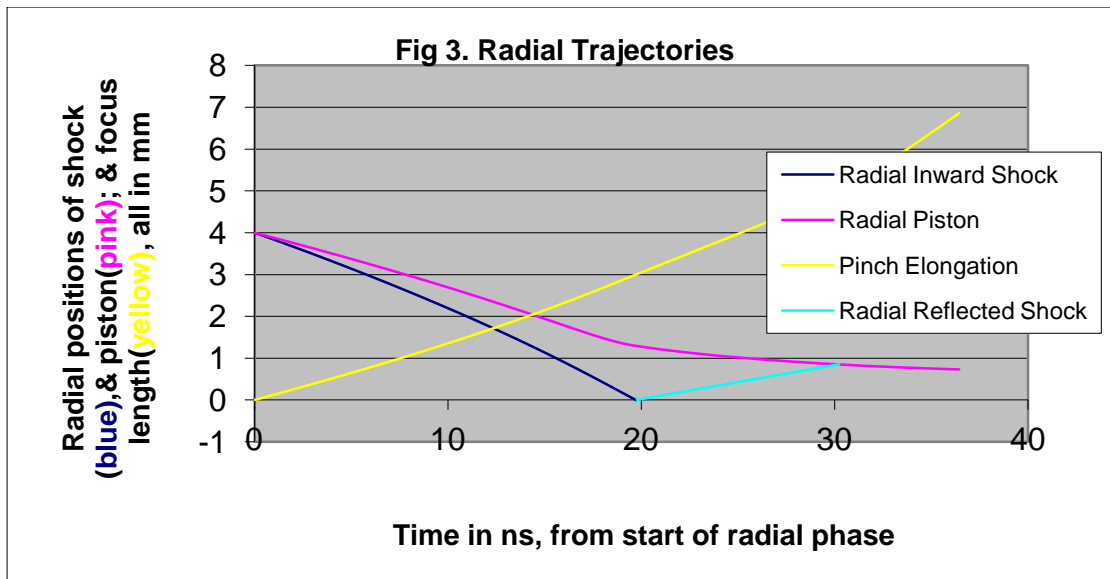
Στο Τελευταίο γράφημα (Σχήμα 8) απεικονίζεται η ενέργειας Joule και η ακτινοβολία ισχύος. Ο χρόνος περιγράφεται σε νανοδευτερόλεπτα, ξεκινώντας από την αρχή της ακτινικής φάσης.



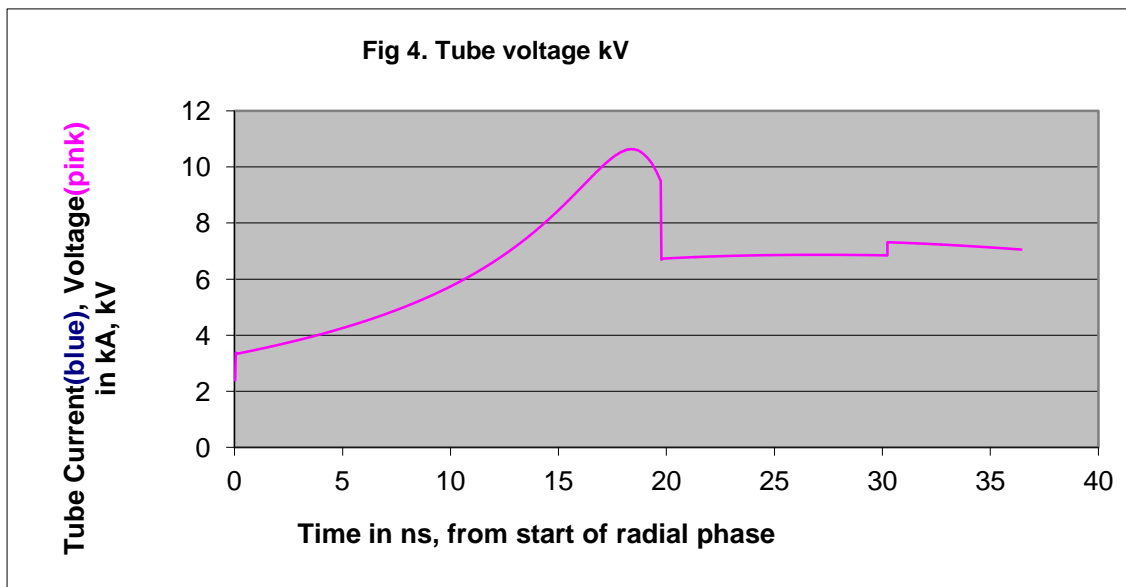
**Σχήμα 1:** Χρονική εξέλιξη, για όλες τις φάσεις, της έντασης του ολικού ηλεκτρικού ρεύματος (Total Current), της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος που ρέει μόνο μέσα από το πλάσμα (Plasma Current) και η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου (Tube Voltage).



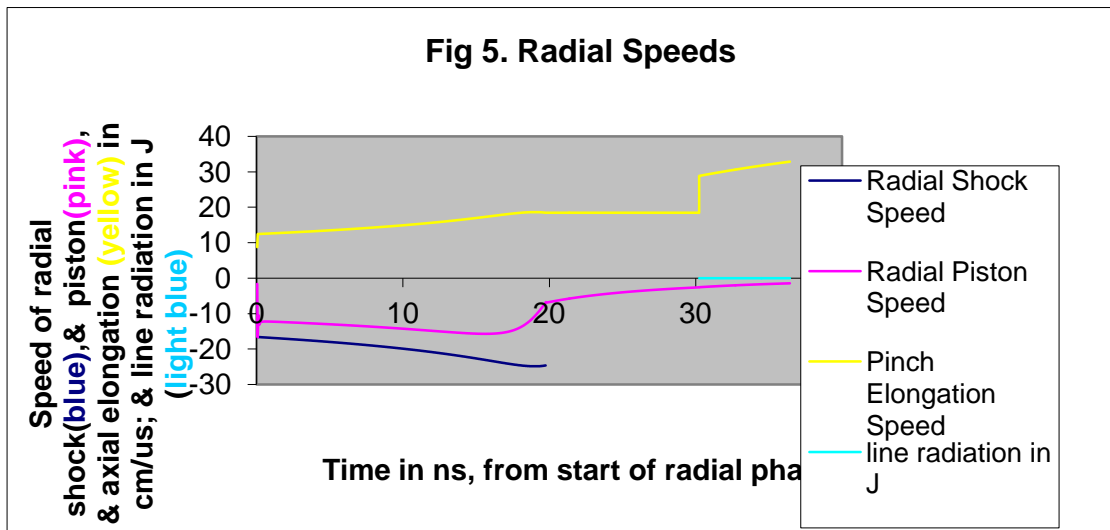
**Σχήμα 2:** Η τροχιά (με σημείο αναφοράς τη βάση του ενεργού τμήματος της ανόδου) και η ταχύτητα της θήκης του πλάσματος, κατά την διάρκεια της αξονικής φάσης και της φάσης διευρυμένης στήλης (σημ: τα δεδομένα που δεν απεικονίζονται αντιστοιχούν στο χρονικό διάστημα της ακτινικής φάσης).



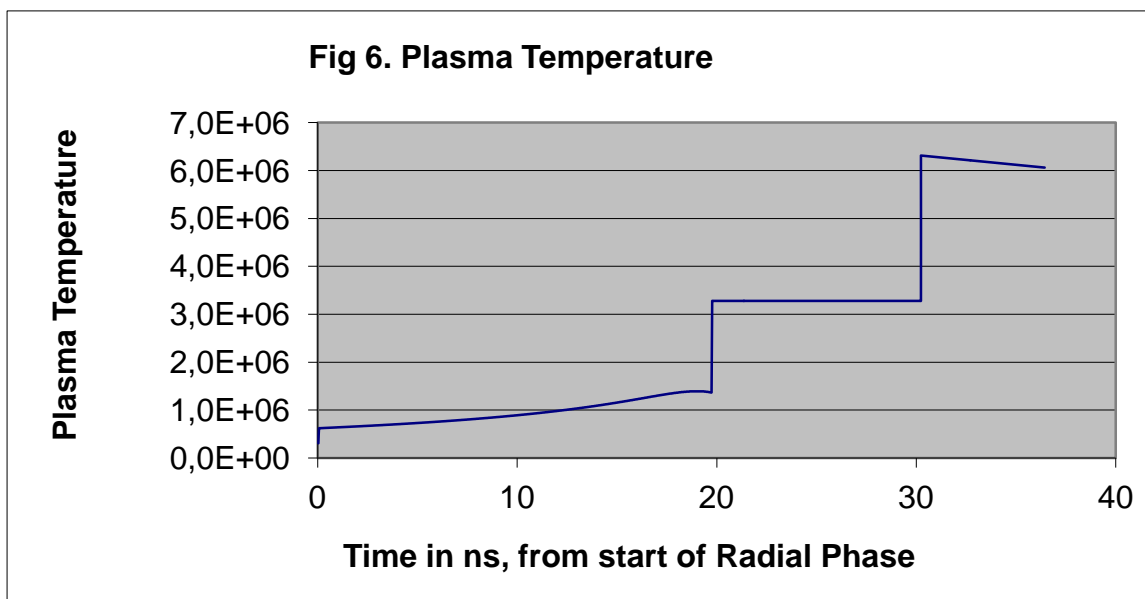
**Σχήμα 3:** Τροχιές (trajectories) του μαγνητικού εμβόλου ( $r_p$ ), του κρουστικού μετώπου (inward- $r_s$  και reflected- $r_r$ ) και της επιμήκυνσης (elongation) της στήλης του πλάσματος, σε ύψος ( $z$ ) για το χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί στην ακτινική φάση.



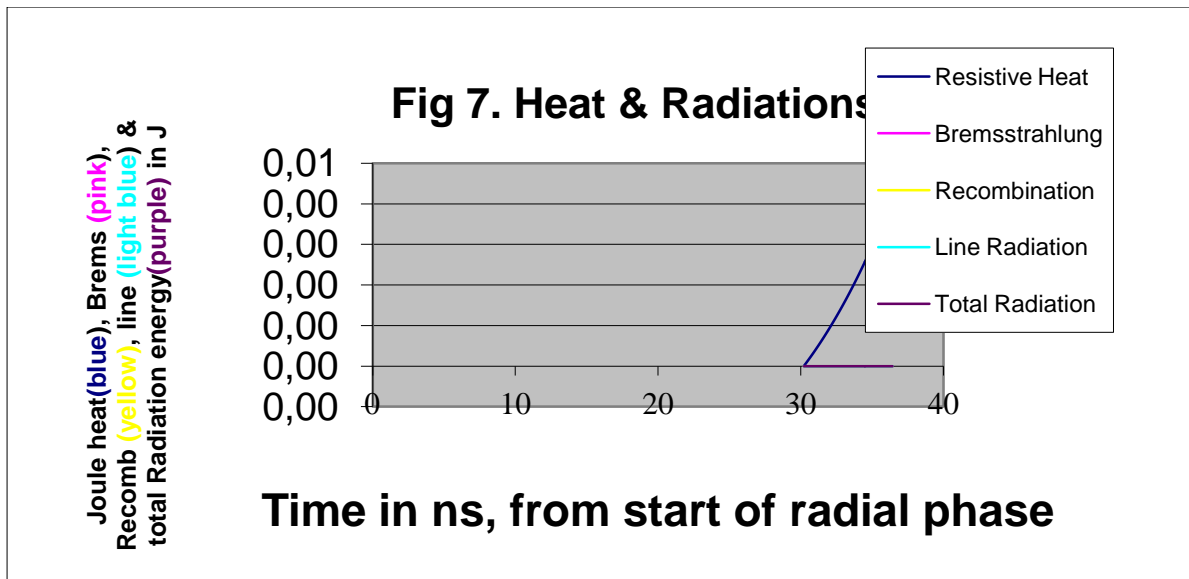
**Σχήμα 4:** Ο δυναμικός συντελεστής της αυτεπαγωγής του θαλάμου, όπου διακρίνεται το «άλμα» (jump) στη μεταβολή της τιμής του, το οποίο ευθύνεται για την εμφάνιση της «δυναμικής αντίστασης» του πλάσματος και την επακόλουθη «βύθιση» της έντασης του ρεύματος κατά την διάρκεια της αξονικής φάσης.



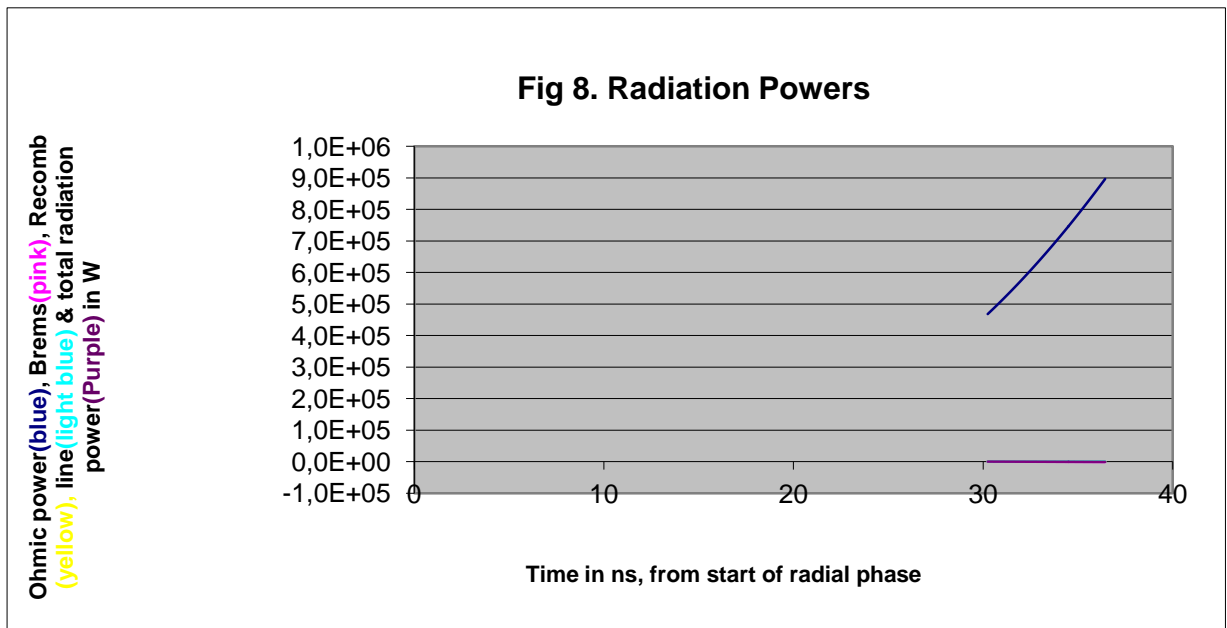
**Σχήμα 5:** Ταχύτητες που αντιστοιχούν στις τροχιές του μαγνητικού εμβόλου (rp), του κρουστικού μετώπου (inward-rs και reflected-r) και της επιμήκυνσης (zf) της στήλης του πλάσματος για το χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί στην ακτινική φάση.



**Σχήμα 6:** Η θερμοκρασία του πλάσματος σε (eV) κατά την διάρκεια της ακτινικής φάσης.

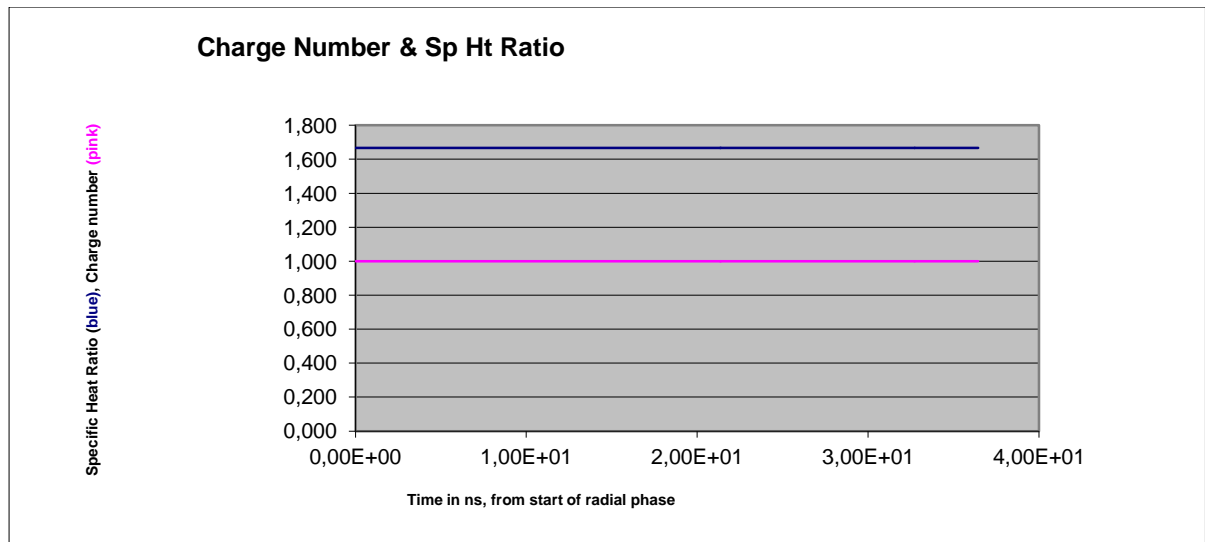


**Σχήμα 7:** θερμότητα joule και ακτινοβολία ενέργειας. Ο χρόνος περιγράφεται σε νανοδευτερόλεπτα, ξεκινώντας από την αρχή της ακτινικής φάσης



**Σχήμα 8:** ενέργειας Joule και ακτινοβολία ισχύος. Ο χρόνος περιγράφεται σε νανοδευτερόλεπτα, ξεκινώντας από την αρχή της ακτινικής φάσης





**Σχήμα 9:** βαθμός ιονισμού και λόγος ειδικών θερμοκρασιών. Ο χρόνος περιγράφεται σε νανοδευτερόλεπτα, ξεκινώντας από την αρχή της ακτινικής φάσης

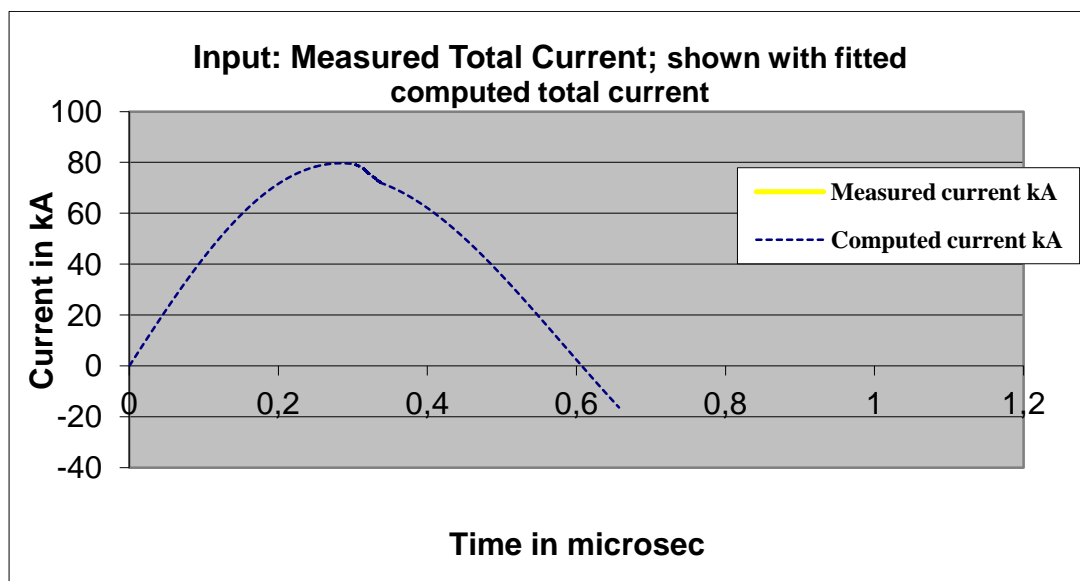
Μια συμπληρωματική εικόνα θα θα εμφανιστεί την δεξιά πλευρά για την συγκεκριμένη αναλογία θερμότητας και τον πραγματικό αριθμό φόρτισης κατά την διάρκεια της ακτινικής φάσης

	Σειρά 1	Σειρά 2	Σειρά 3	Σειρά 4
<b>Σχήμα 1</b> (επάνω αριστερά)	Συνολικό Ρεύμα	Τάση		
<b>Σχήμα 2</b> (επάνω δεξιά)	Αξονική θέση	Αξονική ταχύτητα		
<b>Σχήμα 3</b>	Radial inward shock	Ακτινική θέση εμβόλου	Μήκος Συμπύεσης	Αξονική reflected shock
<b>Σχήμα 4</b>	Τάση			
<b>Σχήμα 5</b>	Ακτινική ταχύτητα κρούσης	Ακτινική Ταχύτητα εμβόλου	Ταχύτητα επιμήκυνσης συμπύεσης	Ενέργεια ακτινοβολίας
<b>Σχήμα 6</b>	Θερμοκρασία πλάσματος			
<b>Σχήμα 7</b>	Θερμική ενέργεια	Ενεργεία Bremsstrahlung	Ενεργεία Recombination	Γραμμική ακτινοβολία
<b>Σχήμα 8</b>	Ισχύ Joule	Ισχύς Bremsstrahlung	Ισχύς Recombination	Ισχύς ακτινοβολίας

**Πίνακας 2** - Οδηγός απεικόνισης και σχεδίασης των σχημάτων (figures) του Φύλλου 1 του Worksheet. Ο οριζόντιος άξονας (σχ. 1&2) είναι χρόνος σε  $\mu s$ . Τα υπόλοιπα στοιχεία παρουσιάζουν τα υπολογιζόμενα δεδομένα για τις ακτινικές φάσεις. Ο χρόνος ακτινικής φάσης είναι σε κλίμακα ns.

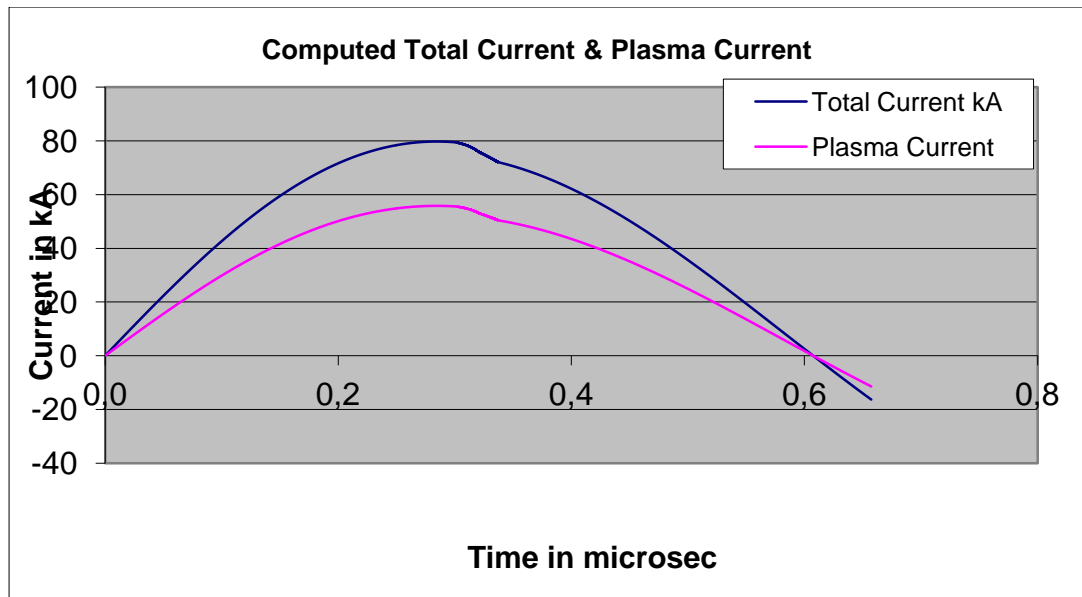
## 5.2. Παρατηρήσεις στις υπολογιζόμενες ποσότητες από το μοντέλο κώδικα του Lee (Computed Διαγράμματα απο το Worksheet 2)

Ο κώδικας μπορεί να δηχθεί ρύθμισης για οπουδήποτε μοντέλο πλάσματος εστίασης και μπορεί να υπολογίσει και να προσομοιώσει όλη την διάρκεια του. Σαν τελευταία ρύθμιση, έχουμε τοποθέτηση ικανοποιητικά την χαρακτηριστική του συνολικού ρεύματος με το μετρούμενο. Όταν τελειώσει τους απαραίτητους υπολογισμούς θα δημιουργηθούν τα παρακάτω διαγράμματα και κυματομορφές. Σημειώνουμε ότι η συσκευή μας λειτουργεί στα 20 kV, 4 Torr σε δευτέριο (Deuterium).

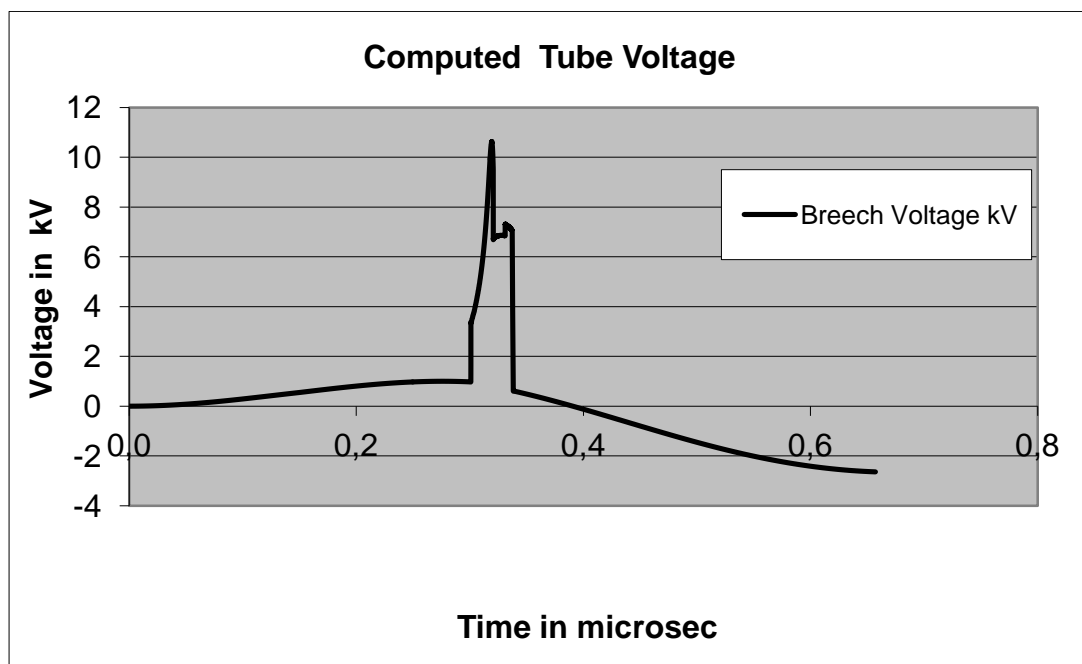


Σχήμα 7a.  $I_{total}$  συνολικό ρεύμα

Η υπολογιζόμενη κυματομορφή του συνολικού ρεύματος τυπικά συμφωνεί απόλυτα με τη μετρούμενη, εξαιτίας της τοποθέτησης. Το τέλος της ακτινικής φάσης υποδεικνύεται στο σχήμα 7a. Το Ρεύμα του πλάσματος είναι σπανίως μετρίσιμο. Το υπολογιζόμενο ρεύμα του πλάσματος σε αυτή την περίπτωση της εργαστηριακής συσκευής εμφανίζεται στο σχήμα 7b.

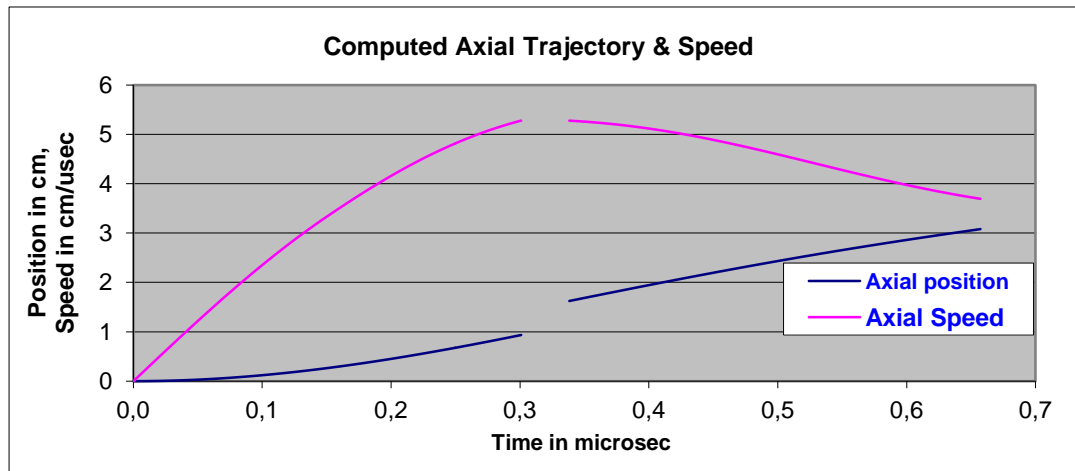


Σχήμα 7b.  $I_{total}$  &  $I_{plasma}$  Συνολικό ρεύμα και ρεύμα πλάσματος

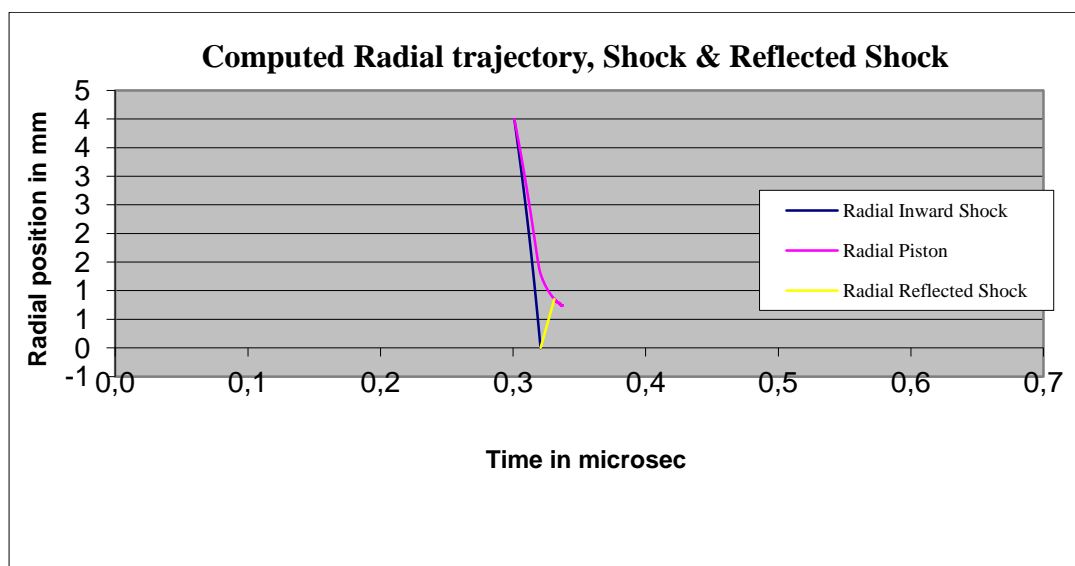


Σχήμα 7c. Τάση στο σωλήνα (Tube)

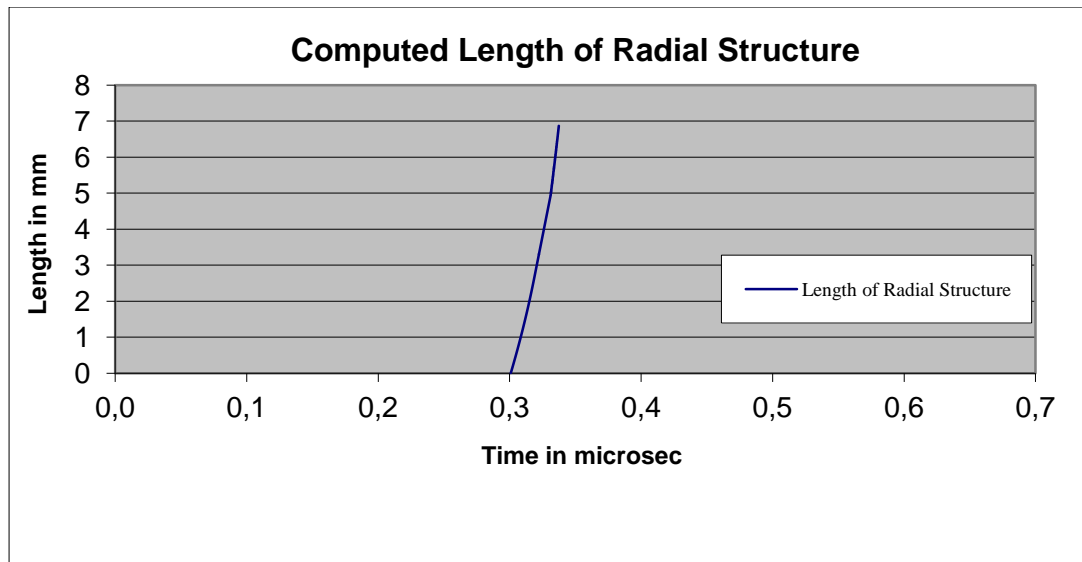
Συνήθως την υπολογιζόμενη τάση του σωλήνα (tube) είναι αρκετά δύσκολο να τη συγκρίνουμε με την μετρούμενη τάση, όσον αφορά τις τιμές κορυφής. Αυτό οφείλεται στην κακή χρονικής απόκρισης των διαιρετών τάσης. Ωστόσο, η υπολογιστική κυματομορφή στο σχήμα 7c είναι γενικά όπως την περιμέναμε.



Σχήμα 7d. Αξονική καμπύλη τροχιάς και ταχύτητα

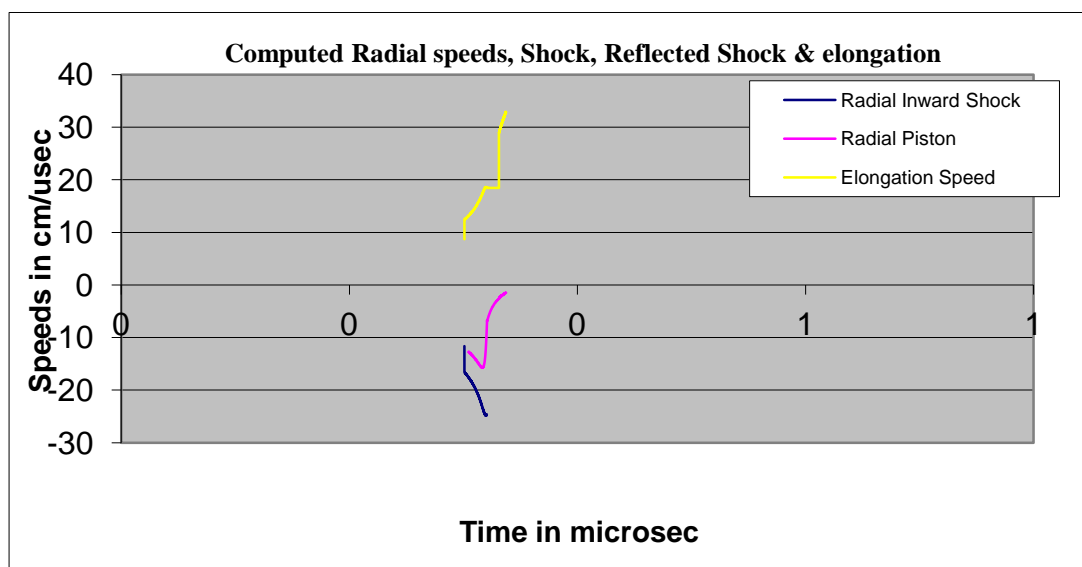


Σχήμα 7e. Ακτινική τροχιά κρούσης και ανάκλασης

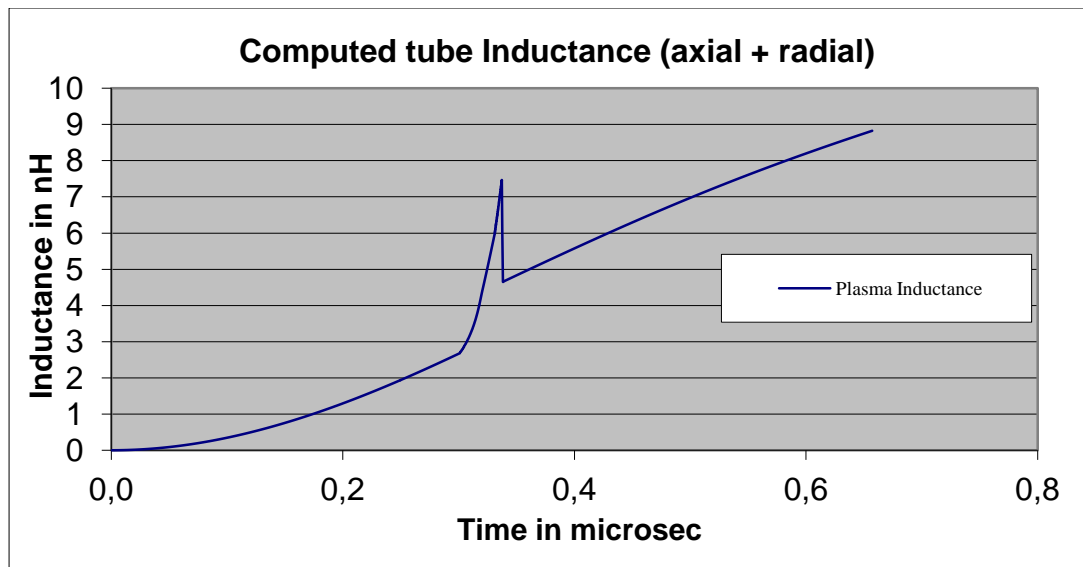


Σχήμα 7f. Διάρκεια της Ακτινικής Δομής.

Η υπολογίσιμη αξονική τροχιά (axial trajectory) και ταχύτητα, συμφωνούν με τα πειραματικά χρονοδιαγράμματα. Επιπλέον, η συμπεριφορά τους με την πίεση, εκτελούν τον κώδικα σε διάφορες πιέσεις, και συμφωνούν με τα πειραματικά αποτελέσματα. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επισημάνουμε ότι οι ακτινικές τροχιές και ταχύτητες είναι δύσκολο να μετρηθούν. Οι υπολογιζόμενες τροχιές (trajectories) στο σχήμα 7e συμφωνούν με τα λιγοστά διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα. Η διάρκεια της ακτινικής δομής παρουσιάζεται στο σχήμα 7f. Τέλος η υπολογισμένη ταχύτητα της εμπρόσθιας ακτινικής κρούσης (shock), όπως ακόμα η ταχύτητα του εμβόλου και η ταχύτητα της επιμήκυνσης της δομής φαίνονται στο σχήμα 7g.

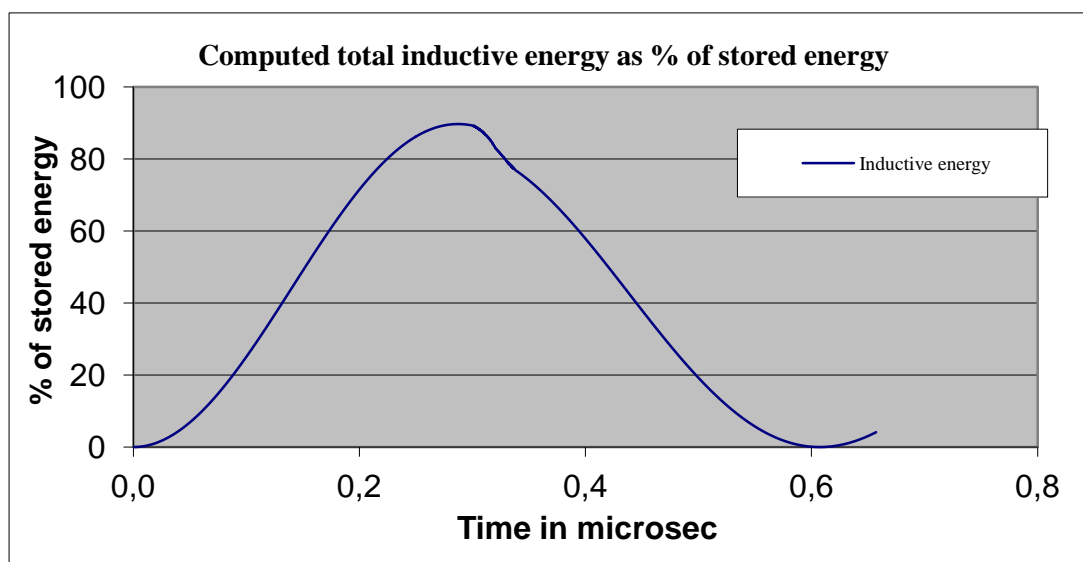


Σχήμα 7g. Ακτινική Ταχύτητα, κρούση, αντανάκλαση κρούσης και επιμήκυνση



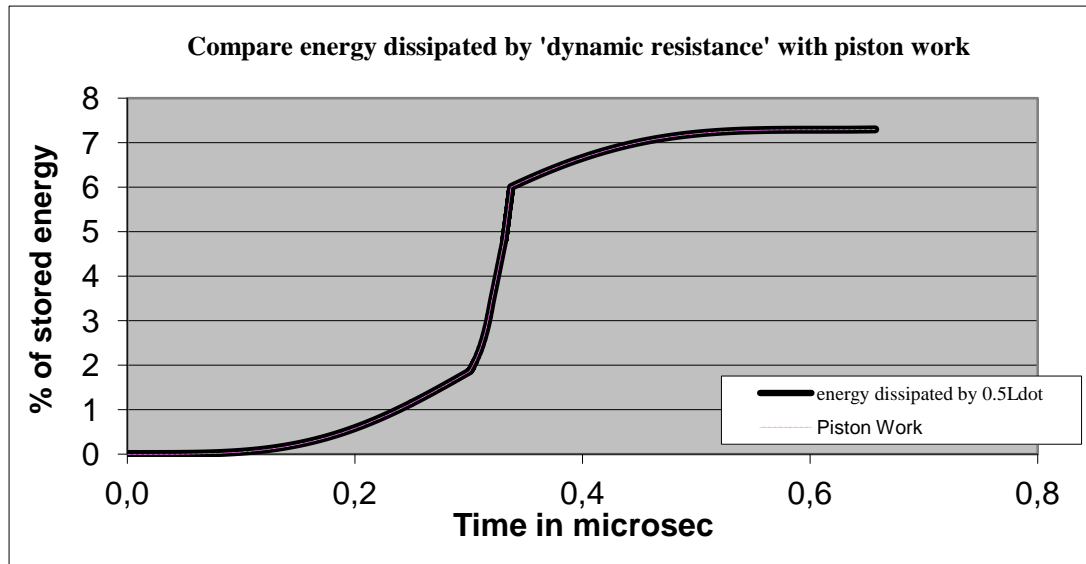
Σχήμα 7h. Αυτεπαγωγή σωλήνα σε ακτίνα και άξονα

Η υπολογιζόμενη αυτεπαγωγή (σχήμα 7h) δείχνει μια σταθερή αύξηση της αυτεπαγωγής στην αξονική φάση, ακολουθημένη από μια απότομη αύξηση (αύξηση κατά ένα συντελεστή μεγαλύτερο του 2 σε ακτινική φάση σε χρονικό διάστημα περίπου στο  $1/10$  τουλάχιστον της διάρκειας της αξονικής φάσης για την συσκευή μας).



Σχήμα 7i. Συνολική ενεργεία επαγωγής

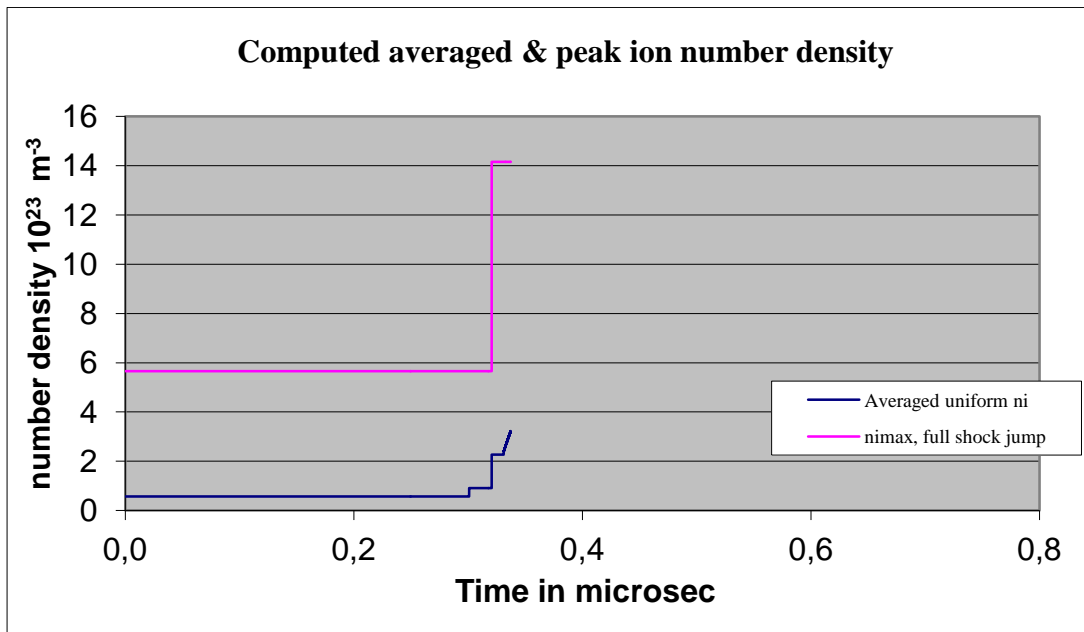
Η επαγωγική ενέργεια ( $0.5LI^2$ ) κορυφώνεται στο 70% της αρχικής αποθηκευμένης ενέργειας, και στη συνέχεια πέφτει στο 30% κατά την διάρκεια της ακτινικής φάσης, έτσι με αυτόν τον τρόπο η απότομη πτώση του ρεύματος αντισταθμίζει την επίδραση, στην απότομη αύξηση της αυτεπαγωγής (σχήμα 7i).



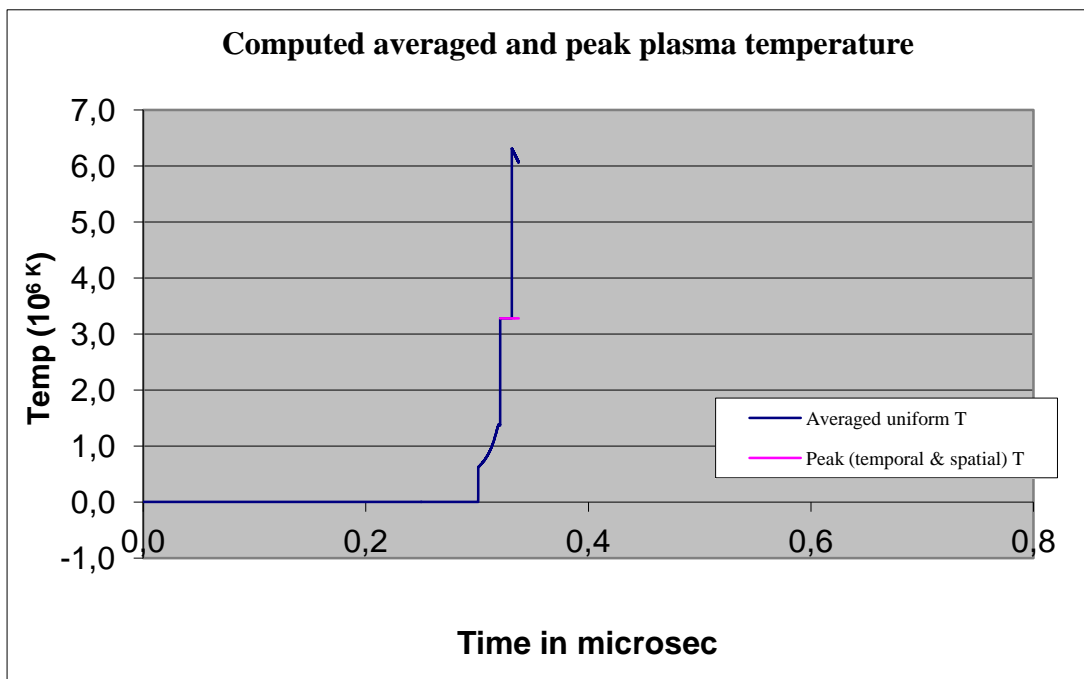
Σχήμα 7j. Σύγκριση της εξασθένιση της ενεργείας από την δυναμικής αντίστασης (DR) με την λειτουργία του Έμβολου

Στο σχήμα 7j παρουσιάζεται το έργο που επιτελείται από το μαγνητικό έμβολο. Αυτό υπολογίζεται με την μέθοδο της ενσωματωμένης ισχύς από απόσταση (force integrated over distance method). Επίσης το Έργο μας έδειξε ότι διαχέεται από μια δυναμική αντίσταση. Για τον υπολογισμό χρησιμοποιήθηκε δυναμική αντίσταση ισχύος όπου κυμάνθηκε σταδιακά. Ακόμα παρατηρούμε, ότι οι δύο ποσότητες και οι χαρακτηριστικές τους συμφωνούν απολυτά. Τέλος με αυτό το στοιχείο επικυρώνουμε την έννοια ότι η μισή  $Ldot$  είναι η δυναμική αντίσταση.

Παρατηρούμε τη δυναμική αντίσταση, DR . Το έμβολο λειτουργεί προκαταβολικά στο πλάσμα αυξάνοντας την Ευσταθία κατά περίπου 12% στο τέλος της αξονικής φάσης και στη συνέχεια αυξάνει απότομα λίγο κάτω από το 30% για την ακτινική φάσης. Τέλος οι τιμές της αντίστασης DR στην αξονική φάση, μαζί με τη σύνθετης αντίστασης bank (bank surge impedance), είναι οι ποσότητες που καθορίζουν την  $I_{peak}$



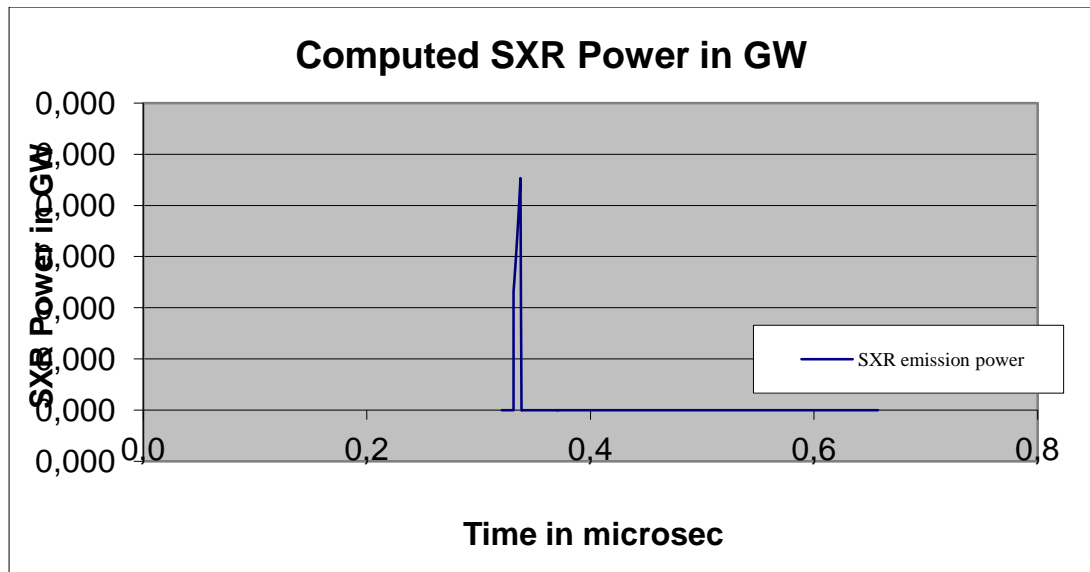
Σχήμα 7κ. Μέσος όρος και κορυφή πυκνότητας ιόντων



Σχήμα 7ι. Κορυφές μέσος Όρος και κορυφαίες θερμοκρασίες του πλάσματος

Στο σχήμα 7ι απεικονίζονται η θερμοκρασίας του πλάσματος. Βλέπουμε ότι έχει μια μέγιστη τιμή και μια μέση τιμή που προκύπτει με τον ίδιο τρόπο. Η γραφική της υπολογιζόμενη ισχύς των μαλακών ακτίνων x (soft x-ray) αερίου νέων, εμφανίζεται στο σχήμα 7ο. Η περιοχή της καμπύλης είναι η απόδοση των μαλακών ακτίνων -x σε J.





Σχήμα 7ο. Ισχύς μαλακών ακτίνων-Χ (SXR) σε δευτέριο

Το μοντέλο υπολογίζει ακόμα και την απόδοση νετρονίων, για λειτουργία με δευτέριο, χρησιμοποιώντας ένα μηχανισμό ακτίνας - στόχου (phenomenological beam-target) [56-58]. Το μοντέλο δεν υπολογίζει το χρονοδιάγραμμα της εκπομπής των νετρονίων, αλλά μόνο την αριθμητική απόδοση  $\Upsilon_n$ .

Έτσι, όπως προκύπτει από τα παραπάνω διαγράμματα, όταν είναι κατάλληλα ρυθμισμένος ο κωδικός του μοντέλου του Lee, είναι σε θέση να προσμοιάσει οπουδήποτε πλάσμα εστίασης και να λειτουργήσει σαν οδηγός για την διάγνωση των δυναμικών του πλάσματος, τροχιών, κατανομή της ενέργειας και της μεικτές ιδιότητες του πλάσματος (gross plasma properties).

## Κεφαλαίο 6

### 6.1 Σημειώσεις:

#### Σημείωση 1

Το πρώτο σημαντικό σημείο που πρέπει να επισημάνουμε (και αυτό που δεν πρέπει να ξεχαστεί) είναι ότι η κυματομορφή του ρεύματος του πλάσματος εστίασης είναι πολύ παραμορφωμένο λόγω της εκφόρτωσης της  $LC-R$  χωρίς το φορτίο του πλάσματος εστίασης (σχήμα 3). Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η "παραμόρφωση" αποτέλεσμα των ηλεκτροδυναμικών που οφείλεται στην κίνηση του πλάσματος. Ακόμα μπορούμε να συμπεριλάβουμε τις αξονικές και ακτινικές δυναμικές οπός και τις εκπομπές της ακτινοβολίας SXR (soft x-ray) από το πλάσμα με νέον. Έτσι καταλήγουμε ότι με τον τρόπο που χρησιμοποιούμε το κώδικα στηρίζεται στην παραδοχή ότι τα χαρακτηριστικά αυτών των "παραμορφώσεων" περιέχουν τις πληροφορίες του ηλεκτροδυναμικού πλάσματος. Το πλάσμα εστίαση φορτώνει το ηλεκτρικό κύκλωμα με τον ίδιο τρόπο όπως ένα ηλεκτρικό μοτέρ φορτώνει το κύκλωμα οδήγησης. Αυτό το φορτίο μπορεί να εκφραστεί και ως αντίσταση. Πιο συγκεκριμένα θα μπορεί να υπολογιστεί η φόρτωση ή η "δυναμική" αντίσταση οπός στη σημείωση 2 μας δείχνει ότι αυτή η δυναμική αντίσταση λόγω της κίνησης στην αξονική φάση είναι κάτι περισσότερο από την αντίσταση της τράπεζας του πυκνωτή. Η σημείωση 3 αναφέρετε περαιτέρω στο ότι η δυναμική αντίσταση λόγω της κίνησης του πλάσματος στην ακτινική φάση είναι τόσο μεγάλη ώστε να κυριαρχήσει πλήρως της κατάστασης. Αυτό προκαλεί το μεγάλο ρεύμα βύθισης (dip) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.

#### Σημείωση 2

Ως ένα παράδειγμα που μπορούμε να εκτιμήσουμε είναι το αποτέλεσμα μιας από τις ηλεκτροδυναμικές επιδράσεις. Η ποσότητα  $(1/2) (dL/dt)$  είναι η δυναμική αντίσταση. Στην αξονική φάση  $L=(\mu/2\pi)*\ln(b/a)*z$  όπου  $\mu$  είναι η διαπερατότητα και  $z$  είναι η θέση του ρεύματος θήκης (sheath). Η έκφραση,  $0,5 * dL/dt= 10^{-7} * \ln(2,384/0,54) * \text{επί την αξονική ταχύτητα} \sim 0,8 \text{ m}\Omega \text{ ανά } 10^4 \text{ m/s}$  της αξονικής ταχύτητας, ή  $0,8 \text{ m}\Omega$  ανά μονάδα ταχύτητας του  $\text{cm}/\mu\text{s}$ . Στην κορυφή της αξονικής ταχύτητας των  $5,9 \text{ cm}/\mu\text{s}$  (σχήμα 2 του φύλλου εργασίας), μας δίνει ένα φορτίο του *κυκλώματος περίπου στα 5 mΩ*, που έχει μειωθεί στο  $3,5 \text{ m}\Omega$  όταν εξετάσουμε το αποτέλεσμα του συντελεστή του ρεύματος. Αυτό είναι περισσότερο από το φορτίο της παρασιτικής αντίστασης  $2,3 \text{ m}\Omega$ . Έτσι, η αξονική κίνηση του ρεύματος θήκης (sheath) είναι ένα σημαντικό φορτίο στο κύκλωμα.

### Σημείωση 3

συνεχίζουν μαζί αυτό το πνεύμα μπορεί να εκτιμηθεί το δυναμικό ωμικό φορτίο του περιβάλλοντος ρεύματος κίνησης στην ακτινική φάση όταν το  $L = (M/2\Gamma) * \ln(b/rp) * zf$ , όπου  $rp$  = ακτινική θέση εμβόλου και  $\lambda\beta$  = μήκος του επιμηκυνόμενης στήλης, τόσο  $rp$  &  $zf$  αλλάζει με το χρόνο. Έτσι  $dL/dt = (M/2\Gamma) * \ln(b/rp) * dzf/dt + (M/2\Gamma) * \lambda\beta * (c/dt) /rp = 2 * 10^{-7} * (LN(B/RP) * dzf/dt + ZF * (c/dt) /rp)$  [δύο όρους RHS να είναι θετικοί] Στο σημείο (2,4) παρακάτω θα δούμε από τα στοιχεία παραγωγής του φύλλου εργασίας στις παρακάτω τιμές, στο περίπου ο χρόνος κορυφής της ταχύτητας του εμβόλου:  $rp \sim 2,4 \text{ mm}$ ,  $zf \sim 15 \text{ mm}$ ,  $c/dt \sim 13,5 \text{ cm}/\mu\text{s}$  [ $1.35 * 10^5 \text{ m/s}$ ]·  $dzf/dt \sim 1.7 * 10^5 \text{ m/s}$ , αντικαθιστώντας στην έκφραση παραπάνω, θα έχουμε το χρόνο κορυφής της ταχύτητας του εμβόλου  $dL/dt \sim 190 \text{ m}\Omega$ , δίνοντας μας (αφού πάρουμε σαν δεδομένο τον συντελεστή του ρεύματος 0,7) παραμένει περίπου  $130 \text{ m}\Omega$  δυναμικό ωμικό φορτίο λόγω της κίνησης του περιβάλλοντος ρεύματος. Αυτή η δυναμική αντίσταση (σε σύγκριση με την  $r0$  μόνο  $2,3 \text{ m}\Omega$ ) κυριαρχεί στη γραφική του ρεύματος σε αυτό το επίπεδο.

### Σημείωση 4.

Υπολογισμός της κυματομορφή της τάσης του σωλήνα tube (σχήμα 4) κατά την ακτινική φάση. Σημειώνουμε την τιμή της κορυφής της τάση του σωλήνα tube που προκαλούνται από την γρήγορη κίνηση πλάσματος. Το υπολογίζουμε γύρω στα 10,6 KV

### Σημείωση 5.

Επιλέγουμε το σχήμα 5. Σημειώνουμε από το σκούρο μπλε την κορυφή της καμπύλης την μέγιστη ακτινική ταχύτητα κρούσης (shock) να είναι  $24,8 \text{ cm}/\mu\text{s}$  λίγο πριν από την ακτινική κρούση να βρίσκει τον άξονα στα  $189 \text{ ns}$  μετά την έναρξη της ακτινικής φάσης. Επίσης διαβάζουμε από το ροζ καμπύλη ότι η κορυφαία ταχύτητα του εμβόλου ανέρχεται στα  $16,7 \text{ cm}/\mu\text{s}$  λίγο πριν η ακτινική shock φτάσει στην κορυφαία ταχύτητα. Η κίτρινη καμπύλη δείχνει την ταχύτητα της επιμηκυνόμενης στήλης. Σημειώνουμε ότι αυτές τις κορυφαίες ταχύτητες που καταγράφονται στη γραμμή δεδομένων.

### Λοιπές σημειώσεις:

Επιλέγουμε το σχήμα 6: και διαβάζουμε τη μέγιστη θερμοκρασία.  $6,31 * 10^6$

Επιλέγουμε το σχήμα 7: και διαβάζουμε τις διάφορες μορφές ενέργειας.

Επιλέγουμε το σχήμα 8: και διαβάζουμε τις διάφορες ισχύς.

Σημειώνουμε ότι τα περισσότερα διαγράμματα σχεδιάζονται στο Φύλλο2 της RADPFV5.15de(CPPL).xls Αυτοί οι πίνακες αποτελούν μια πιο πλήρη εικόνα της συμπίεσης του plasma focus και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αρχικό εγχειρίδιο για εργαστηριακές μετρήσεις των διαφόρων πλάσμάτων.

## 6.2 Συμπέρασμα

Είχαμε μια εισαγωγή στο φύλλο εργασίας της RADPFV5.15de(CPPL).xls. Ρυθμίσαμε και διαμορφώσαμε την καινοτόμο μηχανή πλάσματος στα  $20\text{ kV } 4\text{ Torr}$  με δευτέριο. Μελετήσαμε τα υπολογισμένα αποτελέσματα, καθώς και το συνολικό ρεύμα, την τάση σωλήνα (tube), το ρεύμα συμπίεσης (pinch current), τις ακτινικές και αξονικές τροχιές, την ακτινική και αξονική ταχύτητα, τη θερμοκρασία πλάσματος, τη θέρμανση πλάσματος Joule και την ενέργεια ακτινοβολίας. Μπορούμε επίσης να βρούμε διάφορα σημεία σχετικά με την κυματομορφή του ρεύματος, συμπεριλαμβανόμενου: το τέλος της αξονικής φάσης/αρχή της ακτινικής φάσης. Το τέλος της ακτινικής φάση. Έναρξη και λήξη της φάσης συμπίεσης (pinch).

## 6 Βιβλιογραφία

1. Mather JM (1965) Formation of a High-Density Deuterium Plasma Focus, *Phys. Fluids* 8, No. 2, pp. 366-377.
2. Filipov N V, Filipova T I and Vinogradov V P 1962 *Nucl. Fusion (Suppl.)* 2 577.
3. Zakauallah M, Akhtar I, Waheed A, Alamgir K, Shah A and Murtaza G 1998 *Plasma Sources Sci. Technol.* 7 206.
4. Koh J M, Rawat R S, Patran A, Zhang T, Wong D, Springham S V, Tan T L, Lee S and Lee P 2005 *Plasma Sources Sci. Technol.* 14 12.
5. Mohammadi M A, Verma R, Sobhanian S, Wong C S, Lee S, Springham S V, Tan T L, Lee P and Rawat R S 2007 *Plasma Sources Sci. Technol.* 16 785.
6. Castillo F, Herrera J J E, Rangel J, Milanese M, Moroso R, Pouzo J, Golzarri J I and Espinosa G 2003 *Plasma Phys. Control. Fusion* 45 289.
7. Kies W, Decker G, Berntien U, Sidelnikov Y V, Glushkov D A, Koshelev K N, Simanovskii D M and Bobashev S V 2000 *Plasma Sources Sci. Technol.* 9 279.
8. Czekaj S, Kasperczyk A, Miklaszewski R, Paduch M, Pisarczyk T and Wereszczynski Z 1989 *Plasma Phys. Control. Fusion* 31 587.
9. Mahabadi T D and Tafreshi M A 2007 *Plasma Phys. Control. Fusion* 49 1447.
10. Freeman B L, Boydston J L, Guy T L, Rock J C and Luginbill A 2001 *Proc. 27th IEEE Int. Conf. Pulsed Power Plasma Sci. (New Orleans, LA)* p 594.
11. Schmidt H, Kasperczyk A, Paduch M, Pisarczyk T, Scholz M, Tomaszewski K and zydłowski A 2002 *Phys. Scr.* 66 168.
12. Brzosko J S, Robouch B V and Klobukowska J 1987 *Fusion Technol.* 12 71.
13. Silva P, Moreno J, Soto L, Birstein L, Mayer R E and Kies W 2003 *Appl. Phys. Lett.* 83 3269.
14. Milanese M, Moroso R and Pouzo J 2003 *Eur. Phys. J. D* 27 77.
15. Silva P, Soto L, Moreno J, Sylvester G, Zambra M, Altamirano L, Bruzzzone H, Clausse A and Moreno C 2002 *Rev. Sci. Instrum.* 73 7.
16. Mohanty S R, Sakamoto T, Kobayashi Y, Song I, Watanabe M, Kawamura T, Okino A, Horioka K and Hotta E 2006 *Rev. Sci. Instrum.* 77 043506.
17. Dubrovsky A V and Gribkov V A 2000 *Nukleonika* 45 159.
18. Rishi Verma M V, Roshan, F Malik, P Lee, S Lee, S V Springham, T L Tan, M Krishnan and R S Rawat *Plasma Sources Sci. Technol.* 17 (2008) 045020.
19. Bowering N, Martins M, Partlo W N and Fomenkov I V 2004 *J. Appl. Phys.* 95 16.
20. Soto L et al 2004 *Brazilian J. Phys.* 34 1814.
21. G. Vourvopoulos, P.C. Womble /*Talanta* 54 (2001) 459–468.
  
26. Bernstein M J, Maskan D A and Paassen H L L 1969 *Phys. Fluids.* 12 2193.
27. Lee J H, Shomo L P and Kim K H 1972 *Phys. Fluids.* 15 2433.
28. Forrest M J and Peacock N J 1974 *Plasma Phys.* 16 489.
29. Bernard A, Coudeville A, Jolas A, Launspach J and de Mascureau J 1975 *Phys. Fluids* 18 180.
30. Haines M G 1983 *Nucl. Instrum. Methods* 207 179.
  
31. Yamamoto T, Shimoda K and Hirano K 1985 *Japan. J. Appl. Phys.* 24 324.
32. Vikhrev V V, Ivanov V V and Rozanova G A 1993 *Nucl. Fusion* 33 311.
33. Bernstein M J and Hai F 1970 *Phys. Lett. A* 31 317.
34. Bernstein M J and Comisar G G 1972 *Phys. Fluids* 15 700.
35. Lee J H, Shomo L P, Williams M D and Hermansdorfer H 1971 *Phys. Fluids* 14 2217.
36. Jager U and Herold H 1987 *Nucl. Fusion* 27 407.
37. Castillo F, Milanese M, Moroso R and Pouzo J 1997 *J. Phys. D: Appl. Phys.* 30 1499.
38. Springham S V, Moo S P, Lee P, Rawat R S, Patran A and Lee S 2005 *Japan. J. Appl. Phys.* 44 4117.
39. Castillo F, Herrera J J E, Gamboa I, Rangel J, Golzarri J I and Espinosa G 2007 *J. Appl. Phys.* 101 013303.
40. Castillo F, Herrera J J E, Rangel J, Alfaro A, Maza M A, Sakaguchi V, Espinosa G and Golzarri J I 2002 *Braz. J. Phys.* 32 3.

41. Castillo F, Milanese M, Moroso R and Pouzo J 2000 *J. Phys. D: Appl. Phys.* 33 141.
42. Dubrovsky A V, Gribkov V A, Ivanov Y P, Lee P, Lee S, Liu M and Samarin V A 2001 *Nukleonika* 46 S107.
43. Soto L, Pavez C, Silva P, Moreno J, Barbaglia M and Clause A 2009 *Plasma Sources Sci. Technol.* 18 015007.
44. Rout R K, Mishra P, Rawool A M, Kulkarni L V and Gupta S C 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41 205211.
45. Soto L, Silva P, Moreno J, Zambra M, Kies W, Mayer R E, Clause A, Altamirano L, Pavez C and Huerta L 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41 205215.
46. Lee S. Plasma focus model yielding trajectory and structure. In *Radiations in Plasmas*, vol. II, McNamara B (ed.). World Scientific Publishing Co: Singapore, 1984; 978–987. ISBN 9971-966-37-9.
47. Sing Lee and Sor Heoh Saw, Numerical Experiments providing new Insights into Plasma Focus Fusion Devices Invited Review Paper: Special edition on “Fusion Energy” *Energies* 2010, 3, 711-737; doi:10.3390/en3040711-Published online 12 April 2010.
48. Patran A., Electron and Medium Energy X-ray Emission from a Dense Plasma Focus. Ph.D. dissertation, NIE, Nanyang Technological Univ., Singapore, 2002. ICTP Open Access Archive.
49. Lee S and Serban A 1996 *IEEE Trans. Plasma Sci.* 24 1101–3.
50. Lee S et al 1988 *Am. J. Phys.* 56 62.
51. Lee, S. Plasma focus model yielding trajectory and structure. In *Radiations in Plasmas*, McNamara, B., Ed.; World Scientific, Singapore: 1984; Volume II, pp. 978–987.
52. Glenn Millam Focus Fusion Society [http://www.plasma-universe.com/Dense\\_plasma\\_focus](http://www.plasma-universe.com/Dense_plasma_focus)
53. Muhammad Shahid Rafique. PhD thesis (in preparation) NTU, Singapore.
54. S.Lee, S.P.Moo, C.S.Wong, A.C.Chew. Twelve Years of UNU/ICTP PFF- A Review. IC/98/231, ICTP Preprint, International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy (1998), 101 pages.
55. Lee S Radiative Dense Plasma Focus Computation Package: RADPF <http://www.intimal.edu.my/school/fas/UFLF/File1RADPF.htm> <http://www.plasmafocus.net/IPFS/modelpackage/File1RADPF.htm>
56. S Lee, S H Saw, P C K Lee, R S Rawat and H Schmidt, “Computing plasma focus pinch current from total current measurement,” *Appl. Phys. Lett.* 92 , 2008, 111501
57. Akel M., Al-Hawat Sh., Lee S. “Pinch Current and Soft x-ray yield limitation by numerical experiments on Nitrogen Plasma Focus”. *J Fusion Energy* DOI 10.1007/s10894-009-9238-6. First online 21 August 2009
58. Saw S. H., Lee P. C. K., Rawat R. S. & Lee S. 2009 ‘Optimizing UNU/ICTP PFF Plasma Focus for Neon Soft X-ray Operation’ *IEEE Trans on Plasma Sc*, 2009, 37, 1276 1282.
59. <http://www.plasmafocus.net>
60. S. Lee, *Plasma Phys.*, 25, 571 (1983).
- [a] Ερευνητικό πρόγραμμα Αρχιμήδης III Τεχνική έκθεση 1\_16.1 Εξώφυλλο. <http://nextbigfuture.com/2009/06/lawrenceville-plasma-physics-focus.html>
61. Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων, επιμ.. «Πυρηνική Χημεία». *Χημεία Θετικής Κατεύθυνσης Β' Λυκείου* (έκτη 2002 έκδοση). Οργανισμός Εκδόσεων Διδακτικών Βιβλίων. σελ. 890-891.
62. Saha, M. N. (1921). "On a Physical Theory of Stellar Spectra". *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 99