



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία με θέμα:

«Συγκριτική ανάλυση διατάξεων σύντηξης πλάσματος με εφαρμογές tokamak»

του προπτυχιακού φοιτητή

Βλάχου Ιωάννη

Επιβλέπων:

Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Ευμορφόπουλος Νέστωρ

Συνεπιβλέπων:

Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Σταμούλης Γεώργιος



University of Thessaly

Department of Electrical and Computer Engineering

Diploma Thesis :

***«Comparative analysis of fusion plasma's provision with
applications to tokamaks»***

By

Vlachos Ioannis

*A thesis submitted for the partial fulfillment of the requirements for the bachelor
degree in Electrical and Computer Engineering*

Supervised by

Evmorfopoulos Nestor Professor Uth

Stamoulis Georgios, Professor Uth

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εισάγει αρχικά τον αναγνώστη στις βασικές αρχές της θερμοπυρηνικής σύντηξης , αναλύει τον ορισμό του πλάσματος , ενώ περιγράφει τον πυρηνικό αντιδραστήρα τύπου tokamak . τονίζοντας πράγματα γύρω από την ασφάλεια του καθώς και τι επιπτώσεις έχει στο περιβάλλον. Ακολουθεί μια έρευνα , αναφορικά με τις προοπτικές των ITER , JET tokamak μηχανών , με σκοπό την τελική σύγκριση τους πάνω στο σχήμα του πλάσματος τους στο δοχείο. Βέβαια , για να φτάσουμε μέχρι εκεί , έχουμε μελετήσει το φυσικό σύστημα του πλάσματος , έχουμε δώσει το μοντέλο περιγραφής μέσω εξισώσεων Maxwell , καθώς και τη θεωρητική περιγραφή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο πλάσμα. Επιπρόσθετα , αναλύσαμε τα βασικά χαρακτηριστικά των μηχανών σύντηξης , τονίζοντας πράγματα βασικά για τη λειτουργία τους , λίγο πριν φτάσουμε στο βασικό σκοπό της εργασίας μας , τη μελέτη των συγκριτικών διατάξεων του σχήματος πλάσματος στις δύο αυτές μηχανές. Η ανάλυση μας έλαβε χώρα τόσο σχηματικά όσο και πειραματικά μέσω προσομοιώσεων και πειραμάτων. Τέλος , μελετήσαμε τη συμβολή του Jet tokamak στον μετριασμό των λειτουργικών κινδύνων του ITER tokamak, αλλά και ένα πρόγραμμα προώθησης με την εισαγωγή νέων τεχνικών , εναρμολωμένων στις ανάγκες της εποχής με γνώμονα πάντα το ανθρώπινο και περιβαλλοντικό συμφέρον , συμβάλλοντας ταυτόχρονα στην μείωση του κόστους και στην προστασία της ανθρώπινης ζωής.

Abstract

This thesis initially introduces the basic principles of thermonuclear fusion, analyses the definition of plasma while describing the tokamak nuclear reactor and highlights things around its safety, as well as the impact it has on the environment. What follows is a survey regarding the prospects of ITER, JET tokamak machines for the purpose of comparing the shape of the plasma in the vessel. Of course, in order to get there, we have studied the plasma and modelled the system with the help of Maxwell's equations and we gave the theoretical description of the electromagnetic waves in the plasma. Additionally, we analysed the key features of fusion engines, highlighting the basics of their operation, before reaching the main purpose of our work, which is to study the comparator devices in the plasma form in these two machines. Our analysis is both schematic and experimental through simulations and experiments. Lastly, we studied the contribution of Jet tokamak to mitigating the operational risks of ITER tokamak, as well as a promotion program with the introduction of new techniques adapted to the needs of this era which contribute equally to reducing costs and protecting human life.

Αἰτεῖτε, καὶ δοθήσεται ὑμῖν, ζητεῖτε, καὶ εὕρετε,
κρούετε, καὶ ἀνοιγήσεται ὑμῖν· πᾶς γὰρ ὁ αἰτῶν
λαμβάνει καὶ ὁ ζητῶν εὕρισκει καὶ τῷ κρούοντι
ἀνοιγήσεται.

Κατὰ Ματθαῖον 7:7-8

Διπλωματική Εργασία για την απόκτηση του Διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Η/Υ του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στα πλαίσια του Προγράμματος Προπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Βλάχος Δ. Ιωάννης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός- Μηχανικών Η\Υ του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Copyright © Vlachos Ioannis, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας σηματοδοτεί το τέλος μιας περιόδου. Επαναφέρει αναμνήσεις από την διάρκεια των σπουδών , όπου με την ολοκλήρωση τους και με τα εφόδια που έλαβα από αξιόλογους ανθρώπους , δεν αναπολώ μόνο ευχάριστα το παρελθόν αλλά ατενίζω και με αισιοδοξία το μέλλον.

Πρώτα από όλους θέλω να ευχαριστήσω όλους ανεξαιρέτως τους καθηγητές μου από το τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Η/Υ του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας , γιατί χωρίς τις γνώσεις τους και τις εμπειρίες τις οποίες μου μετέδωσαν δεν θα μπορούσα να φτάσω σε αυτό το επίπεδο μόνος μου καθώς και να έχω όλα τα απαραίτητα εφόδια για της συγγραφή της εργασίας μου.

Στη συνέχεια , νιώθω βαθιά ευγνωμοσύνη και θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον κύριο Ν.Ευμορφόπουλο Επίκουρο Καθηγητή Π.Θ , όχι μόνο γιατί με τίμησε όταν ανέλαβε την επίβλεψη αυτής της εργασίας μου , αλλά και γιατί με την καθοδήγηση του επετεύχθη η ποιοτική αναβάθμιση της δουλειάς μου και η πραγματοποίηση των ονείρων μου . Αυτό που θα μου μείνει είναι η συνεργασία του , η θετική του στάση , η ενθάρρυνση , οι συμβουλές και η καθοδήγηση του τόσο σε επιστημονικό όσο και σε προσωπικό επίπεδο , στοιχεία τα οποία αποτέλεσαν πολύτιμοι αρωγοί για την ολοκλήρωση της προσπάθειας μου.

Επιπρόσθετα , θερμά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Γ.Σταμούλη Καθηγητή Π.Θ για την έμπρακτη στήριξη του καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου και την έμπνευση που μου παρείχε. Ως μέλος της επιτροπής ασχολήθηκε με την παρουσίαση της παρούσας διπλωματικής μου εργασίας αλλά και όλα αυτά τα χρόνια της πανεπιστημιακής εκπαίδευσης μου ήταν κοντά μου σε ότι τον χρειαζόμουν με το ρόλο του σύμβουλου καθηγητή.

Με την ευκαιρία , ευχαριστώ όλους μου τους συμφοιτητές με τους οποίους αγωνίστηκα , για τη συνεργασία μας και τον χρόνο τους , για την αλληλεγγύη και την εργατικότητα τους.

Επίσης , θα ήθελα να ευχαριστήσω το Π.Θ το οποίο αποτέλεσε ένα γόνιμο χώρο μόρφωσης, γνώσεων, εργασίας, έρευνας, ανταλλαγής και ζύμωσης ιδεών, τόσο στην αφετηρία των σπουδών μου όσο και στην πραγματοποίηση της διπλωματικής μου σήμερα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένειά μου , οι οποίοι στην προσπάθειά μου αυτή ήταν πάντα διαθέσιμοι, για στήριξη και κατανόηση,

για ηθική ή υλική βοήθεια ,αλλά και για την ώθηση που μου έδιναν σε ορισμένες δύσκολες στιγμές σε όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου, καθώς η δική μου πίεση και η μόνιμη αγωνία μου για την εξοικονόμηση χρόνου σίγουρα δεν ήταν η πιο ηρεμιστική συνθήκη για αυτούς.

Αφιερώνω αυτή τη διπλωματική μου εργασία στην Ιερή Μνήμη των παππούδων μου Ιωάννη Βλάχου & Ευστάθιου Αβραμίδα.

Σας ευχαριστώ όλους από καρδιάς,

Ιωάννης Βλάχος

Π.Θ 2019

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT.....	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	8
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
1.1 Τι είναι η θερμοδυναμική σύντηξη.....	12
1.2 Τι είναι πλάσμα.....	13
1.3 Περιγραφή αντιδραστήρα Tokamak , ασφάλεια και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	15
1.3.1 Περιγραφή μηχανής – Θεωρία αντιδράσεων σύντηξης.....	15
1.3.2 Τρόποι θέρμανσης πλάσματος στην μηχανή Tokamak.....	17
1.4 Έρευνα στη θερμοπυρηνική σύντηξη – Προοπτικές των ITER, JET , Tore Supra Tokamaks.....	20
1.5 Το θερμοπυρηνικό πλάσμα ως φυσικό σύστημα.....	23
2. ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΤΟΚΑΜΑΚ.....	26
2.1 Μοντέλα περιγραφής του πλάσματος σύντηξης.....	26
2.2 Θεωρητική περιγραφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο πλάσμα.....	30
2.3 Περιορισμός με μαγνητικό πεδίο.....	34
2.3.1 Οι σπουδαιότερες μηχανές πυρηνικής σύντηξης.....	35
2.3.2 Πειραματικές διατάξεις μαγνητικής σύντηξης στην Ευρώπη και το μελλοντικό ITER.....	36
2.4 Παράμετροι των 2 βασικών μηχανών JET , ITER.....	39
2.4.1 Βασικά συστατικά του ITER.....	39
2.4.2 Κύρια συστατικά του JET.....	43
3. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΤΟΚΑΜΑΚ.....	48
3.1 Συγκριτικές διαστάσεις των ITER – JET Reactor τοκαμάκ.....	48
3.2 Plasma Shape Control in ITER.....	50
3.3 Plasma Shape Control at JET.....	60
4. ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΟΥ JET ΣΤΟΝ ΜΕΤΡΙΑΣΜΟ ΤΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΤΟΥ ITER.....	71
4.1 Εισαγωγή στις νέες τεχνικές λειτουργικών σεναρίων.....	71

4.2 Συμβολή του JET στον μετριασμό των λειτουργικών κινδύνων του ITER.....	72
4.3 Πρόγραμμα προώθησης JET – ITER	80
4.4 Περίληψη και Συμπεράσματα.....	83
Λεξιλόγιο.....	84
Βιβλιογραφία-Πηγές.....	88
Units Used.....	92

1. Εισαγωγή-Βασικές Έννοιες

1.1 Τι είναι η θερμοπυρηνική σύντηξη

Ο όρος «θερμοπυρηνική σύντηξη» χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διαδικασία συνένωσης πυρήνων μικρής μάζας σε βαρύτερους με ταυτόχρονη απελευθέρωση ενέργειας. Αυτή η διεργασία είναι που τροφοδοτεί με ενέργεια τον Ήλιο και τους αστέρες. Στον πυρήνα του Ήλιου, η τεράστια πίεση λόγω της βαρύτητας επιτρέπει τη σύντηξη σε θερμοκρασίες περίπου 10.000.000 βαθμών Κελσίου. Ένα αέριο σε αυτές τις θερμοκρασίες μετατρέπεται σε «πλάσμα», στο οποίο τα ηλεκτρόνια έχουν πλήρως διαχωριστεί από τους ατομικούς πυρήνες (ιόντα). Το πλάσμα αποτελεί την τέταρτη κατάσταση της ύλης και χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερες φυσικές ιδιότητες, στις οποίες εστιάζεται η έρευνα στη Φυσική Πλάσματος. Αν και η κατάσταση πλάσματος δε συναντάται συχνά στη Γη, περισσότερο από το 95% του Σύμπαντος αποτελείται από πλάσμα.

Επίσης, η θερμοπυρηνική σύντηξη είναι μια ιδιαίτερα ελκυστική ενεργειακή λύση δεδομένου ότι χρησιμοποιεί καύσιμα που είναι άφθονα ή μπορούν να παρασκευαστούν εύκολα. Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στη σύντηξη είναι ισότοπα του ελαφρού στοιχείου υδρογόνου. Τα ισότοπα του υδρογόνου που χρησιμοποιούνται είναι το δευτέριο, που μπορεί να εξαχθεί εύκολα από το νερό (υπάρχουν γύρω στα 30g δευτερίου σε κάθε κυβικό μέτρο νερού) και το τρίτιο, το οποίο μπορεί να παραχθεί από το λίθιο, ένα άφθονο ελαφρύ μέταλλο.

Ως αποτέλεσμα των αντιδράσεων θερμοπυρηνικής σύντηξης απελευθερώνονται μεγάλα ποσά ενέργειας, κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι η ενέργεια σύνδεσης ανά ατομικό σωματίδιο από τα προϊόντα της σύντηξης είναι μικρότερη από το άθροισμα των ενεργειών σύνδεσης που χαρακτηρίζει κάθε αντιδρών συστατικό. Αυτός ο κανόνας ισχύει μέχρι και το σχηματισμό του σιδήρου, καθώς ύστερα κατά την παραγωγή βαρύτερων πυρήνων υπάρχει ενεργειακό έλλειμμα. Συνεπώς, με τη δημιουργία των προϊόντων της σύντηξης υπάρχει ένα «περίσσειμα» ενέργειας που απελευθερώνεται στο περιβάλλον υπό τη μορφή κινητικής ενέργειας στα υποατομικά σωματίδια- προϊόντα (σωματίδια β και νετρίνα ηλεκτρονίου) καθώς και με τη μορφή ακτινοβολίας γ.

Στην πράξη, πυρηνική σύντηξη μπορούν να δημιουργήσουν μόνον ελαφρά στοιχεία, όπως τα ισότοπα του υδρογόνου. Με την θέρμανση αερίου υδρογόνου σε υψηλές θερμοκρασίες, προκαλούνται ορμητικές συγκρούσεις των πυρήνων των ατόμων του υδρογόνου και τελικά αυτοί συνενώνονται δημιουργώντας σταδιακά πυρήνες ενός άλλου στοιχείου (μεταστοιχείωση), του ηλίου, εκλύοντας ταυτόχρονα θερμική ενέργεια.

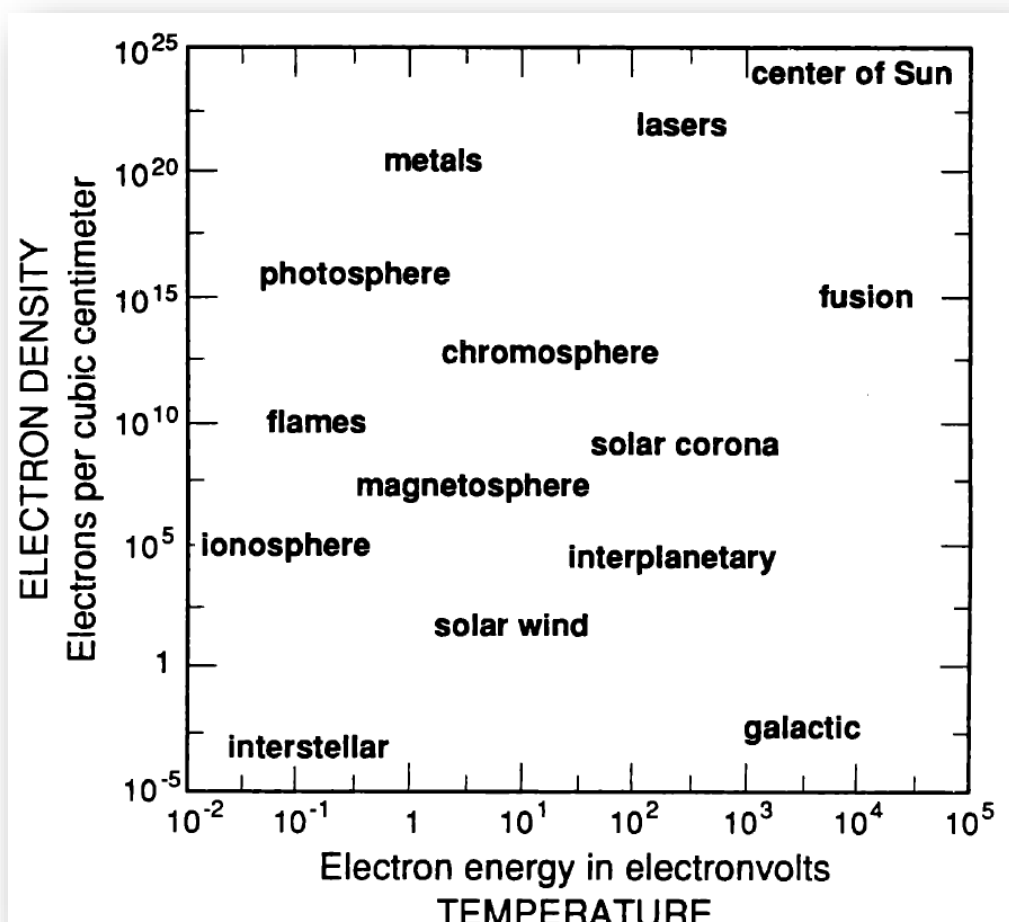
1.2 Τι είναι το πλάσμα

Το πλάσμα μπορεί να θεωρηθεί η τέταρτη κατάσταση της ύλης. Σε αυτήν, τα άτομα έχουν ιονιστεί πλήρως (σε θετικούς πυρήνες και αρνητικά ηλεκτρόνια) και συνυπάρχουν αλληλοεπιδρώντας το ένα με το άλλο. Το πλάσμα μπορεί να δημιουργηθεί είτε με θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες είτε με άλλες μεθόδους όπως εφαρμογή ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου, λέιζερ, μικροκύματα και άλλες. Το πλάσμα είναι εξαιρετικά καλός αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος, ως αποτέλεσμα των ελεύθερων να κινηθούν φορτίων. Πλάσμα συναντάται επίσης στον ήλιο (και γενικά σε όλα τα άστρα), τον ηλιακό άνεμο και σε όλο γενικά το σύμπαν σε διάφορες περιοχές. Στη γη συναντάται στις αστραπές, τους κεραυνούς, την ιονόσφαιρα και στις φλόγες υψηλών θερμοκρασιών. Τέλος, πλάσμα παράγεται τεχνητά στις λάμπες φθορισμού, στις τηλεοράσεις plasma, στα καυσαέρια των πυραύλων, τα τυλίγματα Tesla και σε εργαστηριακές διατάξεις όπως αντιδραστήρες πυρηνικής σύντηξης.

Οι βασικές κατηγορίες στις οποίες διακρίνουμε το πλάσμα είναι οι εξής:

- ✓ Το εργαστηριακό πλάσμα που παράγεται τεχνητά από τον άνθρωπο. Το μέγεθός του είναι σχετικά μικρό, συνήθως δεν ξεπερνάει τα μερικά μέτρα, κυρίως λόγω της δυσκολίας του περιορισμού του. Οι χρόνοι ζωής του εργαστηριακού πλάσματος είναι επίσης σχετικά μικροί. Σε έναν αντιδραστήρα σύντηξης το πλάσμα έχει χαρακτηριστικούς χρόνους της τάξης των 10^{-2} s. Η πυκνότητα των εργαστηριακών πλάσμάτων ποικίλει ανάλογα την εφαρμογή. Σε εφαρμογές μαγνητικής πυρηνικής σύντηξης η πυκνότητα είναι της τάξης των 10^{20} m⁻³ ενώ για την αδρανειακή σύντηξη η πυκνότητα φτάνει τα 10^{30} m⁻³.
- ✓ Το επίγειο πλάσμα που δημιουργείται με φυσικό τρόπο στη γη και περιλαμβάνει τους κεραυνούς, τις φλόγες, την ιονόσφαιρα, το βόρειο σέλας και άλλα. Εδώ οι χρόνοι ζωής και οι διαστάσεις μπορεί να είναι μεγαλύτερες ανάλογα τη διάρκεια και την έκταση του φυσικού φαινομένου. Η πυκνότητα μπορεί να είναι χαμηλή, για παράδειγμα στην ιονόσφαιρα από 10^6 ως 10^8 m⁻³, ή υψηλή όπως στους κεραυνούς που φτάνει τα 10^{24} m⁻³.
- ✓ Το αστροφυσικό πλάσμα που υπάρχει στα άστρα, τον ηλιακό άνεμο, το διαπλανητικό, διαστρικό και διαγαλαξιακό πλάσμα, τους κομήτες και άλλα. Οι διαστάσεις τους είναι πολύ μεγαλύτερες, και φτάνουν τα 10^{25} m ενώ οι πυκνότητές τους μπορεί να είναι από πολύ μικρές (10^{-1} m⁻³ στο διαγαλαξιακό πλάσμα) μέχρι πολύ μεγάλες (10^{31} m⁻³ στο κέντρο του ήλιου).

Όπως γίνεται αντιληπτό, το πλάσμα είναι μια κατάσταση της ύλης στην οποία οι φυσικές παράμετροι έχουν τιμές με εύρος πολλές τάξεις μεγέθους. Στο επόμενο σχήμα φαίνονται κάποιες τυπικές τιμές πυκνότητας και θερμοκρασίας για μερικά είδη πλάσματος.



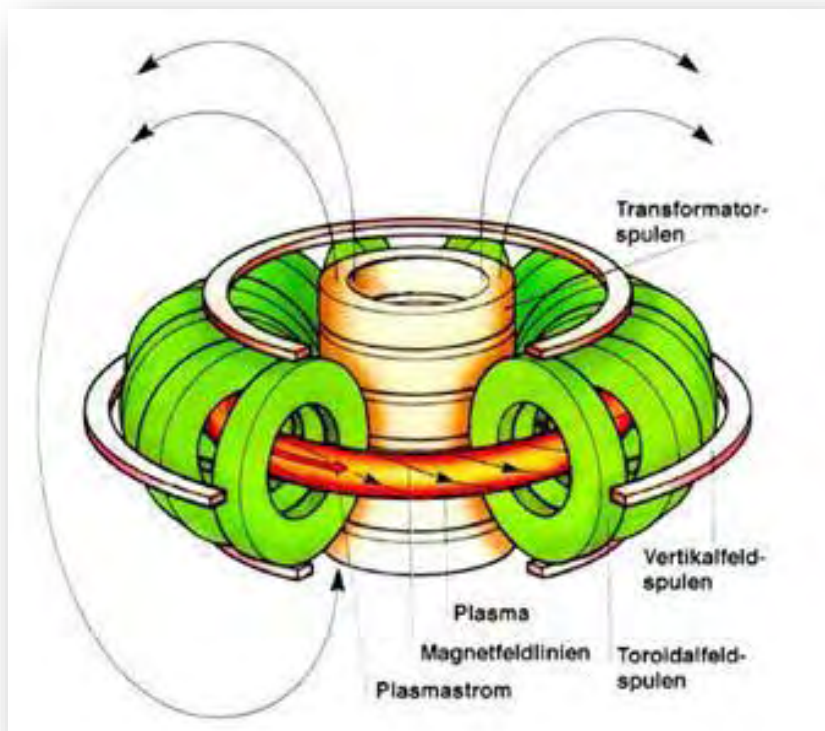
Εικόνα 1: Τυπικές τιμές ηλεκτρονικής πυκνότητας και θερμοκρασίας για ορισμένα είδη πλάσματος

Ένα πλάσμα διακρίνεται περαιτέρω σε θερμό και ψυχρό ανάλογα με το βαθμό ιονισμού των ατόμων του. Στο ψυχρό πλάσμα δεν είναι απαραίτητο ότι θα έχουν ιονιστεί όλα τα άτομα, αρκεί ένα 10%, ενώ στο θερμό όλα τα άτομα είναι ιονισμένα και δεν υπάρχουν ουδέτερα σωμάτια.

1.3 Περιγραφή αντιδραστήρα tokamak , ασφάλεια και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

1.3.1 Περιγραφή μηχανής – θεωρία αντιδράσεων σύντηξης

Η ρωσική λέξη токамак είναι ακρωνύμιο της φράσης «тороидальная камера с магнитными катушками» που σημαίνει «τοροειδής θάλαμος με μαγνητικά τυλίγματα». Πρόκειται για μια διάταξη αντιδραστήρα πυρηνικής σύντηξης, που κατασκευάστηκε τη δεκαετία του 1950 από τους σοβιετικούς Igor Tamm και Andrei Sakharov.



Εικόνα 2: Αντιδραστήρας Tokamak

Στον αντιδραστήρα Tokamak συνυπάρχουν δύο μαγνητικά πεδία: Ένα τοροειδές που συγκρατεί το πλάσμα, κι ένα κυκλικό στο εσωτερικό του. Έτσι το πλάσμα ακολουθεί μια ελικοειδή διαδρομή και δεν δραπετεύει εκτός της μηχανής. Επειδή απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες (της τάξης των 108 K) προκειμένου να γίνει μία πυρηνική σύντηξη, για να διατηρηθεί το πλάσμα σε αυτές πρέπει να του παρέχεται συνεχώς ενέργεια.

Ένας αντιδραστήρας σύντηξης όπως η μηχανή tokamak μοιάζει με έναν καυστήρα. Το καύσιμο που εισάγεται στο σύστημα εξαντλείται άμεσα, έτσι ώστε κάθε στιγμή η ποσότητα καυσίμου στο θάλαμο αντίδρασης να είναι ελάχιστη (περίπου ένα γραμμάριο ανά κυβικό μέτρο όγκου) . Αν η παροχή καυσίμου διακοπεί , οι αντιδράσεις σύντηξης διαρκούν μόνο λίγα δευτερόλεπτα. Οποιαδήποτε δυσλειτουργία της διάταξης έχει ως αποτέλεσμα την πτώση της θερμοκρασίας του πλάσματος , τη διακοπή των αντιδράσεων και την παύση της λειτουργίας της συσκευής.

Οι αντιδράσεις σύντηξης μεταξύ δύο ισότοπων του υδρογόνου , του δευτερίου και του τρίτου , παρέχουν τη βάση για την ανάπτυξη ενός αντιδραστήρα σύντηξης. Το δευτέριο είναι ένα ισότοπο που υπάρχει στη φύση , είναι μη ραδιενεργό και μπορεί να εξαχθεί από το νερό. Στη Γη δεν υπάρχει τρίτιο , αλλά μπορεί να παραχθεί από το λίθιο (ελαφρύ μέταλλο που υπάρχει σε αφθονία) στο εσωτερικό του αντιδραστήρα σύντηξης. Κάθε αντίδραση σύντηξης παράγει ένα σωματίδιο α (δηλ. τον πυρήνα του στοιχείου «ήλιο») και ένα νετρόνιο μεγάλης ενέργειας. Τα νετρόνια διαφεύγουν από το πλάσμα και επιβραδύνονται σε ένα «μανδύα» που περιβάλλει το πλάσμα. Στο εσωτερικό αυτού του μανδύα το λίθιο μετατρέπεται σε τρίτιο , το οποίο επανεισάγεται στο θάλαμο ως καύσιμο , και η θερμότητα που παράγεται από τα νετρόνια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού που θέτει σε κίνηση στροβίλους με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η τροφοδοσία μιας πόλης περίπου 1.000.000 κατοίκων με ηλεκτρισμό για ένα έτος , απαιτεί τη λειτουργία μιας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από σύντηξη με ποσότητα καυσίμου ίση με εκείνη που χωράει σε ένα μικρό φορτηγό.

Τα βασικά καύσιμα της σύντηξης , το δευτέριο (ισότοπο υδρογόνου) και το λίθιο , καθώς και το προϊόν της αντίδρασης , το ήλιο , είναι μη ραδιενεργά. Το ραδιενεργό ενδιάμεσο καύσιμο , το τρίτιο , έχει χρόνο ημιζωής 12,6 χρόνια και η διάσπαση του παράγει ένα ηλεκτρόνιο πολύ χαμηλής ενέργειας. Στον αέρα αυτό το ηλεκτρόνιο μπορεί να διανύσει μόλις λίγα χιλιοστά και δεν μπορεί να διαπεράσει ούτε καν ένα φύλλο χαρτιού , αλλά το τρίτιο είναι επιβλαβές αν εισχωρήσει στο ανθρώπινο σώμα. Για αυτό τον τρόπο , έχουν σχεδιασθεί και εγκατασταθεί στη διάταξη διάφορες δικλείδες ασφαλείας για την αντιμετώπιση του τρίτιου. Επειδή το τρίτιο παράγεται στο βαθμό που είναι απαραίτητο για τη διατήρηση της διαδικασίας σύντηξης στο θάλαμο του αντιδραστήρα , δεν υπάρχει ανάγκη για συχνή μεταφορά ραδιενεργού καυσίμου σε μια μονάδα παραγωγής ενέργειας από σύντηξη.

Η ενέργεια που παράγεται από τις αντιδράσεις σύντηξης θα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού ή ως θερμότητα για βιομηχανική χρήση. Η κατανάλωση καυσίμου σε ένα σταθμό παραγωγής ενέργειας από σύντηξη θα είναι εξαιρετικά χαμηλή. Για την ετήσια λειτουργία μιας τέτοιας μονάδας ισχύος 1GW θα χρειάζονται περίπου 100 kg δευτερίου και 3 τόνοι φυσικού λιθίου , ενώ θα

παράγονται περίπου 7.000.000.000 kWh. Μια μονάδα παραγωγής ενέργειας από λιθάνθρακα, χωρίς τις διεργασίες απομόνωσης του άνθρακα, απαιτεί περίπου 1.500.000 τόνους καυσίμου για να παράγει την ίδια ενέργεια. Οι αντιδραστήρες σύντηξης δεν παράγουν αέρια θερμοκηπίου και άλλες ρυπογόνους ουσίες που έχουν ζημιογόνες επιπτώσεις στο περιβάλλον και συντελούν στην κλιματική αλλαγή.

Τα νετρόνια που παράγονται κατά την αντίδραση σύντηξης αλληλοεπιδρούν με τα υλικά γύρω από το πλάσμα. Μια προσεκτική επιλογή των υλικών αυτών θα οριοθετήσει την απαλλαγή τους από τον τακτικό έλεγχο (και πιθανόν να καταστήσει δυνατή την ανακύκλωση τους) ενδεχομένως έως και 100 χρόνια ύστερα από τη διακοπή της λειτουργίας της μονάδας παραγωγής ενέργειας. Ως εκ τούτου, τα απόβλητα από τις μονάδες δε θα αποτελούν μακροπρόθεσμο βάρος για τις επόμενες γενεές.

1.3.2 Τρόποι Θέρμανσης πλάσματος στην μηχανή Tokamak

Το ρεύμα που διαρρέει το πλάσμα του tokamak συμβάλλει στη θέρμανσή του. Καθώς η θερμοκρασία του πλάσματος αυξάνεται, αυτή η ωμική θέρμανση γίνεται λιγότερο αποτελεσματική και αυξάνει τη θερμοκρασία του πλάσματος μόνο κατά λίγα εκατομμύρια βαθμούς, δηλαδή θερμοκρασία περίπου 10 φορές χαμηλότερη από την απαιτούμενη για την πραγματοποίηση ικανού αριθμού αντιδράσεων σύντηξης.

Έτσι χρειάστηκε να γίνει και έγινε βοηθητική θέρμανση του πλάσματος ώστε αυτό να φθάσει σε θερμοκρασία αναφλέξεως. Για να θερμανθεί το πλάσμα σε θερμοκρασία αναφλέξεως (5 έως 10 keV) χρειάστηκε η έγχυση ουδέτερων σωματίων μεγάλης ενέργειας μέσα σε αυτό. Δέσμες ουδέτερων σωματιδίων μεγάλης ενέργειας εγχύονται στο πλάσμα, το διαπερνούν, και μεταδίδουν την κινητική τους ενέργεια σε αυτό μέσω συγκρούσεων με τα σωματίδια του πλάσματος. Για να αυξηθεί η θερμοκρασία ακόμη περισσότερο, απαιτείται περαιτέρω θέρμανση η οποία παρέχεται από εξωτερικές πηγές. Έτσι έχουμε, το πλάσμα θερμοπυρηνικών αντιδραστήρων να θερμαίνεται και με RF (ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υψηλής συχνότητας). Η υψίσυχη θέρμανση χρησιμοποιεί μεγάλης ισχύος ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαφορετικών συχνοτήτων, τα οποία μεταδίδουν στο πλάσμα την ενέργειά τους μέσω απορρόφησης συντονισμού. Έχουμε αναπτύξει για το σκοπό αυτό, τρία συστήματα: 1) τη θέρμανση μέσω Κυκλοτρονικού Συντονισμού Ιόντων (ICRH, 20– 55 MHz), 2) τη θέρμανση μέσω Κυκλοτρονικού Συντονισμού Ηλεκτρονίων (ECRH, 100– 200 GHz, κυρίως μικροκύματα), και 3) τη θέρμανση μέσω κυμάτων της Κατώτερης Υβριδικής Συχνότητας (LHH, 1– 8 GHz). Αναλυτικότερα, τρεις τρόποι εφαρμόζονται αυτή τη στιγμή για τη θέρμανση του πλάσματος:

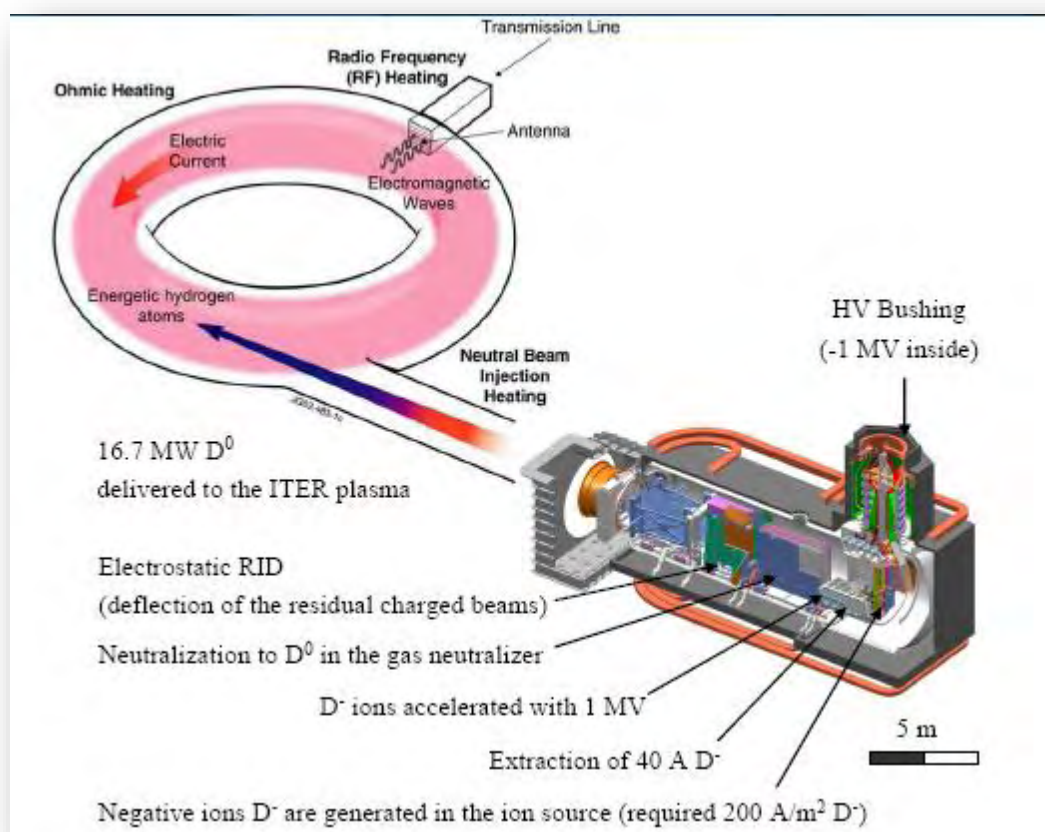
- **Η ωμική θέρμανση.** Το πλάσμα διαρρέει ένα επαγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα που προκαλείται από ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο (ουσιαστικά το πλάσμα γίνεται το δευτερεύον «τύλιγμα» ενός μετασχηματιστή). Αυτό επιτυγχάνει τόσο τη συγκράτησή του πλάσματος στο εσωτερικό του Tokamak (αναγκάζοντάς το σε μια ελικοειδή τροχιά) όσο και την θέρμανσή του, λόγω των ωμικών κρούσεων. Παρόλο που η μέθοδος αυτή συνεισφέρει στο συνολικό ποσοστό ισχύος που απαιτεί το Tokamak, αυτή γενικά είναι μικρή λόγω του ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του, τόσο πιο αγωγίμο γίνεται το πλάσμα με αποτέλεσμα οι ωμικές κρούσεις να ελαττώνονται.
- **Με RF ακτινοβολία** στην περιοχή των μικροκυμάτων. Στους Tokamak υπάρχουν διατάξεις που λέγονται γυροτρόνια (gyrotrons). Στην ουσία πρόκειται για λυχνίες κενού υψηλής ενέργειας, οι οποίες εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μήκος κύματος της τάξεως του mm και συχνότητα από 20 ως 250 GHz. Η ισχύς που παρέχουν κυμαίνεται από 10 kW ως 2 MW και η λειτουργία τους μπορεί να είναι συνεχής ή παλμική. Η διάρκεια των παλμών που έχει επιτευχθεί είναι της τάξης μερικών δεκάδων δευτερολέπτων, ενώ ο στόχος για το ITER (θα εξηγήσουμε στην πορεία τι είναι) είναι της τάξης των μερικών ωρών. Τα γυροτρόνια που έχουν κατασκευαστεί μέχρι τώρα έχουν μεγάλο μέγεθος: περίπου πέντε μέτρα ύψος, και δύο μέτρα πλάτος και μήκος. Επειδή συνολικά χρειάζονται πάνω από 50 MW ισχύος για τη θέρμανση του Tokamak, πρέπει να λειτουργήσουν 25 τέτοια γυροτρόνια, τα οποία δεν είναι εύκολο να τοποθετηθούν γύρω από τον Tokamak χωρίς να υπάρξουν προβλήματα χώρου. Ένα άλλο πρόβλημα που παρουσιάζεται με τα γυροτρόνια είναι η χαμηλή τους απόδοση. Μέχρι τώρα έχουν επιτευχθεί αποδόσεις όχι μεγαλύτερες από 50%, δηλαδή το γυροτρόνιο το ίδιο καταναλώνει τη μισή ενέργεια από αυτή που αποδίδει στο πλάσμα για τη θέρμανσή του. Προφανώς δεν είναι επιθυμητό αυτό, αφού 25 MW είναι μια τεράστια ισχύς που θα πρέπει να μην χάνεται.



Εικόνα 3: Γυροτρόνια στο Karlsruhe Institute of Technology, ισχύος 2 MW

- **Με ουδέτερα σωμάτια.** Στην τελευταία αυτή μέθοδο μπορεί να βρει εφαρμογή η διάταξη παραγωγής, επιτάχυνσης και φωτοαπόσπασης των αρνητικών ιόντων υδρογόνου. Με τη μέθοδο αυτή η ισχύς της θέρμανσης είναι της τάξεως των μερικών MW. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το μικρό μέγεθος της διάταξης που απαιτείται για την εισαγωγή της δέσμης στο Tokamak, σε σχέση με αυτόν που απαιτούν τα γυροτρόνια. Επίσης, τα ουδέτερα σωμάτια μπορούν να θερμάνουν πιο αποτελεσματικά το πλάσμα από τις άλλες δύο μεθόδους: αποδόσεις της τάξης του 80-85% είναι εφικτές θεωρητικά.

Εικόνα 4 : Σχηματική αναπαράσταση των 3 μεθόδων στον αντιδραστήρα Tokamak



1.4 Έρευνα στη θερμοπυρηνική σύντηξη – Προοπτικές των ITER, JET , Tore Supra Tokamaks

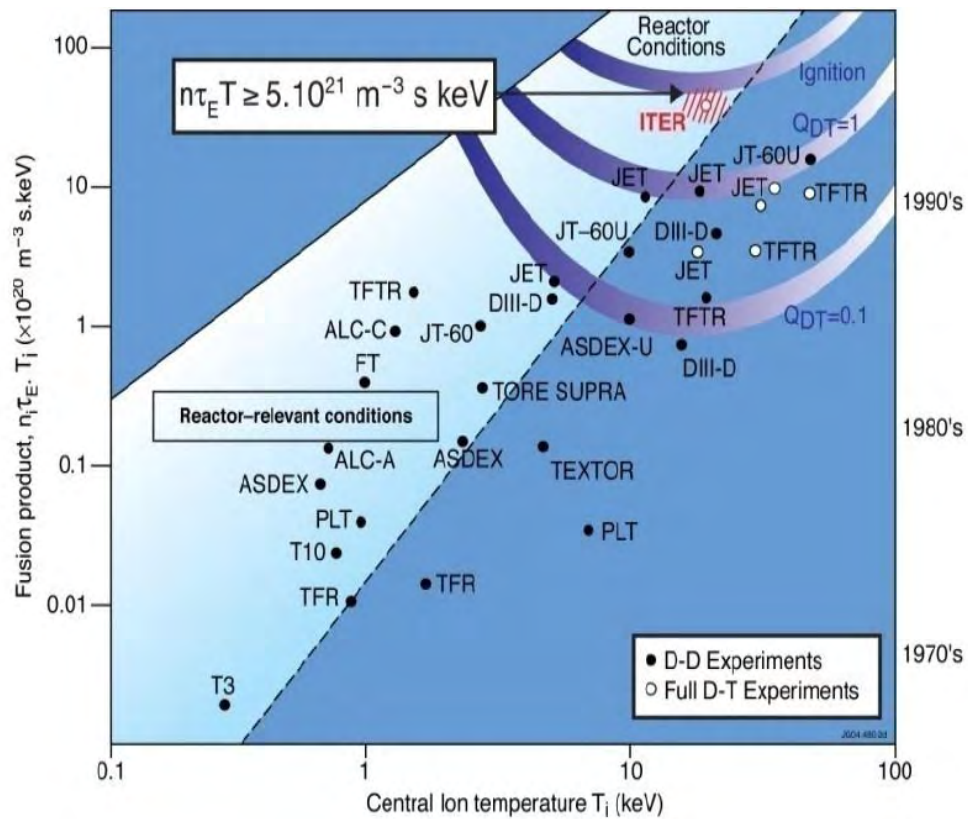
Στις χαμηλές πιέσεις τις οποίες μπορούμε να παράγουμε στο εργαστήριο , οι επιθυμητοί ρυθμοί παραγωγής ενέργειας από σύντηξη απαιτούν θερμοκρασίες πάνω από 100.000.000 βαθμούς Κελσίου. Η επίτευξη τέτοιων θερμοκρασιών απαιτεί , με τη σειρά της , την ισχυρή θέρμανση του καυσίμου και την ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών μέσω της διατήρησης του θερμού καυσίμου σε μεγάλη απόσταση από τα τοιχώματα του αντιδραστήρα. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον , λόγω του ότι το αέριο καύσιμο έρχεται σε μορφή πλάσματος (ιονισμένου αερίου) , η επίτευξη του στόχου γίνεται μέσω της δημιουργίας ενός τοροειδούς κλωβού από ισχυρά μαγνητικά πεδία , του tokamak. Αυτά τα μαγνητικά πεδία εμποδίζουν τη διαφυγή των ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων του πλάσματος.

Το Ευρωπαϊκό tokamak JET(Joint European Torus) που βρίσκεται στο Culham της Μεγάλης Βρετανίας είναι σήμερα το μεγαλύτερο πείραμα σύντηξης στον κόσμο και προς το παρόν το μόνο ικανό να λειτουργεί με καύσιμο από μείγμα D-T. Στο JET έχουν επιτευχθεί όλοι οι στόχοι που είχαν τεθεί αρχικά και σε ορισμένες

περιπτώσεις έχουν ξεπεραστεί , όπως το 1997 με το ρεκόρ των 16MW στην παραγωγή ισχύος από θερμοπυρηνική σύντηξη. Στην Ευρώπη υπάρχει ένας αριθμός από μεγάλες πειραματικές εγκαταστάσεις , οι οποίες συμβάλλουν στη βάση δεδομένων που είναι αναγκαίες για την πρόοδο στην έρευνα της σύντηξης. Ένα πρόσφατο επίτευγμα υπήρξε στο tokamak Tore Supra στη Γαλλία , στο οποίο μελετάται η μόνιμη λειτουργία διατάξεων σύντηξης. Το 2003 η διάταξη αυτή παρήγαγε μια υψηλών επιδόσεων εκκένωση πλάσματος με ρεκόρ διάρκειας 6.5 min. Η συνολική ποσότητα εξωτερικής ενέργειας που απαιτήθηκε για τη διατήρηση του πλάσματος στη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου , και η οποία έπρεπε επίσης να απαχθεί ως θερμότητα , ήταν μεγαλύτερη από 1G Joule (αρκετή για να βράσουν τρεις τόνοι νερού).

Ένα απλό κριτήριο για την αποδοτικότητα της λειτουργίας των διατάξεων σύντηξης είναι ο λόγος Q της παραγόμενης ισχύος από αντιδράσεις σύντηξης προς την ισχύ που απαιτείται για την θέρμανση . Το πλάσμα φθάνει στη συνθήκη αυτοσυντηρούμενης καύσης ($Q = \infty$) όταν η απώλεια ενέργειας από το πλάσμα αντισταθμίζεται από τη θέρμανση του πλάσματος λόγω αντιδράσεων σύντηξης. Μόλις ικανοποιηθεί αυτή η συνθήκη , δεν απαιτείται πλέον εξωτερική θερμότητα για τη διατήρηση της απαραίτητης υψηλής θερμοκρασίας, και όπως συμβαίνει με τη φωτιά , το πλάσμα θα συνεχίσει να «καίει» για όσο διάστημα τροφοδοτείται με καύσιμο.

Η διάταξη του JET έχει επιτύχει $Q = 0.7$. Η επόμενη μηχανή , ο ITER (Διεθνής Θερμοπυρηνικός Πειραματικός Αντιδραστήρας) , στοχεύει σε $Q = 10$, ενώ οι μελλοντικοί αντιδραστήρες σύντηξης ίσως έχουν τιμές Q μέχρι το 40 ή το 50. Δηλαδή , στους μελλοντικούς αντιδραστήρες σύντηξης δεν θα είναι πλέον απαραίτητο να ικανοποιείται αυτή η συνθήκη και θα αρκεί να σχεδιάσουμε ενισχυτές ισχύος. Επειδή οι περισσότερες σύγχρονες διατάξεις δε χρησιμοποιούν τρίτιο , η λειτουργία τους χαρακτηρίζεται από το συνδυασμό παραμέτρων πλάσματος οι οποίες δείχνουν πόσο καλά προσεγγίζονται οι κατάλληλες για τη σύντηξη συνθήκες. Οι μηχανές με την καλύτερη λειτουργία έχουν πετύχει παραμέτρους οι οποίες πλησιάζουν εκείνες που απαιτούνται για έναν αντιδραστήρα.



Εικόνα 5 : Πρόοδος στην έρευνα σύντηξης σε διεθνές επίπεδο

Πιο συγκεκριμένα, στην τελευταία εικόνα παρουσιάζεται το τριπλό γινόμενο σύντηξης ($n \cdot T \cdot t$) σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ιόντων στο κέντρο του πλάσματος. Η γαλάζια περιοχή παριστάνει τις κατάλληλες συνθήκες για να υπάρξει αντιδραστήρας ενώ οι μωβ λωρίδες παριστάνουν τις συνθήκες που απαιτούνται για να έχουμε ανάφλεξη, δηλαδή σύντηξη. Παρατηρούμε ότι έχουν γίνει πολλές προσπάθειες στις περασμένες δεκαετίες, αλλά ο ITER βρίσκεται στην κορυφαία θέση στο παραπάνω διάγραμμα γεγονός που δείχνει ότι είναι η πιο ολοκληρωμένη προσπάθεια που έχει γίνει ποτέ για την παραγωγή ενέργειας με ελεγχόμενη θερμοπυρηνική σύντηξη.

1.5 Το θερμοπυρηνικό πλάσμα ως φυσικό σύστημα

Ο ορισμός «πλάσμα» χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό μη ιδανικών αερίων που ένα ποσοστό των ατόμων τους είναι ιονισμένο. Αυτός ο ορισμός δε σημαίνει ότι οποιοδήποτε φορτισμένο αέριο είναι πλάσμα, διότι το πλάσμα πρέπει να ικανοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια. Η ουσία των κριτηρίων αυτών έγκειται στο ότι, στο πλάσμα, οι δυνάμεις που καθορίζουν την κίνηση των σωματιδίων είναι οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις μεγάλης εμβέλειας, ενώ σε ένα συνηθισμένο αέριο τα σωματίδια αλληλοεπιδρούν μόνο κατά τη διάρκεια των συγκρούσεων. Στο εργαστήριο το πλάσμα δημιουργείται κυρίως από τις ηλεκτρικές εκκενώσεις, ενώ ένας άλλος μηχανισμός είναι αυτός του θερμικού ιονισμού.

Λόγω της μεγάλης εμβέλειας των δυνάμεων Coulomb, κάθε φορτίο αλληλοεπιδρά συγχρόνως με ένα αρκετά μεγάλο αριθμό άλλων φορτίων και ενδεχομένως και με κάποια εξωτερικά πεδία, αλλά και μέσω της κίνησης του παράγει και το ίδιο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Αυτό έχει σαν συνέπεια την εμφάνιση πληθώρας φυσικών φαινομένων στο πλάσμα σε σχέση με τα συνηθισμένα αέρια.

Μια από τις κύριες φυσικές συμπεριφορές του πλάσματος είναι οι ηλεκτροστατικές ταλαντώσεις. Οι ταλαντώσεις αυτές οφείλονται στην εσωτερική δομή του πλάσματος και γίνονται με συχνότητα:

$$\omega_{pe}^2 = \frac{n_e q_e^2}{\epsilon_0 m_e}.$$

Η συχνότητα πλάσματος είναι σημαντική παράμετρος διότι παίζει πολύ βασικό ρόλο στον καθορισμό του είδους των κυμάτων που μπορούν να διαδοθούν στο πλάσμα.

Στην περίπτωση όπου στο πλάσμα επιβάλλεται ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο εμφανίζεται ένα νέο είδος περιοδικών κινήσεων με συχνότητα:

$$\omega_{cs} = \frac{q_s B_0}{m_s}.$$

Απουσία άλλων εξωτερικών δυνάμεων, η κίνηση κατά μήκος του μαγνητικού πεδίου είναι ευθύγραμμη ομαλή, ενώ η συνολική κίνηση του φορτίου είναι ελικοειδής γύρω από το μαγνητικό πεδίο. Η φορά της κίνησης είναι αντίθετη για τα ηλεκτρόνια από ότι για τα ιόντα. Σε σύγκριση με το μη μαγνητισμένο πλάσμα, οι κινήσεις που εκτελούν τα φορτία είναι περιορισμένες γύρω από τις μαγνητικές γραμμές.



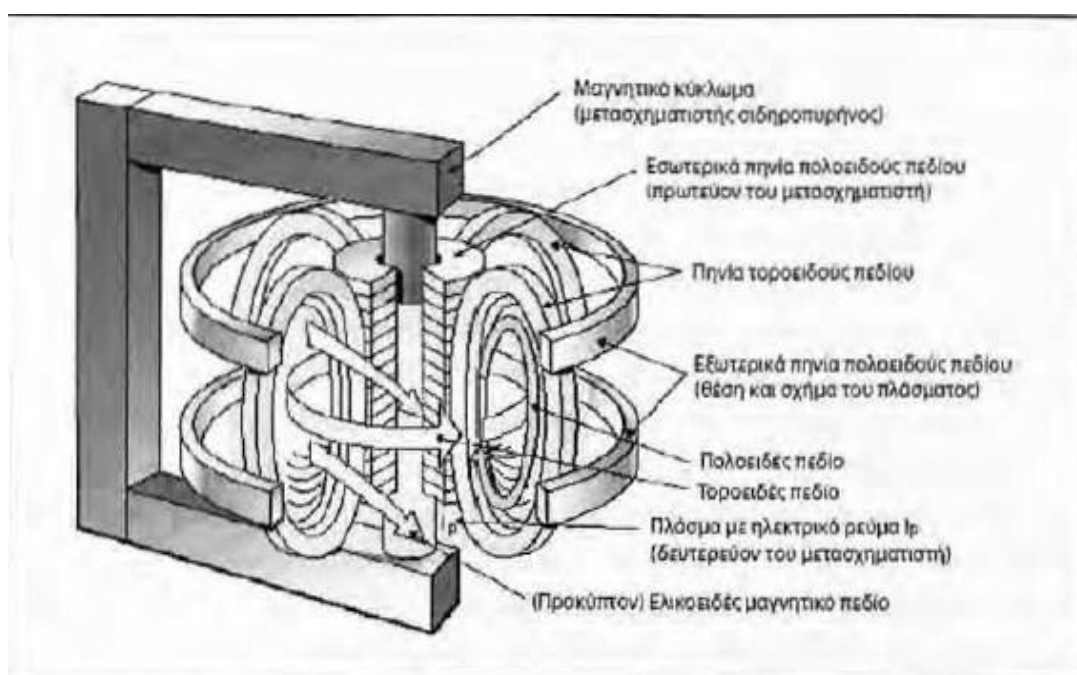
Εικόνα 6 : Σχηματική αναπαράσταση των κινήσεων των ηλεκτρικών φορτίων του πλάσματος σε μαγνητισμένο και αμαγνήτιστο πλάσμα.

Η επίτευξη σύντηξης στην ουσία , σημαίνει τη δημιουργία τεράστιων πηγών ενέργειας με μικρό κόστος και υψηλή διαθεσιμότητα. Το βασικό πρόβλημα όμως για την επίτευξη ελεγχόμενης σύντηξης είναι διττό:

1. Δημιουργία πλάσματος με πολύ υψηλή θερμοκρασία (άνω των 10 keV) , διότι τότε η ενεργός διατομή των αντιδράσεων σύντηξης είναι σημαντική.
2. Συγκράτηση του πλάσματος για χρόνο αρκετό ώστε να συμβεί μεγάλος αριθμός αντιδράσεων.

Σχετικά με το πρόβλημα της θέρμανσης και περιορισμού του πλάσματος έχουν υλοποιηθεί διαφόρων τύπων διατάξεις. Περισσότερα πλεονεκτήματα εμφανίζουν διατάξεις που βασίζονται στο μαγνητικό περιορισμό του πλάσματος , οι οποίες αξιοποιούν το χωρικό περιορισμό των τροχιών των φορτίων από το μαγνητικό πεδίο. Στην κυριότερη από αυτές , το tokamak , το πλάσμα περιέχεται σε ένα τοροειδή θάλαμο και το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από πηνία τυλιγμένα εξωτερικά γύρω από τον θάλαμο(Εικόνα 6). Το τοροειδές πεδίο είναι ισχυρό , με

αποτέλεσμα οι ακτίνες των τροχιών να είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις διαστάσεις του tokamak. Αν το πεδίο αυτό δε μεταβαλλόταν στο χώρο, τότε η συνισταμένη δύναμη θα κρατούσε το πλάσμα «κολλημένο» γύρω από τις μαγνητικές γραμμές και θα είχαμε τέλειο περιορισμό. Στην πραγματικότητα όμως, λόγω της καμπυλότητας του θαλάμου κατά μήκος της σωληνοειδούς διάστασης, το μαγνητικό πεδίο είναι ανομοιογενές και τα φορτία οδηγούνται σε κίνηση «ολίσθησης» προς τα τοιχώματα. Γι' αυτό το λόγο επάγεται ένα τοροειδές ρεύμα με χρήση εξωτερικού παλμικού μετασχηματιστή, το οποίο δημιουργεί ένα πολοειδές μαγνητικό πεδίο με σκοπό την αναχαίτιση των ολισθήσεων (το συνολικό μαγνητικό πεδίο γίνεται ελικοειδές). Η ενέργεια αυτή βελτιώνει αρκετά τον περιορισμό αλλά δε λύνει οριστικά το πρόβλημα, διότι αφενός η συσκευή δεν έχει συνεχόμενη λειτουργία, αφετέρου οι ολισθήσεις δημιουργούν αστάθειες που οδηγούν το πλάσμα σε τυρβώδη κατάσταση. Η βελτίωση της αποδοτικότητας της λειτουργίας των tokamak είναι στο επίκεντρο της τρέχουσας έρευνας. Τα κυριότερα ευρωπαϊκά πειράματα βρίσκονται στην Αγγλία (JET) και τη Γερμανία (ASDEX Upgrade), ενώ είναι σε εξέλιξη η κατασκευή του ITER στη Νότια Γαλλία ο οποίος προσδοκάται να αποτελέσει το τελευταίο βήμα πριν τον πρώτο πειραματικό σταθμό παραγωγής ενέργειας από ελεγχόμενη σύντηξη.



Εικόνα 7 : Το tokamak, η σύγχρονη πειραματική διάταξη για την επίτευξη ελεγχόμενης θερμοπυρηνικής σύντηξης μέσω του μαγνητικού περιορισμού πλάσματος.

2. Αξονοσυμμετρική ισορροπία πλάσματος στην Tokamak

2.1 Μοντέλα περιγραφής του πλάσματος σύντηξης

Ένα πλήρες μοντέλο για την περιγραφή του πλάσματος θα πρέπει να υπολογίζει συγχρόνως την κίνηση των φορτίων του πλάσματος υπό την επίδραση του εσωτερικού και εξωτερικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου αλλά και την εξέλιξη όλων των πεδίων υπό την επίδραση των φορτίων. Όσον αφορά το πρώτο σκέλος, η δυναμική συμπεριφορά των φορτίων καθορίζεται από την εξίσωση κίνησης (2ός νόμος του Νεύτωνα), ενώ η εξέλιξη των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων υπολογίζεται από τις εξισώσεις του Maxwell:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

όπου οι πυκνότητες φορτίου και ρεύματος μπορούν να εκφραστούν ως συναρτήσεις της θέσης και της ταχύτητας των φορτίων του πλάσματος. Αν επρόκειτο να μελετηθεί σύστημα με λίγα σωματίδια, οι παραπάνω εξισώσεις είναι δυνατό να επιλυθούν. Κάτι τέτοιο όμως δε συμβαίνει στην περίπτωση του πλάσματος, επειδή με την επιλογή μικρού αριθμού σωματιδίων δεν είναι δυνατό να προσομοιωθεί η πληθώρα των φυσικών συμπεριφορών στο πλάσμα. Συνεπώς, το πλήρες μοντέλο για την περιγραφή του πλάσματος είναι πρακτικά μη υλοποιήσιμο χωρίς σημαντικές απλοποιήσεις (οι οποίες προφανώς και θα επηρεάσουν την πληρότητα της περιγραφής).

Τα τρία κλασσικά μοντέλα της περιγραφής του πλάσματος είναι το μικροσκοπικό μοντέλο, το ρευστοδυναμικό μοντέλο και το στατιστικό μοντέλο. Το πρώτο προσομοιώνει το πλάσμα ως φορτία που δεν αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους και κινούνται μόνο υπό την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων. Στο δεύτερο μοντέλο, το πλάσμα αποτελείται από ένα ή περισσότερα αγώγιμα ρευστά (ηλεκτρόνια, ιόντα), όπου δεν είναι στο επίκεντρο οι λεπτομέρειες της κίνησης του κάθε φορτίου. Το τελευταίο μοντέλο, το οποίο περιλαμβάνει τα δυο προηγούμενα, περιγράφει το πλάσμα στα πλαίσια της πιθανότητας ένα σωματίδιο να βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση στο χώρο φάσεων.

Η πρώτη προσέγγιση στο πλάσμα γίνεται πάντα με τη διερεύνηση των τροχιών των φορτισμένων σωματιδίων υπό την επίδραση των εξωτερικών ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων. Παρότι απλοϊκή, η προσέγγιση αυτή παρέχει ποιοτικά συμπεράσματα για τη συλλογική συμπεριφορά του πλάσματος σε δεδομένα μαγνητικά πεδία. Η μελέτη της κίνησης φορτισμένων σωματιδίων μέσα σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία γίνεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση κίνησης:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Σε συνθήκες για το πλάσμα τελείως διαφορετικές, όπου οι ουσιαστικές διαφορές ανάμεσα στις κινήσεις των φορτίων είναι μικρές, είναι πρακτικότερο να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο της συλλογικής κίνησης του πλάσματος. Σύμφωνα με αυτό, το πλάσμα αποτελείται από ένα ή περισσότερα αγωγίμα ρευστά που αντιστοιχούν στα διαφορετικά είδη σωματιδίων. Στην πιο απλή περίπτωση των ηλεκτρονίων και ενός είδους ιόντων (μοντέλο δυο ρευστών), χρειαζόμαστε εξισώσεις τόσο για τα ιόντα όσο και για τα ηλεκτρόνια. Η εξίσωση συνέχειας είναι η πρώτη από τις εξισώσεις του μοντέλου και απεικονίζει τη διατήρηση του ηλεκτρικού φορτίου εντός του πλάσματος,

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} + \nabla \cdot (n_s \vec{u}_s) = 0$$

και ουσιαστικά υποδεικνύει ότι κάθε αλλαγή του αριθμού σωματιδίων σε μια περιοχή του πλάσματος συνδέεται με ροή σωματιδίων εκτός της περιοχής. Η επόμενη εξίσωση του μοντέλου είναι η εξίσωση ορμής και έχει να κάνει με τη διατήρηση της ορμής κατά τις μετατοπίσεις των σωματιδίων στις διαφορετικές διευθύνσεις:

$$n_s m_s \left[\frac{\partial \vec{u}_s}{\partial t} + (\vec{u}_s \cdot \nabla) \vec{u}_s \right] = n_s q_s (\vec{E} + \vec{u}_s \times \vec{B}) - \tau_{s,s} - \nabla \cdot \vec{P}_s$$

Το σύστημα των παραπάνω εξισώσεων δεν είναι «κλειστό», διότι οι εξισώσεις είναι τέσσερις αλλά οι άγνωστοι είναι έξι (πυκνότητες, ταχύτητες, πιέσεις). Για να «κλείσει» το σύστημα απαιτούνται σχέσεις να συνδέουν την πίεση με τα υπόλοιπα μεγέθη. Κάθε τέτοια σχέση ονομάζεται καταστατική εξίσωση και η ακριβής μορφή εξαρτάται από τις συγκεκριμένες υποθέσεις για την εξέλιξη του ρευστού. Αν το πλάσμα, εκτός από τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα, περιέχει ουδέτερα άτομα ή άλλα είδη ιόντων, χρειάζονται οι εξισώσεις για κάθε επιπλέον πληθυσμό σωματιδίων. Είναι δυνατό να περιγράψουμε το πλάσμα και σαν ενιαίο ρευστό, και

τότε έχουμε το μαγνητοϋδροδυναμικό μοντέλο (MHD), του οποίου οι εξισώσεις προκύπτουν με κατάλληλο συνδυασμό των εξισώσεων των δύο.

Στο τρίτο και τελευταίο μοντέλο η περιγραφή είναι μεν μικροσκοπική αλλά έχει στατιστικό χαρακτήρα. Δεν επικεντρωνόμαστε στην ακριβή θέση και ταχύτητα των σωματιδίων αλλά μόνο στην πιθανότητα να βρίσκονται σε μια συγκεκριμένη «κατάσταση» στο χώρο φάσεων. Η μαθηματική βάση για την περιγραφή είναι η συνάρτηση κατανομής, η οποία δίνει την πυκνότητα πιθανότητας που έχει ένα σωματίδιο τη χρονική στιγμή t να βρίσκεται σε μια θέση στο διάστημα $[r, r+dr]$ με ορμή από p ως $p+dp$. Η ισχύς μιας τέτοιας περιγραφής βασίζεται στο ότι η επίδραση των δυνάμεων μεγάλης εμβέλειας διαρκεί πολύ περισσότερο χρόνο από αυτή των κοντινών δυνάμεων. Αυτό εισάγει τη «μαζοποίηση» των φορτίων που έχουν περίπου την ίδια ορμή και βρίσκονται γύρω από μια συγκεκριμένη θέση, ενώ ο συνολικός αριθμός τους σε μια τέτοια περιοχή δεν αλλάζει στο χρόνο. Λαμβάνοντας υπόψη και την εξίσωση κίνησης, προκύπτει η κινητική εξίσωση:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{r}} + q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{p}} = \frac{\partial f}{\partial t} \int_{col} .$$

Η κινητική θεωρία παρέχει την πληρέστερη περιγραφή του πλάσματος διότι αφενός μελετά το πλάσμα στο μικροσκοπικό επίπεδο, οπότε συμπεριλαμβάνει λεπτομέρειες που η θεωρία ρευστού δε μπορεί λόγω του μακροσκοπικού της χαρακτήρα, αλλά και πιο πρακτικό από τη μικροσκοπική περιγραφή των κινήσεων των φορτίων. Πέρα όμως από τις διαπιστώσεις αυτές, το πιο ισχυρό επιχείρημα για την πληρότητα της κινητικής θεωρίας είναι ότι εμπεριέχει στη δομή της την κινηματική των σωματιδίων όσο και τη θεωρία ρευστού.

Η ισορροπία ενός μαγνητισμένου πλάσματος μπορεί να περιγράψει χωρίς να λάβουμε υπόψη τις χρονικές παραγώγους στις εξισώσεις MHD. Ελλείψει ροών ($v = 0$), αυτές οι εξισώσεις μειώνονται σε τρεις και είναι οι παρακάτω:

$$\nabla \cdot p = J \times B$$

$$\nabla \times B = \mu_0 J$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

Ας δούμε σε αυτό το σημείο την ανάλυση των εξισώσεων. Η πρώτη εξίσωση είναι η δύναμη ισορροπίας, η οποία δηλώνει ότι μια συγκεκριμένη ροή, κάθετη στο μαγνητικό πεδίο, εξισορροπεί την κινητική πίεση του πλάσματος. Πρακτικά,

για $\nabla^* p = 0 \propto J$, B είναι γραμμικά. Οι άλλες δυο εξισώσεις είναι απλά οι εξισώσεις Maxwell που περιγράφουν ένα στατικό μαγνητικό πεδίο.

Μια άμεση συνέπεια της δεύτερης εξίσωσης, από την $\nabla^* p^* J = \nabla^* p^* B = 0$, είναι ότι τα J, B κείτονται σε επιφάνειες σταθερής πίεσης. Αυτές οι επιφάνειες επομένως καλούνται «επιφάνειες ροής». Επιπλέον, εξαιτίας του γεγονότος ότι το p είναι μόνο μια συνάρτηση των ροών, σε κάθε επιφάνεια ροής μπορεί να οριστεί μια μοναδική τιμή της ροής, ανεξάρτητη από τη γεωμετρία βάσει της οποίας υπολογίστηκε η ροή. Σε ένα δακτύλιο υπάρχουν δυο διαφορετικοί τύποι καμπυλών; εκείνες που τυλίγουν γύρω από το δακτύλιο σε τοροειδή κατεύθυνση και εκείνες που τυλίγουν σε πολοειδή κατεύθυνση. Εάν ακολουθούμε μια καμπύλη που τυλίγει τοροειδώς, η ολοκλήρωση πέρα από την περιοχή που εσωκλείεται από αυτήν την επιφάνεια δίνει την πολοειδή συνάρτηση Ψ της μαγνητικής ροής και το συνολικό I_{pol} . Δεδομένου ότι και οι δυο είναι σταθερές στην επιφάνεια ροής, το μαγνητικό πεδίο μπορεί να εκφραστεί στις κυλινδρικές συντεταγμένες (R, ϕ , Z):

$$B_\phi = \frac{\mu_0 I_{pol}}{2\pi R}$$

$$B_R = -\frac{I}{2\pi R} \frac{\partial \Psi}{\partial Z}$$

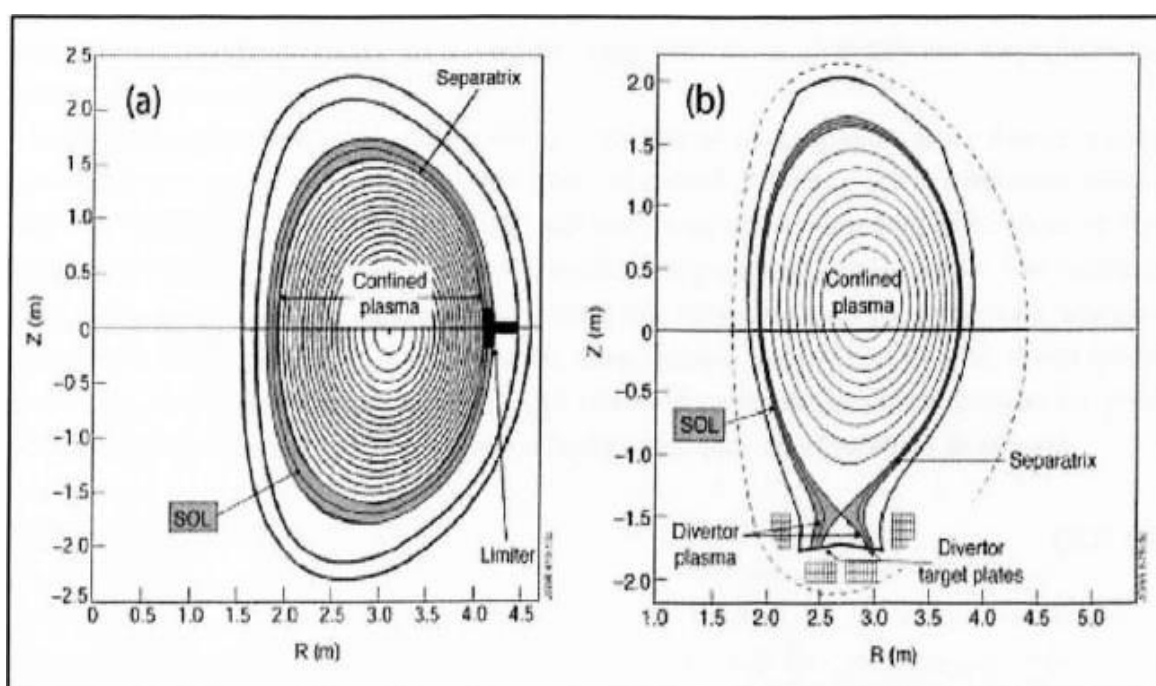
$$B_z = \frac{I}{2\pi R} \frac{\partial \Psi}{\partial R}$$

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω, η εξίσωση ισορροπίας γράφεται ως εξής:

$$-\Delta'(\Psi) = -\left[R \frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2}{\partial R^2} \right] \Psi = \mu_0 (2\pi R)^2 p'(\Psi) + \mu_0^2 I_{pol}(\Psi) I'_{pol}(\Psi)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι γνωστή ως εξίσωση των Grad-Shafranov. Για να λυθεί, πρέπει να προσδιοριστούν τα $p(\Psi)$ και $I_{pol}(\Psi)$ και μετά να υπολογίσουμε την συνάρτηση ροής $\Psi(R, Z)$. Με αυτή την συνάρτηση και σαφείς συνοριακές συνθήκες, η ισορροπία του tokamak είναι απόλυτα αποσαφηνισμένη, αφού το μαγνητικό πεδίο μπορεί να υπολογιστεί από τις παραπάνω σχέσεις B_ϕ , B_r , B_z . Για να ικανοποιήσουμε αυτές τις προϋποθέσεις, πρέπει να προσθέσουμε μια λύση της ομοιογενούς εξίσωσης, για παράδειγμα την εξίσωση Ψ_{ext} όπου $\Delta^* \Psi_{ext} = 0$. Ένα τέτοιο πεδίο παράγεται από τις εξωτερικές σπείρες που είναι τυλιγμένες γύρω από το tokamak. Η λύση της εξίσωσης Grad-Shafranov με τις συναρτήσεις σταθερών ορίων είναι αυτές οι οποίες μας υποδεικνύουν πως πρέπει να ρυθμιστούν τα εξωτερικά ρεύματα ελέγχου για να διατηρήσουν το πλάσμα σε ισορροπία.

Η εξίσωση Grad-Shafranov είναι μη γραμμική ως προς Ψ , παρόλα αυτά σε ειδικές περιπτώσεις οι αναλυτικές λύσεις μπορούν να ληφθούν υπόψη. Στην εικόνα 7 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παραδείγματα των πολοειδών διατομών που υπολογίζονται με την εξίσωση Grad-Shafranov. Από αυτή την οπτική, μπορεί να δει κανείς ότι οι επιφάνειες ροής δεν είναι κεντροθετημένες σε έναν άξονα, αλλά μετατοπίζονται ελαφρώς. Αυτή η μετατόπιση είναι λόγω των δυνάμεων που προσπαθούν να επεκτείνουν το δακτύλιο ακτινωτά προς τα έξω, δηλαδή η κινητική πίεση του πλάσματος και η δύναμη επέκτασης ενός τρέχοντος βρόχου αναπτύσσονται λόγω της δύναμης $J \times B$. Είναι επίσης ορατό ότι η διατομή πλάσματος δεν είναι απαραίτητο πως πρέπει να είναι κυκλική. Στην πραγματικότητα, η επιμήκυνση και η τριγωνικότητα, που παράγονται με τις πρόσθετες σπείρες στο πολοειδές πεδίο, ενισχύουν την απόδοση του πλάσματος.



Εικόνα 8: Πολοειδής προβολή δύο τυπικών περιπτώσεων μαγνητικής ισορροπίας του tokamak, υπολογισμένη βάσει την εξίσωσης Grad-Shafranov.

2.2 Θεωρητική περιγραφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο πλάσμα

Οι μηχανισμοί διέγερσης και διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο πλάσμα είναι πολύ σημαντικοί τόσο για τη μελέτη του ίδιου του πλάσματος αλλά και για διάφορες εφαρμογές. Η διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων υπολογίζεται από τις εξισώσεις Maxwell, οι οποίες αποτελούν ομαδοποίηση των νόμων Gauss, Faraday & Ampere. Το μεγαλύτερο τμήμα της μελέτης των κυμάτων στο πλάσμα

αποτελεί η επίλυση των εξισώσεων Maxwell σε συνδυασμό με τις εξισώσεις που περιγράφουν τη δυναμική του πλάσματος , με κύριο σκοπό να ταξινομηθούν τα είδη κυμάτων και να διερευνηθούν οι αλληλεπιδράσεις τους με τα φορτία.

Απουσία μαγνητικού πεδίου τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που διαδίδονται είναι υψηλής συχνότητας , και λόγω των ηλεκτρονίων (συγκριτικά η επίδραση των ιόντων είναι πολύ μικρή λόγω της αρκετά μεγαλύτερης μάζας τους) «βλέπουν» το πλάσμα σαν ένα απλό διηλεκτρικό. Η προσθήκη μαγνητικού πεδίου εισάγει ανισοτροπία αλλάζει τα είδη των κυμάτων που μπορούν να διαδοθούν. Οι ιδιότητες των κυμάτων που υπήρχαν απουσία του μαγνητικού πεδίου μεταβάλλονται σημαντικά , ενώ δημιουργούνται οι προϋποθέσεις για τη διάδοση νέων ειδών κυμάτων. Τα κύματα αυτά δεν είναι μόνο σε υψηλές συχνότητες αλλά και σε χαμηλότερες , κοντά στην κυκλοτρονική συχνότητα των ιόντων.

Ένας άλλος παράγοντας που παίζει καθοριστικό ρόλο στις ιδιότητες των κυμάτων είναι η θερμοκρασία του πλάσματος. Όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλή , τότε οι θερμικές κινήσεις των φορτίων δεν επιδρούν στο κύμα και η διάδοση μοιάζει πολύ με τη διάδοση σε κοινά διηλεκτρικά. Όταν όμως η θερμοκρασία είναι υψηλή και οι κινήσεις αυτές είναι εκτεταμένες , τότε λόγω του ότι υπάρχει ένας αριθμός σωματιδίων που κινείται με ταχύτητα ίση ή πολύ κοντά στη φασική ταχύτητα του κύματος και έρχεται σε συντονισμό με το κύμα , εμφανίζεται το ενδεχόμενο απόσβεσης ή ενίσχυσης του κύματος.

Η διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε όλα τα υλικά μέσα και σε όλο το εύρος συχνοτήτων περιγράφεται από τις εξισώσεις Maxwell. Επίλυση των εξισώσεων αυτών σημαίνει καθορισμό των πεδίων (E, B) , και αυτό που χρειάζεται καταρχήν είναι να συσχετιστούν μαθηματικά οι πυκνότητες φορτίου και ρεύματος με τα πεδία. Στο πλάσμα , ένα μέσο το οποίο περιέχει ελεύθερα φορτία και είναι εν γένει μη γραμμικό , ανομοιογενές και ανισοτροπικό , η κατάσταση θα είναι αρκετά διαφορετική από ότι στα κοινά διηλεκτρικά. Μια εναλλακτική περιγραφή της διάδοσης των κυμάτων μπορεί να γίνει μέσω της κυματικής εξίσωσης , η οποία προκύπτει από τις εξισώσεις Maxwell:

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{\nabla \rho}{\epsilon_0} + \mu_0 \frac{\partial j}{\partial t}$$

$$\nabla^2 B - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} = \mu_0 \nabla \times j$$

Στο κενό η λύση αυτών των εξισώσεων είναι γνωστή «ως επίπεδο κύμα»:

$$\bar{E}(r,t) = \bar{E}_0 e^{i(k \cdot r - \omega t)}$$

Η φάση έχει μεγάλο μέρος της πληροφορίας για τη διάδοση των κυμάτων. Η συχνότητα καθορίζει τη χρονική εξέλιξη των ταλαντώσεων του κύματος, ενώ το διάνυσμα του κυματαριθμού k ορίζει την κατεύθυνση διάδοσης. Η ισοδυναμία της περιγραφής του πλάσματος ως αγώγιμο διηλεκτρικό μέσο για την περιγραφή ως κενό με φορτία και ρεύματα είναι στο ότι η θεώρηση ως μέσο με τανυστές επιτρεπτότητας και αγωγιμότητας είναι ουσιαστικά ένα μοντέλο για την περιγραφή της κίνησης των φορτίων μέσω των πυκνοτήτων φορτίου και ρεύματος. Σε πρακτικά προβλήματα, οι πιο συνηθισμένες απλοποιήσεις είναι ότι το κύμα έχει σταθερή συχνότητα, τα πεδία είναι τόσο ασθενή ώστε η απόκριση του πλάσματος να είναι γραμμική, και ότι το πλάσμα είναι στατικό, ανομοιογενές και ανισοτροπικό. Με αυτές τις παραδοχές, η κυματική εξίσωση για το μιγαδικό ηλεκτρικό πεδίο είναι:

$$\nabla \times (\nabla \times \bar{E}) - \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_0 \bar{E} = 0$$

, όπου ο μιγαδικός διηλεκτρικός τανυστής συνδέεται με τους πραγματικούς τανυστές επιτρεπτότητας και αγωγιμότητας με τις σχέσεις:

$$\epsilon_0 \in \bar{\epsilon} + i \frac{\hat{\sigma}}{\omega}$$

Σε ανομοιογενές μέσο, το επίπεδο κύμα δεν είναι ακριβής λύση της κυματικής εξίσωσης. Στην περίπτωση όμως που οι ιδιότητες του μέσου μεταβάλλονται αργά στο χώρο, η μορφή του επίπεδου κύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μαθηματική διατύπωση της πλήρους λύσης. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια των ασυμπτωτικών μεθόδων, οι οποίες μετατρέπουν την κυματική εξίσωση σε ένα σύνολο απλούστερων εξισώσεων μέσω της ανάπτυξης της θεωρητικής μορφής της λύσης για το ηλεκτρικό πεδίο σε ασυμπτωτική σειρά. Η προσέγγιση αυτή περιγράφει τη διάδοση στο πλαίσιο κυματικών ακτίνων / δεσμών που διαθλώνται από το ασθενώς χωρικά.

Τα είδη υψίσυχων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που διαδίδονται κάθετα στο μαγνητικό πεδίο είναι δύο: Το σύνηθες κύμα (O), του οποίου ο ηλεκτρικό πεδίο είναι παράλληλο προς το μαγνητικό πεδίο, και το ασύνηθες κύμα (X), του οποίου το ηλεκτρικό πεδίο περιστρέφεται γύρω από το μαγνητικό πεδίο. Λόγω του ότι το ηλεκτρικό του πεδίο έχει σταθερή φορά, το σύνηθες κύμα είναι γραμμικά πολωμένο (ενώ τα κύματα X είναι ελλειπτικά πολωμένα) και έχει τις ίδιες ακριβώς ιδιότητες με τα κύματα υψηλής συχνότητας σε μη μαγνητισμένο πλάσμα. Δηλαδή, τουλάχιστον όσον αφορά τη διασπορά, τα συνήθη κύματα δεν αντιλαμβάνονται την παρουσία του μαγνητικού πεδίου στο πλάσμα.

Μεγάλη ώθηση στη μελέτη των κυμάτων πλάσματος έδωσε η διεθνής προσπάθεια για την επίτευξη ελεγχόμενης θερμοπυρηνικής σύντηξης. Καθώς τα ασταθή κύματα καθορίζουν τη χρονική κλίμακα της ευστάθειας , ή με άλλα λόγια την ανάπτυξη μικροασταθειών , η κατανόηση των γραμμικών και μη γραμμικών ασταθειών αποτελεί πάντα ένα σημαντικό κομμάτι της θεωρίας κυμάτων πλάσματος. Επίσης , η διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο πλάσμα έχει πολλές εφαρμογές.

Σαν πρώτες εφαρμογές των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο πλάσμα αναφέρουμε τη θέρμανση πλάσματος και την οδήγηση ρευμάτων. Η θέρμανση μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έχει έρθει στο προσκήνιο λόγω της ανάγκης να αυξηθεί η θερμοκρασία του πλάσματος σε επίπεδα ανάφλεξης (δηλαδή πάνω από το κατώφλι για την έναρξη των θερμοπυρηνικών αντιδράσεων) , ενώ η οδήγηση ηλεκτρικού ρεύματος συμβάλει στην ομαλή εξέλιξη του πλάσματος με την καταπολέμηση MHD ασταθειών και τη δημιουργία εσωτερικών φραγμάτων μεταφοράς , αλλά και στην ενίσχυση του πολοειδούς μαγνητικού πεδίου. Η προσομοίωση τέτοιων καταστάσεων απαιτεί πολύ λεπτομερή περιγραφή της κυματικής διάδοσης και της απορρόφησης στο ανομοιογενές μαγνητισμένο πλάσμα , καθώς είναι αναγκαία η ακριβής πρόβλεψη του από πού θα περάσει και που θα αποτεθεί η κυματική ενέργεια. Λόγω της πολύπλοκης εξάρτησης της απόθεσης ισχύος από πολλούς παράγοντες, π.χ μαγνητικό πεδίο , γεωμετρία της διάδοσης του κύματος , απόκριση του πλάσματος , μια ρεαλιστική μελέτη απαιτεί αριθμητική αντιμετώπιση.

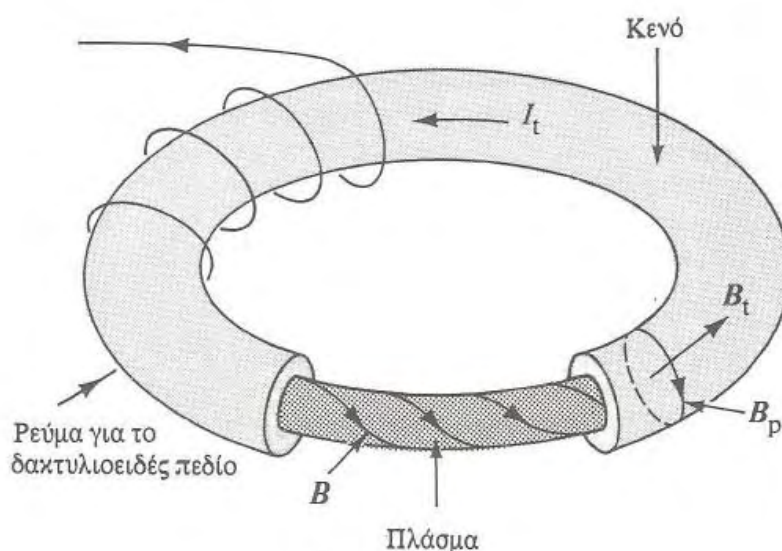
Μια άλλη κατηγορία εφαρμογών έχει να κάνει με τα διαγνωστικά πλάσματος , τα οποία είναι πειραματικές διατάξεις μετρήσεως των παραμέτρων του πλάσματος. Δύο είναι οι κυριότερες τεχνικές μέτρησης που βασίζονται σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα: Η ανακλαστομετρία (reflectometry) και η συμβολομετρία (interferometry). Στην πρώτη , εκπέμπονται μικροκύματα με τέτοια συχνότητα ώστε να ανακλαστούν στο επιθυμητό σημείο εντός του πλάσματος. Το πλάτος και η φάση του ανακλώμενου κύματος σχετίζονται με τη μιγαδική αντίσταση του πλάσματος , η οποία με τη σειρά της συνδέεται με τις μετρούμενες ποσότητες (πυκνότητα , μαγνητικό πεδίο) . Από την άλλη , η συμβολομετρία βασίζεται στη δημιουργία και διάδοση ενός σύνθετου κύματος με την υπέρθεση δύο ή περισσότερων κυμάτων. Όταν το κύμα αυτό διαδίδεται στο πλάσμα , οι αρχικά μικρές διαφορές των συστατικών κυμάτων αυξάνονται , και από τις διαφορές στη φάση των κυμάτων είναι δυνατό να υπολογιστεί η πυκνότητα πλάσματος.

Στα πειράματα σύντηξης , τα κύματα παράγονται από τα γυροτρόνια . Το γυροτρόνιο είναι μια διάταξη , η λειτουργία της οποίας βασίζεται στη μεταφορά ενέργειας από μια ασθενώς σχετικιστική δέσμη ηλεκτρονίων σε ένα υψίσυχο κύμα μέσω του συντονισμού των ηλεκτρονίων με μια κατάλληλη κυκλικά πολωμένη συνιστώσα του κύματος. Το κυματοδιάνυσμα της παραγόμενης ακτινοβολίας είναι σχεδόν κάθετο στον άξονα της διάταξης. Χαρακτηριστικό του γυροτρονίου είναι η

ύπαρξη ισχυρού μαγνητικού πεδίου κατά μήκος του άξονα του , οπότε τα ηλεκτρόνια που παράγονται στην κάθοδο ακολουθούν ελικοειδείς τροχιές.

2.3 Περιορισμός με μαγνητικό πεδίο

Η τεχνική του περιορισμού του πλάσματος σε μαγνητικό πεδίο χρησιμοποιείται στα περισσότερα πειράματα επίτευξης θερμοπυρηνικής σύντηξης. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την πειραματική συσκευή tokamak (ρώσικο αρκτικόλεξο από το «δακτυλιοειδής μαγνητικός θάλαμος») που κατασκευάστηκε για πρώτη φορά στην ΕΣΣΔ, για να συγκρατήσει και να θερμάνει το πλάσμα σαν συνδυασμός μαγνητικής φιάλης συγκράτησης και επιταχυντή. Το tokamak έχει σχήμα δακτυλίου. Το πλάσμα περιορίζεται από την υπέρθεση δύο μαγνητικών πεδίων (1) του κλασικού μαγνητικού πεδίου των δακτυλίων (π.χ. δακτυλίου του Rowland) και (2) ενός ασθενέστερου μαγνητικού πεδίου που ονομάζεται πολοειδές (poloidal) και παράγεται από το ρεύμα I_t το οποίο επάγεται στο ίδιο το πλάσμα του δακτυλίου. Το ρεύμα αυτό θερμαίνει επίσης το πλάσμα. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα το συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο που προέρχεται από την υπέρθεση των δύο προηγούμενων είναι ελικοειδές και οι γραμμές του περιορίζουν σαν «σπείρωμα» το πλάσμα και το εμποδίζουν να αγγίξει τα τοιχώματα του δακτυλίου.



Εικόνα 9: Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας ενός tokamak. Να σημειωθεί ότι το συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο B είναι υπέρθεση του μαγνητικού πεδίου B_t του δακτυλίου και του πολοειδούς πεδίου B_p . Το πλάσμα παγιδεύεται ανάμεσα στις ελικοειδείς γραμμές του συνιστάμενου πεδίου.

Υπάρχει ο κίνδυνος το πλάσμα να αγγίξει τα τοιχώματα του δακτυλίου με συνέπεια να ψυχθεί και να αποσπάσει διάφορα υλικά από τα τοιχώματα, με αποτέλεσμα να αλλοιωθεί και να χάσει μεγάλο μέρος της ισχύς του.

2.3.1 Οι σπουδαιότερες μηχανές πυρηνικής σύντηξης

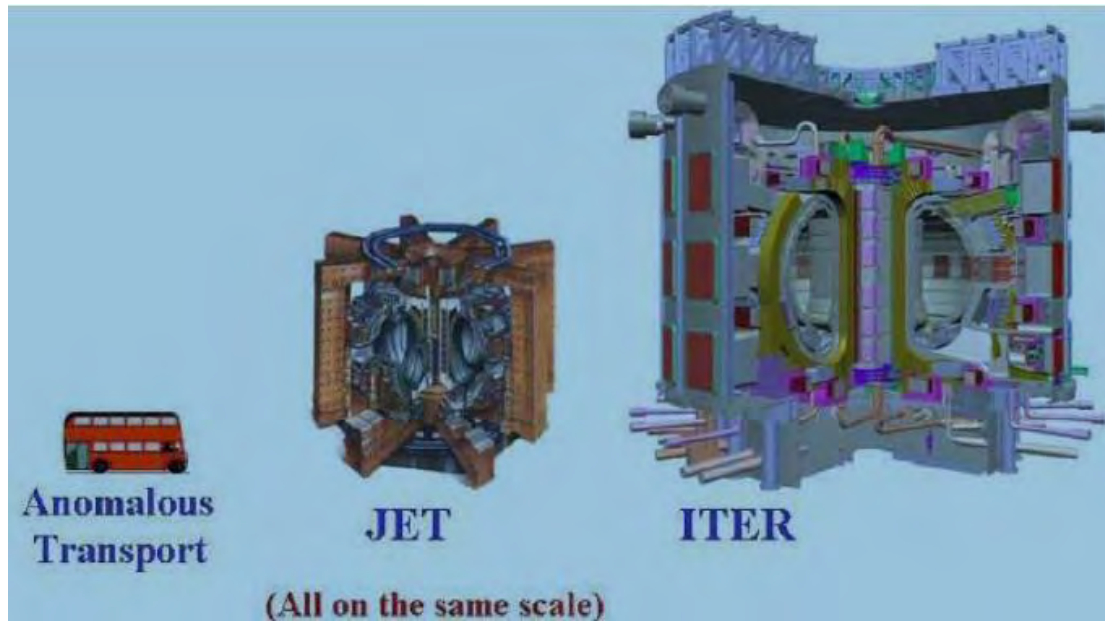
Υπάρχουν πολυάριθμες μηχανές σύντηξης όχι μόνο στην Ευρώπη, αλλά σε όλο τον κόσμο γενικότερα. Οι σημαντικότεροι από αυτούς, μαζί με μια σύντομη περιγραφή για τον καθένα, περιγράφονται παρακάτω.

- **TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor)** : Ήταν ενεργός μέχρι το 1977 στο Εργαστήριο Πλάσματος του Πρίνστον, στις ΗΠΑ. Έδωσε τη μέγιστη θερμοκρασία που μια μηχανή Tokamak μπόρεσε ποτέ να παραγάγει: 510 εκατομμύρια βαθμούς Κελσίου.
- **NSTX (National Spherical Torus Experiment)** : Ο διάδοχος του TFTR. Ήταν ένας μεγάλος αντιδραστήρας ικανός να επιτύχει υψηλή πυκνότητα πλάσματος με σχετικά μικρά μαγνητικά πεδία.
- **TCV (Tokamak Configuration Variable)** : Λειτουργεί από το 1992 στο Κέντρο Ερευνών Φυσικής του Πλάσματος, στην Ελβετία, και μελετά τη δυνατότητα θέρμανσης του πλάσματος με μικροκύματα.
- **DIII-D** : Βρίσκεται στο Σαν Ντιέγκο των ΗΠΑ και είναι το μεγαλύτερο εν ενεργεία Tokamak στην αμερικάνικη ήπειρο. Πέτυχε αξιοσημείωτη σταθεροποίηση του πλάσματος.
- **JET (Joint European Torus)** : Το μεγάλο Κοινό Ευρωπαϊκό Τοροειδές, στην Αγγλία. Έχει διάμετρο 15 μ. και ύψος 12 μ. Έχουν πραγματοποιηθεί πολλά σημαντικά πειράματα κι έχει επιτύχει θερμοκρασία 300 εκατομμύρια βαθμούς Κελσίου.
- **JT 60** : Λειτουργεί από το 1985 στην Ιαπωνία. Μελετά τη συμπεριφορά του πλάσματος μίγματος δευτερίου-τριτίου (D-T).

- **ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)** : Το πιο φιλόδοξο μέχρι σήμερα διεθνές πρόγραμμα. Συμμετέχουν η Ευρωπαϊκή Ένωση, η Ιαπωνία, ο Καναδάς και η Ρωσία. Σκοπός της υπερμεγέθους μηχανής είναι να επιτύχει μια αυτοσυντηρούμενη σύντηξη. Η ολοκλήρωσή του αναμένεται στις επόμενες δεκαετίες.
- **TFR (Tokamak de Fontenay-aux-Roses)** : Η πρώτη γαλλική μηχανή τοκαμάκ η οποία χτίστηκε στο ερευνητικό κέντρο French Atomic Energy Commission (CEA) στην Fontenay-aux-Roses , μια κοινότητα στα νοτιοδυτικά προάστια του Παρισιού στην Γαλλία. Τα χρόνια 1973-1976 αποτελούσε τη μεγαλύτερη μηχανή παραγωγής και απόδοσης πυρηνικής ενέργειας παγκοσμίως.
- **Tore Supra:** Η επόμενη γαλλική μηχανή τοκαμάκ, η οποία ξεκίνησε το έργο της το 1988, μετά την αποσύνδεση της TFR, στο κέντρο πυρηνικής ενέργειας Cadarache, Bouches-du-Rhône , της Γαλλίας. Στόχος της ήταν η δημιουργία πλάσματος μεγάλης διάρκειας. Μάλιστα , κρατάει το ρεκόρ παραγωγής πλάσματος για τοκαμάκ 6 λεπτά και 30 δευτερόλεπτα.

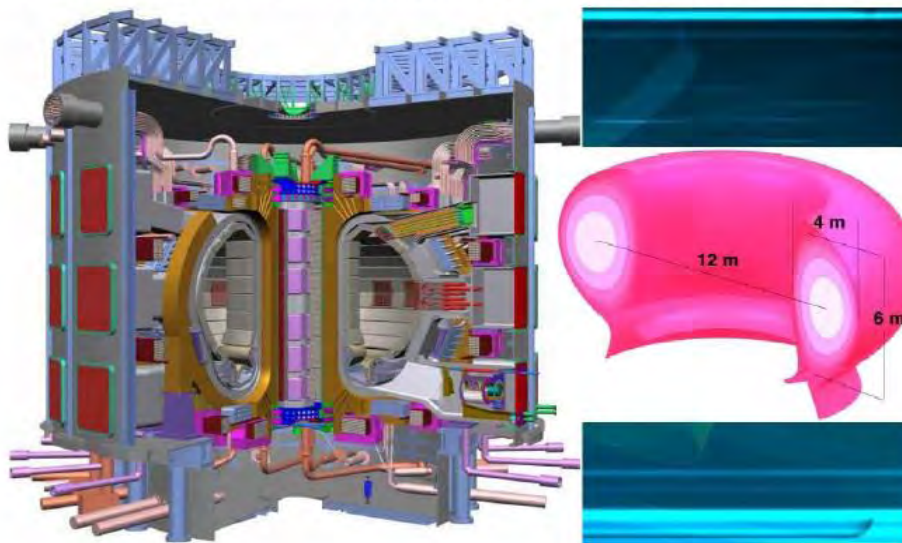
2.3.2 Πειραματικές διατάξεις μαγνητικής σύντηξης στην Ευρώπη και το μελλοντικό ITER

Έχουν αρχίσει οι εργασίες για την κατασκευή στο Cadarache (Γαλλία) διάταξης τοκαμάκ στην οποία να παράγεται παλμός διάρκειας 300-500 s και ισχύος 400-500 MW με προοπτική συνεχούς λειτουργίας με ισχύ 200 MW. Το Νοέμβριο του 2006 υπογράφηκε διεθνής συμφωνία με εταίρους: Ευρωπαϊκή Ένωση, Ιαπωνία, Κίνα, ΗΠΑ, Ρωσία, Ν. Κορέα, Ινδία. Κόστος Κατασκευής: 5 δισ.€ [σε βάθος 10 ετών]. Κόστος Λειτουργίας για 10 χρόνια: 5 δισ. € Η συμφωνία αυτή αναμενόταν να επικυρωθεί μέχρι τέλους του έτους.



Εικόνα 10: Σύγκριση ως προς το μέγεθος.

ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor



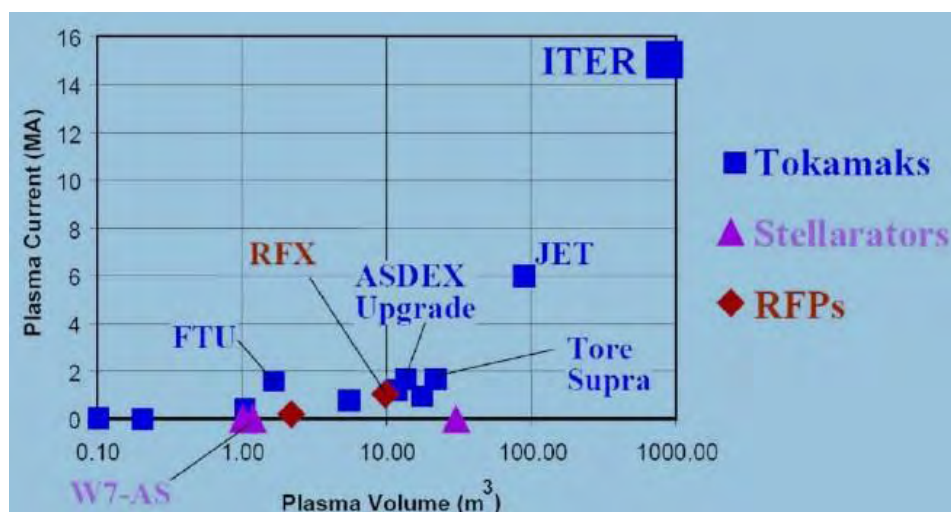
Εικόνα 11: Μερικές ενδεικτικές διαστάσεις του ITER.

Total Fusion Power	500MW (700MIV)
Q — fusion power/additional heating power	> 10
Average 14MeV neutron wall loading	0.57 MW/m² (0.8MW/m²)
Plasma inductive burn time	>400s
Plasma major radius (R)	6.2 m
Plasma minor radius (a)	2.0 m
Plasma current (I_p)	15 MA (17 MA⁽¹⁾)
Vertical elongation @95% flux surface/separatrix (K₉₅)	1.70/1.85
Triangularity (@95% flux surface separatrix (δ₉₅))	0.33 / 0.49
Safely factor @95% flux surface (q₉₅)	3.0
Toroidal field @6.2 m radius (B_T)	5.3 T
Plasma volume	837 m³
Plasma surface	678 m²
Installed auxiliary heating/current drive power	73 MW ^[2]

(1) The machine is capable of a plasma current up to 17MA with the parameters shown in parentheses) within some limitations over some other parameters (e.g.. pulse length).

(2) A total plasma heating power up to 110MW may be installed in subsequent operation phases.

Εικόνα 12: Παράμετροι και διαστάσεις του πλάσματος.



Εικόνα 13: Πειραματικές διατάξεις μαγνητικής σύντηξης στην Ευρώπη και το μελλοντικό ITER.

Στην τελευταία εικόνα παρατηρούμε το ρεύμα συναρτήσει του όγκου του πλάσματος. Όπως βλέπουμε, ο ITER θα δουλεύει σε υψηλές συχνότητες ξεπερνώντας κάθε προηγούμενο πείραμα που έχει πραγματοποιηθεί ποτέ στον κόσμο. Όσα πέτυχαν οι προκάτοχοι του, ο ITER, χωρίς αμφιβολία θα τα ξεπεράσει.

2.4 Παράμετροι των 2 βασικών μηχανών JET , ITER

Όπως έχουμε τονίσει και σε προηγούμενες παραγράφους οι δυο βασικότερες μηχανές που υπάρχουν στον κόσμο και πάνω στους οποίους οι ερευνητές προσπαθούν να πετύχουν ελεγχόμενη θερμοπυρηνική σύντηξη είναι ο JET(Αγγλία) και ο ITER (Ευρωπαϊκή Ένωση, Καναδάς, Ιαπωνία και Ρωσία).

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζουμε τις βασικές παραμέτρους αυτών των δυο μηχανών σύντηξης , καθώς θα μιλήσουμε γι'αυτές εκτενέστερα παρακάτω:

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	JET	ITER
Μέγιστη ακτίνα (m)	3.0	6.2
Ελάχιστη ακτίνα (m)	1.2	2.0
Όγκος πλάσματος (m^3)	100	800
Ρεύμα πλάσματος (MA)	5-7	15
Μαγνητικό πεδίο (T)	3.4	5.3
Ισχύς σύντηξης (MW)	<16	500
$Q=P_{fusion}/P_{input}$	1	10
Εξωτερική θερμική ισχύς (MW)	40	73
Διάρκεια παλμού του πλάσματος (sec)	10-20	>300

Πίνακας 1: Βασικοί παράμετροι των μηχανών JET και ITER.

2.4.1 Βασικά συστατικά του ITER

Τα βασικά συστατικά στοιχεία του ITER παριστάνονται στις παραπάνω εικόνες 14-15 και με λίγα λόγια , καθώς όλα είναι υπό κατασκευή και οι εξειδικευμένες πληροφορίες είναι ελλιπείς , είναι τα παρακάτω:

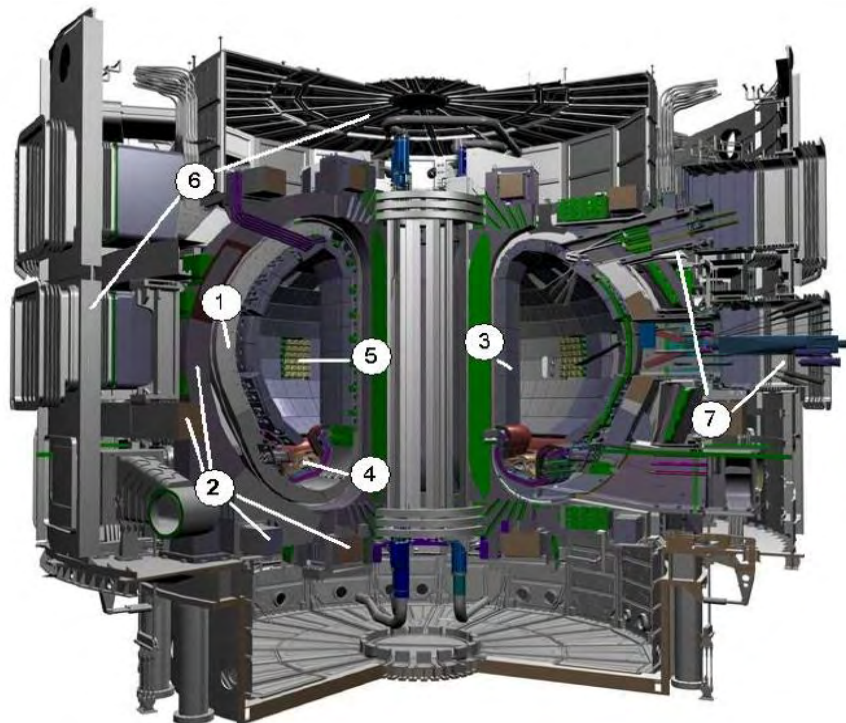
1. **Κεντρικό σωληνοειδές:** Το πρωτεύον κύκλωμα του μετασχηματιστή. Βρίσκεται στο κέντρο του τοκαμάκ και αποτελείται από 6 ανεξάρτητα πηνία. Εξυπηρετεί το σκοπό της τρέχουσας κίνησης και βοηθά στη διαμόρφωση του πεδίου στην περιοχή εκτροπής. Το πλάσμα αποτελεί το δευτερεύον κύκλωμα.
2. **Δοχείο κενού:** Στην πραγματικότητα εμποδίζει την είσοδο του αέρα στην περιοχή που περιέχει το πλάσμα. Είναι ένα δοχείο κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα διπλού τοιχώματος. Έχει εξωτερική διάμετρο 19 μέτρα και ύψος 11 μέτρα , με εσωτερική διάμετρο 6 μέτρα. Το δοχείο , απαρτίζεται επίσης από 9 συγκολλημένα μέρη , όπου μεταξύ των τειχών τους υπάρχει ειδικό

σύστημα ψύξης με νερό , προκειμένου να προστατεύεται ο μηχανισμός από τα υψηλής ενέργειας νετρόνια. Τέλος , το δοχείο διαθέτει 44 θύρες που παρέχουν πρόσβαση για απομακρυσμένο χειρισμό , διαγνωστικά , εξωτερική θέρμανση και αντλίες νερού.

3. **Κρυοστάτης:** Περικλείει τα πηνία και το δοχείο κενού και ψύχεται σε περίπου -200 βαθμούς Κελσίου ώστε να συμβάλει στη διατήρηση των υπεραγώγιμων μαγνητών στη θερμοκρασία λειτουργίας τους, δηλαδή στους -269 βαθμούς Κελσίου. Εξασφαλίζει κατά αυτό τον τρόπο ένα περιβάλλον με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Όπως και το εσωτερικό του δοχείου κενού έτσι και ο κρυοστάτης διαθέτει πολλά ανοίγματα για απομακρυσμένη ελεγχόμενη πρόσβαση. Τα θερμά μέρη απομονώνονται θερμικά από τους ψυχομένους μαγνήτες.
4. **Πηνία τοροειδούς και πολοειδούς πεδίου:** Το σύστημα μαγνητών του ITER αποτελείται από 18 υπεραγώγιμα πηνία τοροειδούς πεδίου (TF) , 6 πηνία ακτινικού πεδίου (PF). Τα πηνία αυτά παράγουν το ισχυρό μαγνητικό πεδίο (συνήθως της τάξης των 5 Tesla, δηλαδή περίπου 100.000 φορές ισχυρότερο από το μαγνητικό πεδίο της Γης), το οποίο συγκρατεί το πλάσμα και το εμποδίζει να έλθει σε επαφή με τα τοιχώματα του δοχείου κενού. Η μαγνητική ενέργεια θα φτάσει τα 41 GJ. Για να επιτευχθούν τόσο μεγάλες τιμές , πρέπει οι μαγνήτες να ψύχονται στο σημείο όπου γίνονται υπεραγώγιμοι. Τα πηνία τοποθετούνται αρκετά κοντά στο δοχείο. Αναφορικά με τα πηνία , τα PF είναι τοποθετημένα γύρω από τα πηνία TF για τον λόγο ότι δίνοντας εμείς ρεύμα πλάσματος , δημιουργούμε μαγνητικό πεδίο , το οποίο προκαλεί την περιστροφή των γραμμών του πεδίου γύρω από την καμπύλη (PF) αντισταθμίζοντας τα αρνητικά αποτελέσματα των TF , και βελτιώνοντας κατά αυτό τον τρόπο την λειτουργικότητα και την μείωση των απωλειών.
5. **Εκτροπέας:** Απομακρύνει τις προσμίξεις και το ήλιο από το δοχείο κενού και είναι η μόνη περιοχή στην οποία εσκεμμένα επιτρέπεται στο πλάσμα να αγγίξει τα τοιχώματα. Βρίσκεται στο κάτω μέρος του σκάφους και θα πρέπει να αντέχει σε υψηλή θερμοκρασία , φορτία και ροές σωματιδίων.
6. **Μανδύας:** Ο μανδύας παρέχει θωράκιση στο δοχείο και στα πηνία από την υψηλή θερμοκρασία και τα φορτία νετρονίων. Εν προκειμένω την ευκολότερη συντήρηση ο μανδύας απαρτίζεται από 440 αρθρωτά τμήματα που εξυπηρετούνται μεμονωμένα μέσω απομακρυσμένου χειρισμού. Διαθέτει βηρύλλιο που εξυπηρετεί το σκοπό της απορρόφησης θερμότητας από το πλάσμα. Το λίθιο περιέχεται στα δομικά στοιχεία (modules) που αποτελούν τον μανδύα. Όταν τα νετρόνια αντιδρούν με το λίθιο, παράγεται τρίτιο το οποίο μπορεί να διαχωριστεί και να εισαχθεί στο πλάσμα. Η ενέργεια

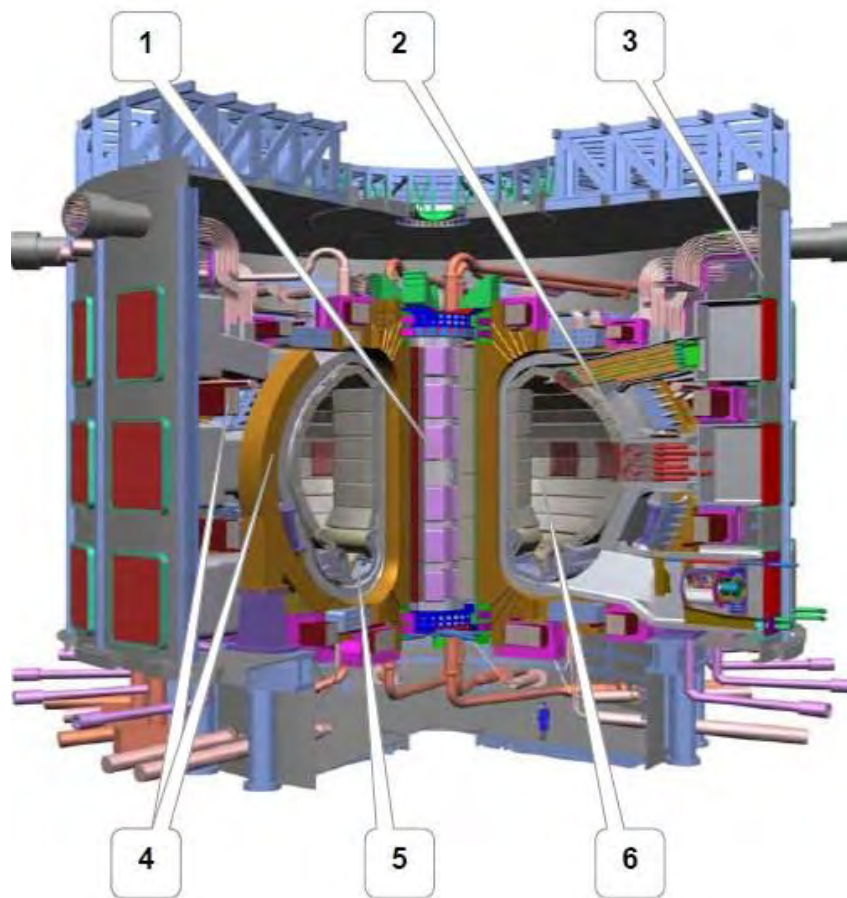
των νετρονίων απάγεται προκειμένου να θερμάνει ένα κύκλωμα νερού και να παράγει ατμό, ο οποίος θα θέσει σε κίνηση τις ηλεκτρικές γεννήτριες. Λειτουργεί, δηλαδή ακριβώς όπως ένας σταθμός παραγωγής ενέργειας (ΔΕΗ), όπου το ψυκτικό τροφοδοτεί τους στρόβιλους των γεννητριών.

7. **Διαγνωστικά:** Τα διαγνωστικά που υπάρχουν γύρω από τον ITER εξυπηρετούν τον σκοπό της έρευνας και έλεγχου της συμπεριφοράς του πλάσματος. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία τεχνολογιών που εφαρμόζεται γύρω από τα διαγνωστικά, τα οποία πρέπει να αντέχουν τις ακραίες συνθήκες που επικρατούν κοντά στο πλάσμα, χωρίς παράλληλα να χάνουν εκατοστό ακρίβειας. Υπάρχουν 50 διαγνωστικά αυτή τη στιγμή που θα τρέχουν στον ITER.



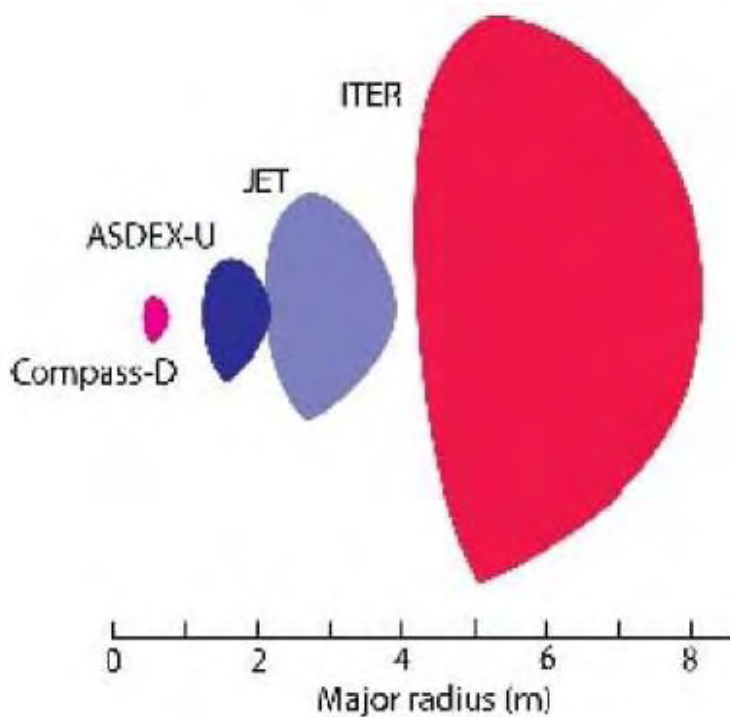
Εικόνα 14: Overview over ITER, highlighting the 1) vacuum vessel, 2) magnets, 3) blanket, 4) divertor, 5) external heating, 6) cryostat and 7)

diagnostics.



Εικόνα 15: Τα βασικά μέρη ενός ITER.

Ολοκληρώνοντας την ενότητα αυτή παραθέτουμε την παρακάτω εικόνα (Εικόνα 16) στην οποία παρουσιάζεται το μέγεθος του πλάσματος για διάφορες ευρωπαϊκές μηχανές σύντηξης. Είναι εντυπωσιακή η παρατήρηση ότι το μέγεθος του πλάσματος στον ITER είναι σχεδόν τριπλάσιο από το αντίστοιχο του JET, γεγονός που δείχνει πόσα βήματα προόδου έχουν γίνει στα χρόνια που μεσολάβησαν από την δημιουργία των δυο αυτών μηχανών σύντηξης.



Εικόνα 16: Μέγεθος του πλάσματος στις διάφορες μηχανές σύντηξης.

2.4.2 Τα κύρια συστατικά του JET

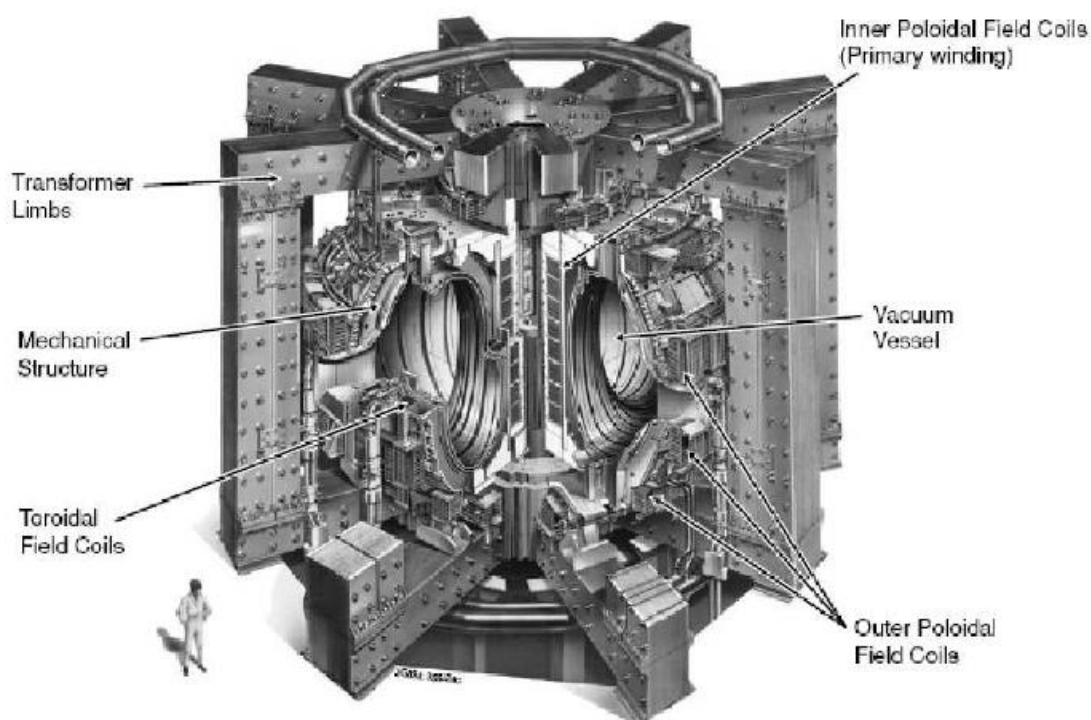
Τα όργανα έξω από το θάλαμο είναι τροφοδοτικά και διαγνωστικά. Με D – T το 1997 παρήχθη παλμός ισχύος 5MW και διάρκειας 5s καθώς και παλμός (μέγιστης) ισχύος 12 - 15 MW , ο υψηλότερος αυτή τη στιγμή στον κόσμο σε λειτουργία.



Εικόνα 17: Γενική άποψη της μηχανής JET.

Σε αυτό το σημείο θα ανοίξουμε μια παρένθεση σχολιάζοντας την παραγόμενη ισχύ διαφόρων μηχανών με στόχο να κατατοπίσουμε τον αναγνώστη για την παρούσα τεχνολογική πρόοδο αλλά και τα υψηλό διακύβευμα των ημερών μας με την κατασκευή του ITER. Το T-10, in Russia το 1975 στα 15 έτη που ήταν σε ισχύ είχε τη δυνατότητα παραγωγής μόλις 2MW και θεωρούνταν για εκείνη την εποχή επανάσταση στον τομέα της πυρηνικής σύντηξης. Ακολούθησε, το πρότζεκτ του Tore Supra at the CEA, Cadarache, France με δυνατότητα παραγωγής μόλις 4MW, την ώρα που μερικά χρόνια αργότερα έρχεται ο Joint European Torus (JET), in Culham, United Kingdom στα 16MW το 1983 με ικανοποιητικές αποδόσεις και λειτουργία έως και σήμερα. Προκειμένου να έχει λειτουργία το πρόγραμμα του JET για 40 χρόνια αντιλαμβάνεται κανείς ότι τόσο η παραγόμενη 16MW, όσο και η άεργος ισχύς (απώλειες) ήταν σε βέλτιστα ικανοποιητικά επίπεδα. Η επανάσταση της τεχνολογίας στον τομέα των πυρηνικών έρχεται με τον ITER του οποίου η παραγόμενη ισχύς αναμένεται να ξεπεράσει τα 500MW, συμβάλλοντας σε πολλές και σημαντικές ανακαλύψεις, πολλές από τις οποίες μελλοντικά ενδέχεται, όπως ακούγεται, να ανατρέψουν ακόμα και τομείς της φυσικής που σήμερα θεωρούνται δεδομένοι.

Ο Jet Reactor διαθέτει μαγνητικό πεδίο , το οποίο παράγεται από 32 μεγάλα πηνία με χάλκινες περιέλιξεις , οι οποίες ισαπέχουν εξίσου γύρω από το μηχάνημα. Οι εσωτερικές σπείρες του πεδίου του αντιδραστήρα χρησιμοποιούνται για την επαγωγή του ρεύματος πλάσματος , που παράγει το πολωειδές πεδίο E το οποίο βρίσκεται στο κέντρο της μηχανής. Γύρω από το εξωτερικό της μηχανής , άλλα μέσα στα όρια των ακρών του μετασχηματιστή υπάρχουν έξι πολωειδή πεδία , τα οποία εξασφαλίζουν την τοποθέτηση , διαμόρφωση και σταθεροποίηση του πλάσματος μέσω στο δοχείο. Κατά τη λειτουργία του αντιδραστήρα παράγονται μεγάλες δυνάμεις λόγω αλληλεπιδράσεων μεταξύ ρευμάτων και μαγνητικών πεδίων. Αυτές οι πραγματικά μεγάλες δυνάμεις που αναπτύσσονται , δεν περνούν έξω από τις μηχανικές δομές που περικλείουν τα κεντρικά εξαρτήματα του μηχανήματος , διαφορετικά θα υπήρχε κίνδυνος φθοράς και δυσλειτουργιών. Ο αντιδραστήρας λειτουργεί σε παλμική λειτουργία για την παραγωγή μεγάλου ρεύματος πλάσματος. Οι παλμοί μπορούν να παραχθούν με μέγιστο ρυθμό περίπου κάθε είκοσι λεπτά , και το καθένα μπορεί να διαρκέσει μέχρι και 60 δευτερόλεπτα. Το πλάσμα περικλείεται μέσα στο δοχείο κενού σχήματος ενός οβάλ ή ενός ντόνατ , με ακτίνα 2,96m , διατομή 4.2m – 2.5m (D-Shaped) . Το παρακάτω σχήμα δίνει ένα σχέδιο του Jet Reactor παρουσιάζοντας τη γενική του διάταξη.

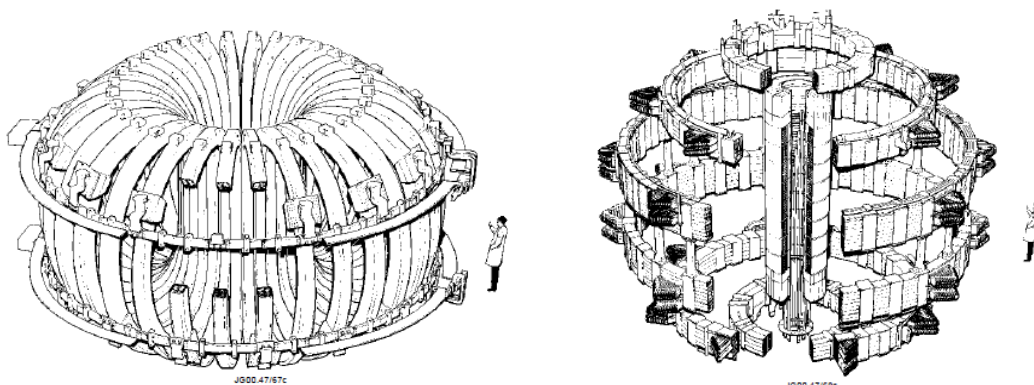


Εικόνα 18: Drawing of the Jet Tokamak Reactor

1. **Δοχείο κενού - Vacuum Vessel:** Βασικότερος σκοπός του δοχείου κενού είναι να διατηρεί κενό , στο οποίο η πίεση είναι μικρότερη από ένα εκατομμυριοστό της ατμοσφαιρικής πίεσης. Το δοχείο είναι σχεδιασμένο να θερμανθεί στους 500 βαθμούς Κελσίου , καλυμμένο με διπλό ειδικό

περίβλημα όπου επιτρέπει την θέρμανση με θερμό αέριο χωρίς την παραμικρή υποψία διαστολής ή συστολής του.

2. **Μαγνητικά πηνία - Magnetic Field Coils** : Το τοροειδές πεδίο παράγεται από 32 πηνία σχήματος D που περικλείουν το δοχείο κενού και η διάταξη αυτών των σπειρών απεικονίζεται στην εικόνα 19. Κάθε πηνίο τυλίγεται με 24 στροφές χαλκού και ζυγίζει 12 τόνους. Η ικανότητα μεταφοράς ρεύματων συνολικά όλων των τοροειδών πηνίων είναι 51MA. Το νερό είναι το κύριο ψυκτικό των πηνίων καθώς αυτά μεταφέρουν ρεύματα για αρκετές δεκάδες δευτερόλεπτα και κατά συνέπεια επιβάλλεται να ψυχθούν με κάποιο τρόπο. Ο χαλκός που χρησιμοποιείται έχει ως γνωστόν μεγάλη αντοχή , τα πηνία είναι «ντυμένα» με χαλκό , αντέχουν σε πίεση μέχρι 2000 τόνους η οποία προέρχεται από το μαγνητικό πεδίο (tensile & expansive forces) και όλη αυτή η δύναμη κατευθύνεται προς το κέντρο του τοροειδούς. Μια τρίτη δύναμη προκύπτει από την αλληλεπίδραση των ρευμάτων στα πηνία με το πολοειδές μαγνητικό πεδίο. Το ρεύμα στο τοροειδές πεδίο διασχίζει κατακόρυφα το πολοειδές πεδίο σε αντίθετες κατευθύνσεις στο άνω και κάτω μισό. Από αυτές τις κινήσεις παράγονται δυνάμεις συστροφής. Σε αντίθεση τώρα με το τοροειδές πηνίο , το πολοειδές διαθέτει οριζόντιες κυκλικές σπείρες. Τα δεύτερα , τοποθετούνται έξω από τα σπειρώματα του τοροειδούς , διότι αν τοποθετούνταν μέσα θα συνδέονταν και θα υπήρχαν προβλήματα όπως αντιλαμβάνεστε. Από τα πολοειδή πηνία ξεχωρίζει ένα κεντρικό με διάμετρο 11m υπεύθυνο για την λειτουργία του μετασχηματιστή , ενώ τα υπόλοιπα είναι εύλογα τοποθετημένα για τον έλεγχο της μορφής και της θέσης του πλάσματος. Διακρίνονται στην εικόνα 20.



Εικόνα 19-20: The toroidal & poloidal field coil system.

3. **Πηγή τροφοδοσίας – Power Supply** : Η ηλεκτρική ισχύς είναι απαραίτητη για την τροφοδοσία τόσο των τοροειδών όσο και των πολοειδών πηνίων , σχεδόν ίδια σε τάξη μεγέθους και στα δύο είδη. Ο Jet Reactor

σχεδιάστηκε έτσι ώστε να επιτρέπει ένα ρυθμό επανάληψης κυμάτων παλμών , κάθε ένα ανά 15 λεπτά. Κάθε παλμός απαιτεί συνολική ισχύ 800MW , την παραγωγή ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής μεσαίου μεγέθους. Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε τότε , αντλούσε ισχύ από το ηλεκτρικό δίκτυο , μια ισχύς που υπολογίζεται σε αρκετές εκατοντάδες μεγαβάτ MW.

4. **Διαγνωστικά – Diagnostics** : Όταν ξεκίνησε η κατασκευή του Jet Tokamak Reactor και άρχισε να παράγει πλάσμα , τα διαγνωστικά που χρειαζόμασταν ήταν αυξημένης πολυπλοκότητας από ότι ήταν στο παρελθόν. Το κύριο χαρακτηριστικό στο οποίο έπρεπε να αντέχουν ήταν η υψηλή ακτινοβολία. Τα μικρά πηνία διαγνωστικά γύρω από το πλάσμα επιτρέπουν την ανίχνευση αλλαγών στο μαγνητικό πεδίο και προσδιορίζουν το ρεύμα πλάσματος. Η ταχεία κίνηση των ηλεκτρονίων στο μαγνητικό πεδίο προκαλεί την εκπομπή της ακτινοβολίας , και ως συνέπεια η μέτρηση αυτής της εκπομπής των κυκλοτρονίων επιτρέπει τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας ηλεκτρονίων στο πλάσμα. Η πλήρης ισχύς που ακτινοβολείται μετريέται με ένα σύνολο βολόμετρων. Επίσης έχουμε την εγκατάσταση ανιχνευτών νετρονίων για τη μέτρηση του ρυθμού θερμοπυρηνικής αντίδρασης στο πλάσμα. Η θερμοκρασία των ιόντων θα μετρηθεί με βάση αυτούς τους ανιχνευτές, χρησιμοποιώντας ανάλυση των ουδέτερων σωματιδίων , που προήλθαν από την εξουδετέρωση των ιόντων πλάσματος. Το πλάσμα εκπέμπει μαλακές ακτίνες X , όπου οι εγκατεστημένοι ανιχνευτές ακτινών X τις εντοπίζουν και τις αναλύουν. Αναπόσπαστο κομμάτι των διαγνωστικών αποτελεί επιπρόσθετα η υπεριώδης ακτινοβολία (ultra-violet radiation) , η οποία αναλύεται με φασματομέτρα για να δώσει πληροφορίες σχετικές με την περιεκτικότητα του πλάσματος σε διάφορες ακαθαρσίες και όχι χρήσιμου προϊόντος. Κλείνοντας , η διάταξη Thomson αποτελεί κύριο διαγνωστικό. Μετράει τη μέση πυκνότητα του πλάσματος , αναλύοντας την αλλαγή στον αριθμό των μηκών κύματος κατά μήκος μιας δέσμης μικροκυμάτων , περνώντας διαμέσου του πλάσματος. Πληρέστερα η διάταξη των διαγνωστικών απεικονίζεται στην εικόνα 21.

καμπυλότητας των σπειρών εξισορροπεί την αντιστάθμιση της τάσης που προέρχεται από τις σπείρες. Το σχήμα των τοροειδών σπειρών καθορίζει το σχήμα του δοχείου κενού δίνοντας ένα λόγο ύψους προς πλάτος 1,6 . Ο λόγος των διαστάσεων επιλέχθηκε να είναι 2,4 , με κύριο κριτήριο για αυτό , την ελαχιστοποίηση του κόστους. Ο καθορισμός του μεγέθους του πλάσματος προκύπτει από τα πειραματικά δεδομένα για τον συντελεστή ασφαλείας $q = 3$. Λαμβάνοντας υπόψη τις γεωμετρικές αναλογίες από την κορυφή του τοροειδούς τμήματος παρατηρήσαμε ότι είναι 3T , ενώ με το υπάρχουν $q = 3$ το σφάλμα δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 0,5 T. Για τον ακριβή υπολογισμό του μεγέθους , επίσης , σημαντικό κριτήριο είναι σύμφωνα με το Νόμο του Ampere το συνολικό τοροειδές ρεύμα και η ακτίνα του πλάσματος. Για παράδειγμα , με τάση ημιαγώγιμη 0,5 T και ρεύμα 4μΑ απαιτείται μικρή ακτίνα $r = 1m$. Η κύρια ακτίνα R και το ύψος b είναι στρογγυλεμένα στους υπολογισμούς 3 και 2 αντίστοιχα δίνοντας μικρή ακτίνα 1.

Plasma major radius	2.96m
Plasma minor radius	2.10m (vertical) 1.25m (horizontal)
Flat-top pulse length	20s
Weight of the iron core	2800t
Toroidal Field Coil Power (Peak On 13s Rise)	380MW
Toroidal magnetic field (on plasma axis)	3.45T
Plasma current	3.2MA (Circular plasma) 4.8MA (D-Shape plasma)
Volt-seconds to drive plasma current	34Vs
Used additional heating power	25MW

Εικόνα 22: Jet Reactor Parameters

Στον αντίποδα ο ITER , επιτρέπει εκτεταμένη φλέξη σε επαγωγικά διεγερόμενη λειτουργία δευτερίου – τριτίου συστατικών πλάσματος με διάρκεια καύσης μεταξύ 300 βαθμών Κελσίου και 500s σε μια σειρά λειτουργικών σεναρίων. Η ισχύς που παράγεται είναι 500MW με μικρή ακτίνα 2 σε αντίθεση με 1 του Jet και μεγάλη 6.2 R σε αντίθεση με την 2,96 του Jet. Επίσης , ενσωματώνει λειτουργία σταθερής κατάστασης με τη χρήση μη επαγωγικής κίνησης ρεύματος , ενώ προάγει τον απομακρυσμένο χειρισμό για καλύτερη λειτουργικότητα. Η ροή θερμότητας και φορτίο ισχύος στην τιμή 0.5MW/m² and fluence > 0.3MWa /m² ξεπερνούν κατά πολύ τις φιλοδοξίες βελτίωσης των τιμών και αποτελεσμάτων του Jet ,

ικανοποιώντας ταυτόχρονα όλες τις απαιτήσεις και συμβάλλοντας στην μείωση του κόστους κεφαλαίου που είχε εκδωθεί αρχικά το 1998 κατά 50% στο παραγώμενο προϊόν. Πίνακας μελέτης εικόνα 23.

Total fusion power (MW)	500
Q —Fusion power/auxiliary heating power	10
Average (1 MeV) neutron wall loading (MW/m ²)	0.57
Plasma major radius (m)	6.2
Plasma minor radius (m)	2.0
Plasma current (MA)	15
Toroidal field at 6.2 m radius (T)	5.3
Plasma volume (m ³)	837
Installed auxiliary heating/current drive power (MW)	73

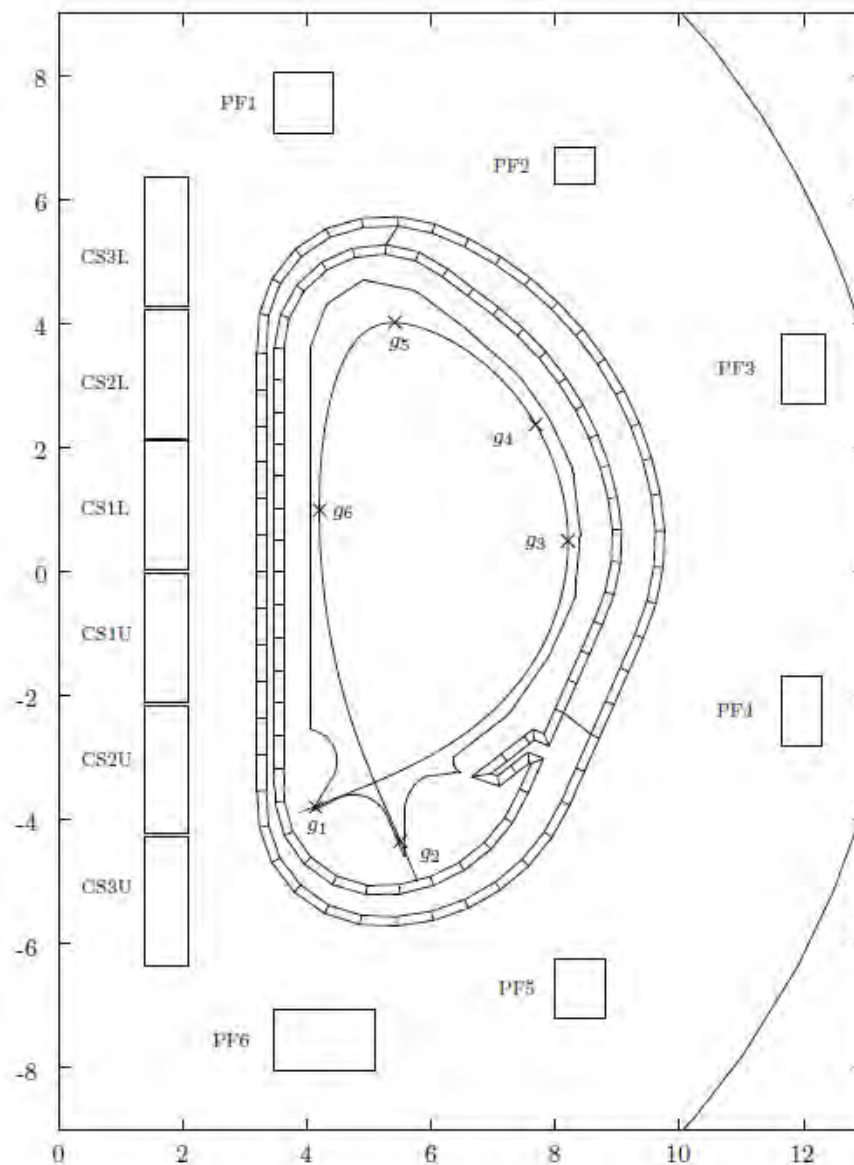
Εικόνα 23: ITER Reactor Main Parameters

3.2 Plasma Shape Control in ITER

Σε αυτό το υπο-κεφάλαιο θα δείξουμε ότι η διαμόρφωση του ITER Tokamak επιτρέπει τον σχεδιασμό ενός ελεγκτή χαμηλού σχεδιασμού με βάση το γεγονός ότι ο κάθετος έλεγχος θέσης και ο έλεγχος του ρεύματος και σχήματος πλάσματος μπορεί να εκτελεσθεί σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Αυτός ο διαχωρισμός του χρονοδιαγράμματος αξιοποιείται προκειμένου να αποκτηθεί ένα μοντέλο μειωμένου σχεδιασμού για το ρεύμα και τον έλεγχο του σχήματος μέσω μιας μοναδικής διαταραχής αποσύνθεσης όπως την αποκαλούμε. Χαρακτηριστικό της προσέγγισης μας, είναι ότι σε σχέση με άλλες διαδικασίες μείωσης (όπως η προσέγγιση του προτύπου του Hankel, ισορροπημένη περικοπή) η διαταραχή αποσύνθεσης, μας επιτρέπει να διατηρήσουμε τη φυσική έννοια της στατικής μεταβλητής κάθε φορά αναλλοίωτη. Ο σχεδιασμένος ελεγκτής ρεύματος και σχήματος είναι ένα πολυδύναμο PI controller, δηλαδή ελεγκτής αναλογικής ενσωμάτωσης, και είναι σε θέση να εγγυηθεί μια προδιαγεγραμμένη συμπεριφορά εισόδου – εξόδου στο σύστημα κλειστού βρόγχου.

Μονοδιάστατη διάσπαση του Tokamak του ITER

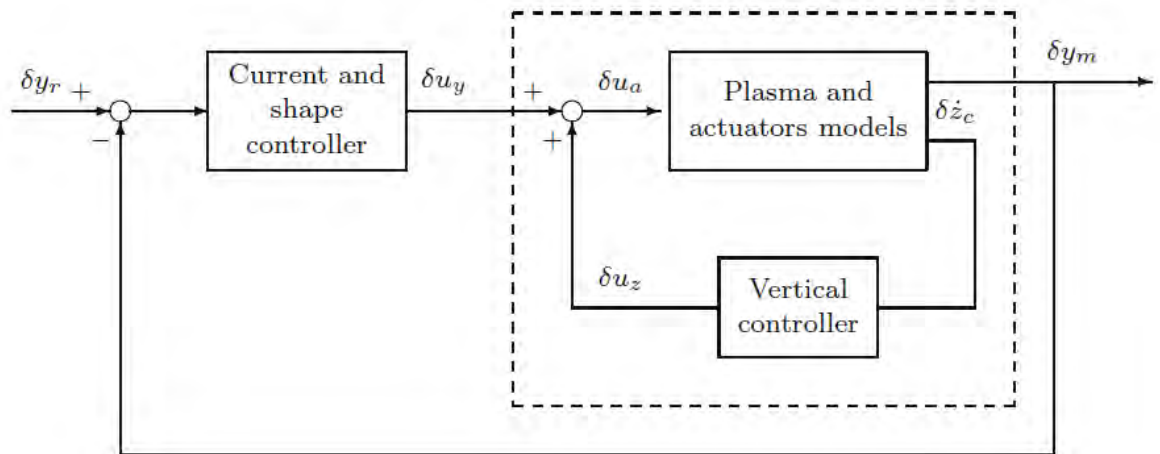
Αυτό το μοντέλο παρουσιάζει ως εισόδους τις δu_y τάσεις που εφαρμόζονται στα ενεργά πηνία, δηλαδή τα πηνία πολωειδούς πεδίου PF και του κεντρικού σωληνοειδούς CS που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 24: ITER-Feat cross-section, with the controlled gaps and poloidal field (PF) and central solenoid (CS) coils

Αξίζει να σημειωθεί ότι ορισμένα από αυτά τα πηνία και συγκεκριμένα τα PF2 , PF3 , PF4 , PF5 χρησιμοποιούνται πέρα από άλλους ελεγκτές και από τον ελεγκτή κατακόρυφης σταθεροποίησης , που μας αφορά στην μελέτη της συγκεκριμένης μας περίπτωσης αναφορικά με το σχήμα το πλάσματος στον ITER. Ο κατακόρυφος έλεγχος σταθεροποίησης εκτελείται χρησιμοποιώντας ειδικά κυκλώματα , τα οποία χρησιμοποιούν γρήγορους ενισχυτές. Επίσης , πρώτου δείξουμε το σχήμα ανατροφοδότησης , ας πούμε , ότι οι έξοδοι δy_m , εφόσον δείξαμε για τις εισόδους , προκύπτουν από τα έξι κενά που φαίνονται στην παραπάνω εικόνα 24 , το ρεύμα πλάσματος καθώς και τα ενεργά ρεύματα στα πηνία PF , CS.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω είμαστε σε θέση να δώσουμε το σχήμα ανατροφοδότησης του κυκλώματος για τον ITER.



Εικόνα 25: Feedback scheme for the ITER controller

Στην πραγματικότητα , τα λειτουργικά tokamaks όπως και στον ITER , ο βρόγχος ανάδρασης στις ενεργές αποκλίσεις ρευμάτων δεν χρησιμοποιείται ποτέ. Αντίθετα , αυτό που χρησιμοποιείται συχνά είναι ένας βρόγχος ανατροφοδότησης πάνω στα συνολικά ρεύματα και όχι στις αποκλίσεις ρευμάτων. Σε αυτό το σημείο είμαστε έτοιμοι να παρουσιάσουμε κάποιες εξισώσεις ενός μαθηματικού μοντέλου που πρόκειται να χρησιμοποιήσουμε για το σχεδιασμό του ελεγκτή ρεύματος και σχήματος. Στη συνέχεια , θα παραλείψουμε το σύμβολο δ , το οποίο , υπενθυμίζουμε , υποδηλώνει τις αποκλίσεις των μεταβλητών σε σχέση με τις ονομαστικές τιμές. Πρώτα από όλα ας εκμεταλλευτούμε την εξίσωση που χωρίζει τις εξωτερικές τάσεις u , που εφαρμόζονται σε πηνία PF σε 2 φορείς αθροιστικά , ένα u_z για τον έλεγχο της κατακόρυφης θέσης και ένα άλλο u_y για τον έλεγχο του σχήματος ρεύματος.

$$u_a = u_z + u_y \quad (1)$$

Στη συνέχεια θα δανειστούμε δύο εξισώσεις για την κάθετη σταθεροποίηση στον ITER, το οποίο δεν αποτελεί αντικείμενο μελέτης μας, ωστόσο χρειαζόμαστε προκειμένου να αποτυπώσουμε αποτέλεσμα στο δικό μας μοντέλο αλληλεπίδρασης.

$$\delta z_c = (c_{az}^T c_{ez}^T) \begin{pmatrix} \delta x_a \\ \delta x_e \end{pmatrix} \quad (2)$$

,όπου το δz_c είναι η κατακόρυφη θέση, ενώ η εξίσωση του κατακόρυφου ελεγκτή δίνεται από την $u_z = -k_D \gamma z_c = k_z z_c \quad (3)$.

Δεδομένα, αυτές οι 3 εξισώσεις προκύπτουν και τις κάνουμε χρήση στη δική μας διαμόρφωση. Έχουν αποτελέσει αντικείμενο εξαγωγής μελέτης χρόνων και διατυπώνω την ακόλουθη παρατήρηση προκειμένου να κάνω το τοπίο ξεκάθαρο, αποφεύγοντας πιθανές ασάφειες, που ίσως διατυπωθούν αναφορικά με την εξαγωγή τους.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 1, 2, 3 μεταξύ τους προκύπτει μία μεγαλύτερη εξίσωση, κρατήστε την.

$$u_a = u_z + u_y = -k_D \gamma z_c + u_y = -k_D \gamma c_{1z}^T x_a - k_D c_{2z}^T x_e + u_y \quad (4)$$

Ας θυμηθούμε σε αυτό το σημείο, με την εμπλοκή και της εξίσωσης 2, τι έχουμε αναφέρει σχετικά με τον σχεδιασμό του ελεγκτή νωρίτερα. Το ρεύμα πλάσματος I_p , μπορεί να εξαλειφθεί από τις μεταβλητές κατάστασης και για τον σχεδιασμό του ελεγκτή, μπορούμε να παραμελήσουμε τις διαταραχές. Με αυτό τον τρόπο, για το σχεδιασμό του κάθετου ελεγκτή σταθεροποίησης, μειώνονται γραμμικές εξισώσεις, βελτιστοποιούνται και προκύπτει η εξίσωση 2 που αναφέραμε νωρίτερα. Η αρχική εξίσωση λοιπόν ήταν γραμμικά αυτή:

$$L_a x_a + L_{ae} x_e + R_a x_a = u_y \quad (5), \text{ όπου}$$

$$L_a = L_{ae} + k_D \gamma c_{az}^T$$

$$L_{ae} = L_{ae} + k_D \gamma c_{ez}^T$$

,όπου η αρχική εξίσωση 5 σχετικά με τα παθητικά κυκλώματα παραμένει αμετάβλητη. Επιπλέον, πρέπει να προσθέσουμε μια εξίσωση για να περιγράψουμε τις παραλλαγές των γεωμετρικών περιγραφών που επιλέγονται σε αυτή την

περίπτωση , δηλαδή τα κενά που φαίνονται στο σχήμα – εικόνα 24. Επομένως , το σύστημα που πρέπει να ληφθεί υπόψη για τον έλεγχο του ρεύματος και του σχήματος είναι και που θα βασιστούμε στην μελέτη μας εμπλέκει τις τελικές εξισώσεις 6A 6B 6C :

$$L_a x_a + L_{ae} x_e + R_a x_a = u_y \quad (6A)$$

$$L_{ea} x_a + L_e x_e + R_e x_e = 0 \quad (6B)$$

$$y = C_a x_1 + C_e x_2 \quad (6C)$$

Σε αυτό το σημείο , ας προσπαθήσουμε να δούμε τις 3 εξισώσεις ,υπό μια σκοπιά βελτιστοποίησης, προκειμένου να έχουμε ένα σύστημα μειωμένης τάξης , θα δοκιμάσουμε να υιοθετήσουμε μια προσέγγιση διαταραχής.

Πρώτα από όλα , ας ξεκινήσουμε με την ακόλουθη αλλαγή μεταβλητών:

$$\psi_1 = L_a x_a + L_{ae} x_e$$

$$\psi_2 = L_{ae} x_a + L_e x_e$$

Επίσης , οι μεταβλητές , x_a και x_e δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$x_a = E_{11} \psi_1 + E_{12} \psi_2$$

$$x_e = E_{21} \psi_1 + E_{22} \psi_2$$

Με ,

$$E_{11} = \Delta_1$$

$$E_{12} = -\Delta_1 L_{ae} L_e^{-1}$$

$$E_{21} = -L_e^{-1} L_{ea} \Delta_1$$

$$E_{22} = L_e^{-1} + L_e^{-1} L_{ea} \Delta_1 L_{ae} L_e^{-1}$$

Όπου ,

$$\Delta_1 = (L_a - L_{ae} L_e^{-1} L_{ea})^{-1}$$

Συνδυάζοντας , λοιπόν τα παραπάνω , οι εξισώσεις , οι βασικές 6A 6B 6C της μελέτης μας , γίνονται με αντικαταστάσεις:

$$\begin{aligned}\psi_1 + R_a E_{11} \psi_1 + R_a E_{12} \psi_2 &= u_y \\ \psi_2 + R_e E_{21} \psi_1 + R_e E_{22} \psi_2 &= 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\psi_1 + R_a \Delta_1 \psi_1 - R_a \Delta_1 L_{ae} L_e^{-1} \psi_2 &= u_y \\ \psi_2 - R_e L_e^{-1} L_{ea} \Delta_1 \psi_1 + R_e L_e^{-1} (I + L_{ea} \Delta_1 L_{ae} L_e^{-1}) \psi_2 &= 0\end{aligned}$$

Το βασικό σημείο αυτής της προσέγγισης είναι ότι για το tokamak ITER που εξετάζουμε, οι σταθερές χρόνου των παθητικών δομών είναι μικρές σε σχέση με τις άλλες σταθερές χρόνου του συστήματος. Ως εκ τούτου μπορούμε να γράψουμε :

$$R_e L_e^{-1} = \frac{1}{\varepsilon} \Gamma, \quad \text{όπου το } \varepsilon \text{ είναι ένας μικρός αριθμός. Στην περίπτωση μας έχουμε } \varepsilon = 2 \times 10^{-3}.$$

Επομένως, άς βάλουμε και το Γ στην μελέτη των εξισώσεων μας. Έχουμε με αντικατάσταση :

$$\begin{aligned}\psi_1 &= -R_a \Delta_1 \psi_1 + R_a \Delta_1 L_{ae} L_e^{-1} \psi_2 + u_y \\ \varepsilon \psi_2 &= \Gamma L_{ea} \Delta_1 \psi_1 - \Gamma (I + L_{ea} \Delta_1 L_{ae} L_e^{-1}) \psi_2\end{aligned}$$

, που είναι διατυπωμένο στην τυπική μορφή μοναδικής διαταραχής. Επίσης, η μορφή αυτή μας επιτάσσει τη χρήση εξισώσεων με 2 μορφές μία αργή και μια γρήγορη μορφή. Εμείς στην αναπαράσταση των παρακάτω εξισώσεων θα διατυπώνουμε την αργή με S από το slow, και τη γρήγορη με F από το fast. Θεωρούμε ακόμη το $\varepsilon = 0$.

$$\begin{aligned}\psi_{1s} &= -R_a \Delta_1 \psi_{1s} + R_a \Delta_1 L_{ae} L_e^{-1} \psi_{2s} + u_y \\ 0 &= \Gamma L_{ea} \Delta_1 \psi_{1s} - \Gamma (I + L_{ea} \Delta_1 L_{ae} L_e^{-1}) \psi_{2s}\end{aligned}$$

Λύνοντας τις εξισώσεις τώρα ως προς ψ_{1s} , ψ_{2s} έχουμε :

$$\begin{aligned}\psi_{2s} &= (I + L_{ea} \Delta_1 L_{ae} L_e^{-1})^{-1} L_{ea} \Delta_1 \psi_{1s} \\ \psi_{1s} &= -R_a L_a^{-1} \psi_1 + u_y\end{aligned}$$

Αφού τελειώσαμε με την παραγωγή του αργού συστήματος, άς ρίξουμε μια ματιά στην παραγωγή του γρήγορου συστήματος. Κατά τη διάρκεια των μεταβολών στο γρήγορο σύστημα, η αργή μεταβλητή παραμένει σταθερή.

$$\psi_{2F} = \frac{1}{\varepsilon} \Gamma (L_{ea} \Delta_1 \psi_{1s} - (I + L_{ea} \Delta_1 L_{ae} L_e^{-1}) \psi_{2s})$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \psi_{2F} = -\Gamma (I + L_{ea} \Delta_1 L_{ae} L_e^{-1}) , \text{ όπου } \tau = t/\varepsilon.$$

Ομοίως , μπορεί να αποδειχθεί ότι οι έξοδοι μπορεί να αποσυντεθούν :

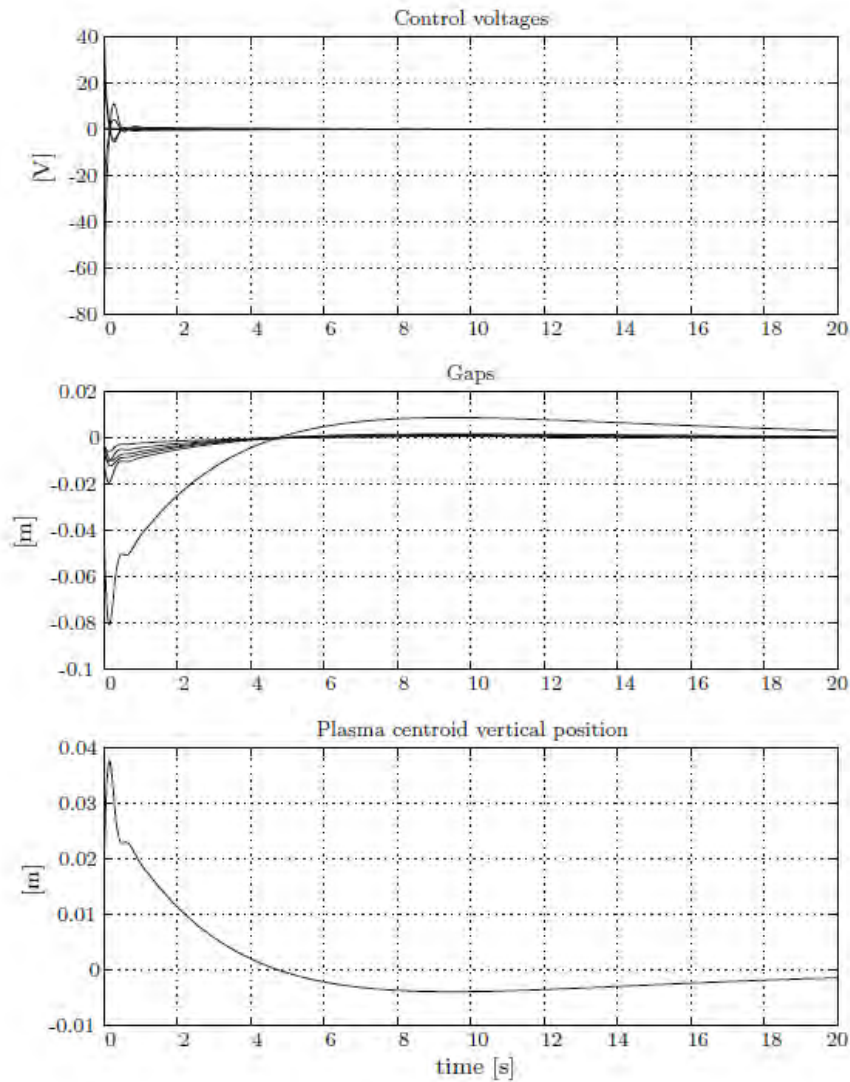
$$y(t) = C_a \psi_{1s}(t) + C_e \psi_{2F}(t/\varepsilon) + O(\varepsilon) = y_s(t) + y_F(t/\varepsilon) + O(\varepsilon)$$

$$C_a = C_a L_a^{-1}$$

$$C_e = C_a E_{12} + C_2 E_{22}$$

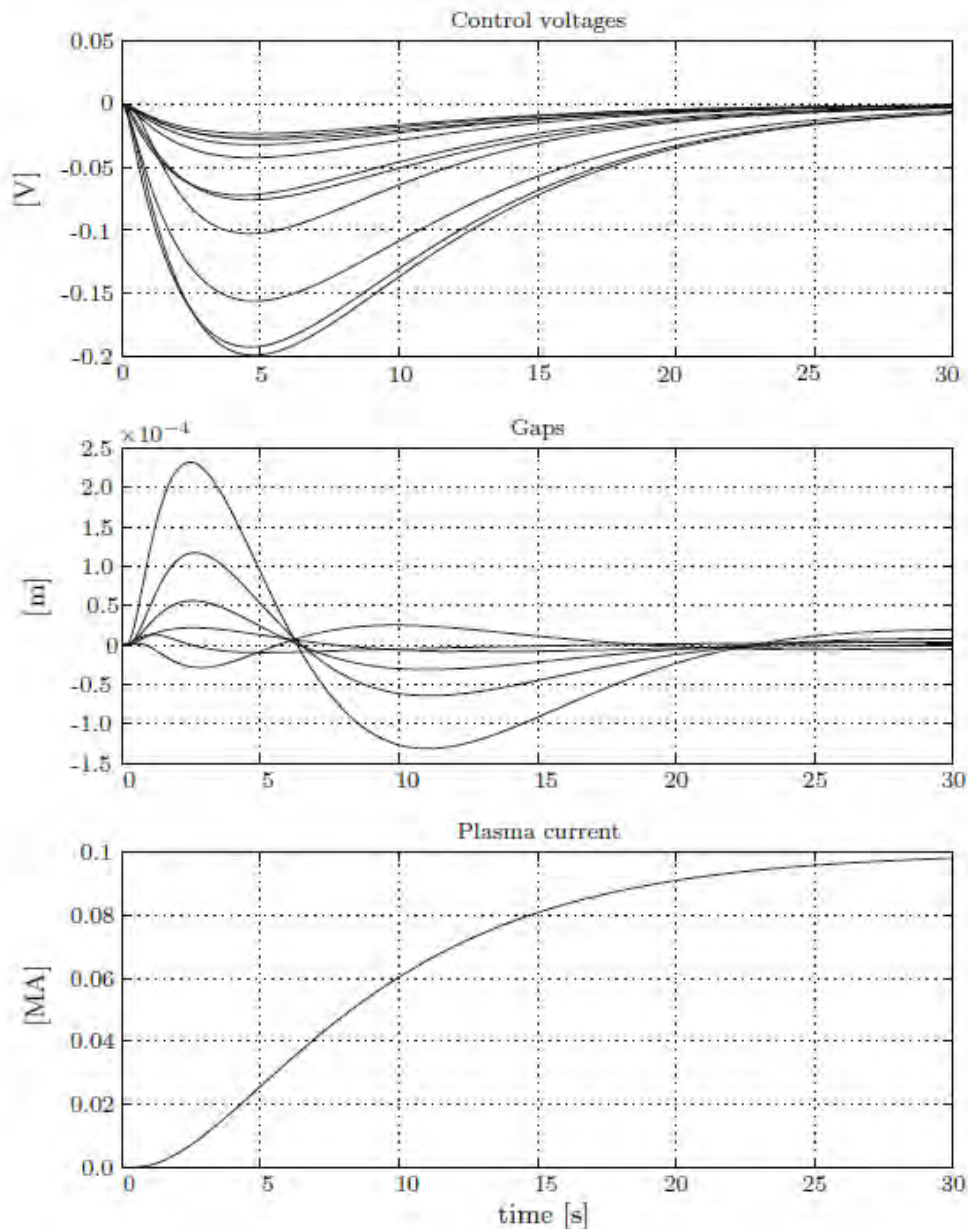
Simulations - Προσωμοιώσεις

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζουμε κάποια αποτελέσματα προσομοίωσης χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο διαμόρφωσης ισορροπίας tokamak πλάσματος ITER. Η θέση πλάσματος, ο ελεγκτής ρεύματος και του σχήματος σχεδιάστηκαν όπως διατυπώθηκε με αρκετή συντομία παραπάνω. Πραγματοποιήσαμε δύο διαφορετικές προσομοιώσεις: ένα συμβάν κατακόρυφης μετατόπισης (VDE), που ορίζεται ως μια αρχική κατακόρυφη μετατόπιση των 2 cm του πλάσματος του κεντρικού πλάτους κατά μήκος του ασταθούς ιδιοσυστήματος. Επίσης , την παρακολούθηση αναφοράς 10 cm στα ελεγχόμενα κενά (controlled gaps) και 100 kA στο ρεύμα πλάσματος (plasma current). Στη συνέχεια, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα προσομοίωσης του VDE Institute , για την παρακολούθηση μίας αναφοράς βημάτων 100 kA στο ρεύμα πλάσματος και για την ταυτόχρονη παρακολούθηση ενός 10 cm step αναφοράς στο κενό # 3 και στο κενό #4. Επιλέξαμε αυτά τα δύο κενά επειδή παρουσίαζαν τις χειρότερες συμπεριφορές όσον αφορά τη σύζευξη με τα άλλα κενά. Επιπλέον, ο έλεγχος του διακένου # 3 είναι σημαντικός για τη σύζευξη σύνθετης αντίστασης με την κεραία θέρμανσης συχνότητας.



Εικόνα 26: Control voltages, gaps and plasma vertical position for the VDE

Η εικόνα 26 , μας δείχνει τις τάσεις ελέγχου , τα κενά και τη κεντροειδής θέση του πλάσματος συναρτήση του χρόνου για το VDE. Τα αποτελέσματα κρίνονται ικανοποιητικά με μικρές αναμενόμενες αποκλίσεις. Σε ότι αφορά τη θέση του κεντροειδούς αυτή σταθεροποιείται με την πάροδο του χρόνου μετά από μια αρχική απότομη μετατόπιση λιγότερη χρονικά των 2 δευτερολέπτων , πράγμα το οποίο σημαίνει ότι είναι εφικτό , είναι λογικό και δεν είναι σε θέση να δημιουργήσει κάποια ανωμαλία ή πρόβλημα. Η τάση , και κυρίως το μέτρο τάσης είναι ελεγχόμενο κατά τη λειτουργία , δεν επηρεάζεται από εξωγενείς παράγοντες. Ενώ , κλείνοντας αναφορικά με τα κενά , έχουμε επισημάνει ήδη μια ανωμαλία λόγω της σύζευξης με κάποιο άλλο κενό εξαιτίας της αλληλεπίδρασης τους για τουλάχιστον μία φορά.

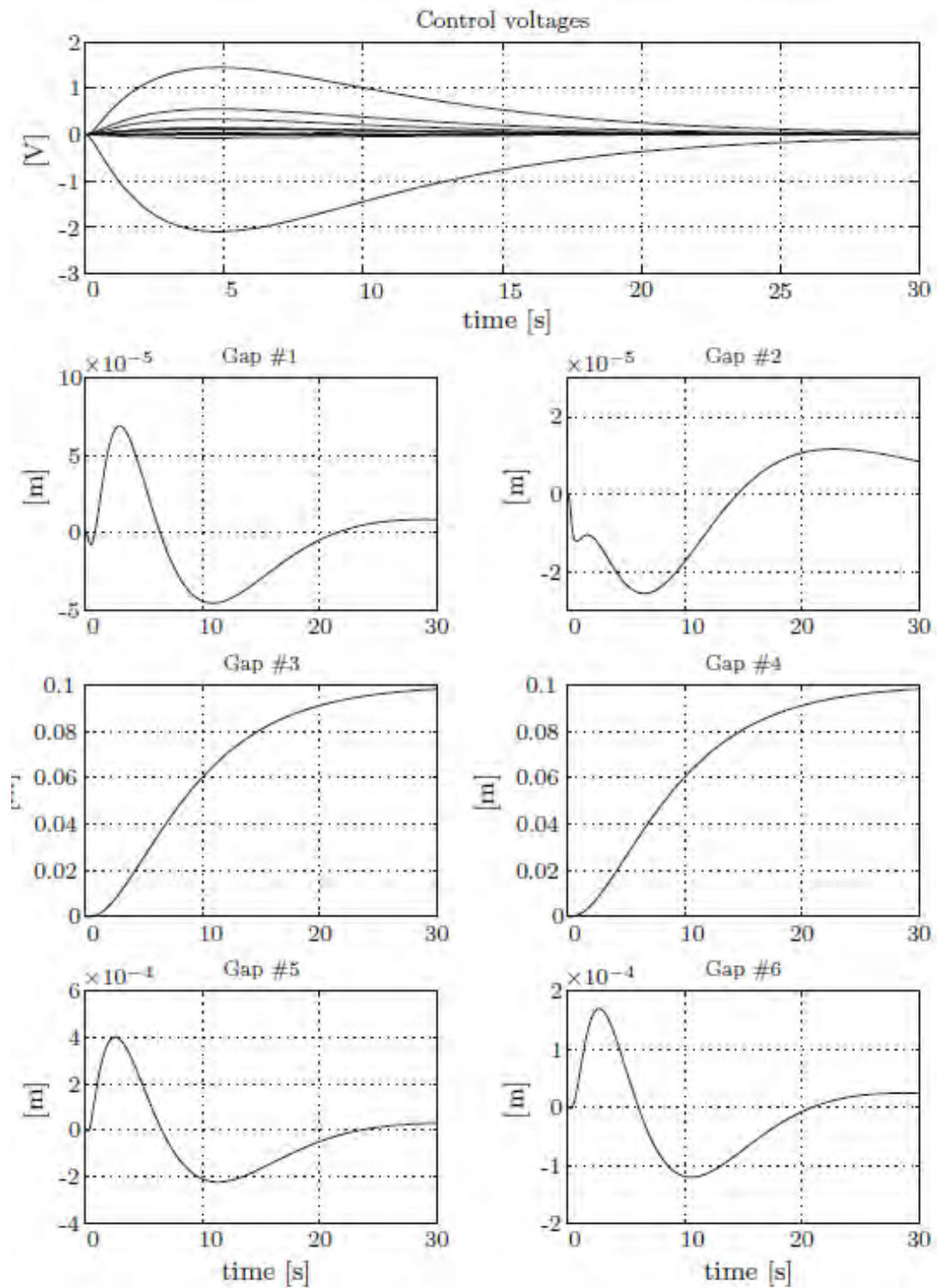


Εικόνα 27 : Control voltages, gaps and plasma current while tracking a 100kA reference step in the plasma current

Στο παραπάνω σχήμα , παρουσιάζονται τα αποτελέσματα παρακολούθησης του ρεύματος πλάσματος , των κενών καθώς και των τάσεων συναρτήση του χρόνου. Αντιλαμβάνομαι ότι το ρεύμα πλάσματος παρουσιάζει την επιθυμητή χρονική συμπεριφορά που επιβάλλει το σύστημα μειωμένης τάξης στο οποίο δουλέψαμε σύμφωνα με την εξίσωση 6.

Τα κενά παραμένουν πολύ κοντά στο 0 , όπως είναι επιθυμητό από την μελέτη μας χωρίς ανωμαλίες και χωρίς πολλές συζεύξεις , με την πάροδο των 20-30 sec. Είναι λογική πάντα η αστάθεια στην αρχή , όπως ήδη έχουμε αναφέρει , πάνω σε αυτό τοκομμάτι.

Τέλος , η τάση δεν παρουσιάζει αυξομειώσεις είναι σταθερή.



Εικόνα 28: Control voltages and gaps while tracking 10 cm step references on gap #3 and gap #4

Στην εικόνα 28 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα προσωμοίωσης για τα κενά (gap tracking). Όλα τα υπόλοιπα κενά εκτός το #3 #4 πρακτικά είναι μηδενικά . Εδώ

φαίνεται εντονότερα το πρόβλημα του κενού #3 #4 αναφορικά με τη σύζευξη και επικάλυψη τους, καθώς συγκριτικά με το χρόνου ακολουθούν αύξων πορείες ενώ όλα τα άλλα παρατηρώ πώς φθίνουν. Η τάση παρουσιάζει ως συνήθως σταθεροποίηση μετά την πάροδο των 20 δευτερολέπτων. Σε όλες τις περιπτώσεις, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαιώνουν την εγκυρότητα της υπόθεσης μας να διαιρούμε το σύστημα σε μια επιβράδυνση και ένα γρήγορο μέρος (slow – fast) όπως δείξαμε και με τις εξισώσεις και να σχεδιάσουμε τον ελεγκτή ρεύματος και σχήματος μόνο με βάση το αργό τμήμα , το οποίο μας αφορά και παρουσιάζει μεγαλύτερη εγγυρότητα σε σχέση με την μελέτη των 2 ή μόνο του γρήγορου τμήματος.

3.3 Plasma Shape Control at JET

Ο σχεδιασμός του ελεγκτή που θα περιγραφεί σε αυτό το κεφάλαιο έχει πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο ορισμένων έργων που αποσκοπούν στην εκτίμηση της δυνατότητας ελέγχου των υπερβολικά επιμήκων πλασμάτων στο JET με τα υπάρχοντα ενεργά κυκλώματα και υλικά ελέγχου.

Ένα από τα βήματα που απαιτούνται για την επίτευξη αυτού του στόχου ήταν ο επανασχεδιασμός του ελεγκτή σχήματος Joint European Torus (JET), δεδομένου ότι ο προηγούμενος ελεγκτής δεν εγγυάται ικανοποιητικές επιδόσεις όσον αφορά τον ακριβή έλεγχο του σχήματος.

Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει τα χαρακτηριστικά του νέου ελεγκτή JET, ο οποίος ονομάζεται ελεγκτής σχήματος eXtreme Shape Controller (XSC). Αυτός ο νέος ελεγκτής είναι το πρώτο παράδειγμα ενός ελεγκτή tokamak πολλαπλών μεταβλητών που επιτρέπει τον έλεγχο με μεγάλη ακρίβεια του ολικού ορίου του πλάσματος, που καθορίζεται από ορισμένους αριθμούς κενών. Το πρόβλημα διατυπώνεται ως πρόβλημα ρύθμισης της παραγωγής , στην οποία ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι μικρότερος από τον αριθμό των ανεξάρτητων εξόδων που πρέπει να ρυθμιστούν. Σε αυτή την περίπτωση δεν είναι δυνατόν να εγγυηθούμε ότι η διαφορά μεταξύ της αναφοράς και της ελεγχόμενης εξόδου εγκατάστασης (σφάλμα παρακολούθησης) είναι μηδενική σε σταθερή κατάσταση.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, χρησιμοποιούμε ουσιαστικά αποσύνθεση μοναδιαίας τιμής για να απομονώσουμε το τμήμα της παραγωγής των κενών που μπορεί να ρυθμιστεί καλύτερα σε σταθερή κατάσταση. Επιπλέον, η αποσύνθεση της μοναδικής τιμής μας δίνει μια καλύτερη εικόνα για την προσπάθεια ελέγχου σταθερής κατάστασης: επειδή μερικές από τις μοναδικές τιμές του στατικού κέρδους των κενών είναι μικρές, περικόπτουμε αυτές τις μοναδικές τιμές εισάγοντας ένα αντιστάθμισμα μεταξύ του σφάλματος παρακολούθησης και της προσπάθειας ελέγχου.

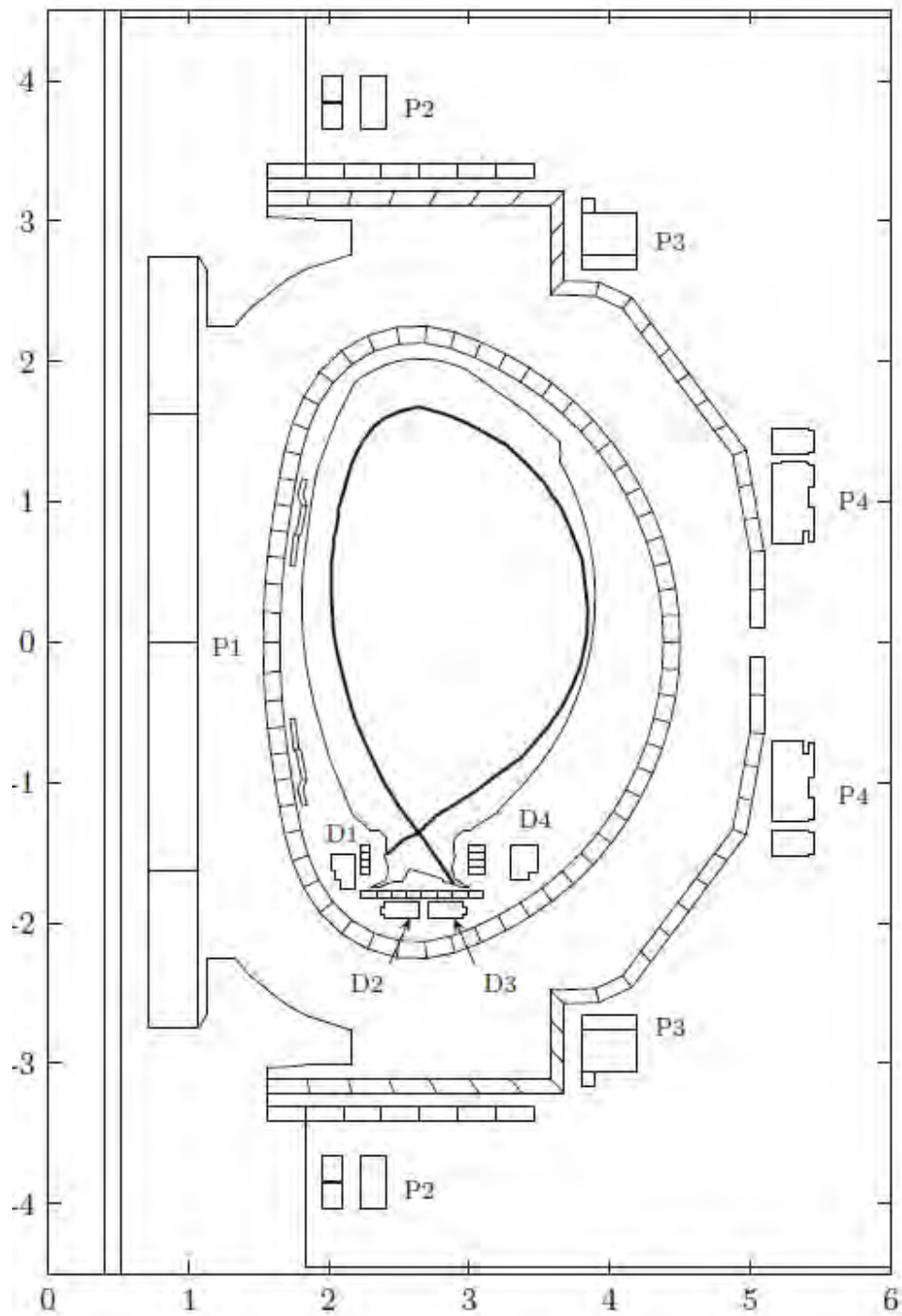
Στη συνέχεια, το XSC έχει επεκταθεί με ένα άλλο σύστημα που ονομάζεται σύστημα CLA (Current Limit Avoidance). Κάθε φορά που τα ρεύματα των ημιαγωγών

πλησιάζουν τα όριά τους, το CLA τροποποιεί τις αναφορές σχήματος έτσι ώστε να αποφεύγεται οποιοσδήποτε τρέχων κορεσμός. Τόσο το XSC όσο και το CLA έχουν επικυρωθεί εκτενώς από τις αναφορές των μελετών στο JET. Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Απαιτήσεις Ελέγχου και Απλοποιημένη Μοντελοποίηση Πλάσματος στον JET Reactor

Το JET είναι το μεγαλύτερο πείραμα σύντηξης στον κόσμο μέχρι σήμερα. Σχεδιάστηκε κατά τη δεκαετία του 1970 και άρχισε να λειτουργεί το 1983. Μια λεπτομερής περιγραφή του JET και των αποτελεσμάτων για τα πρώτα 20 χρόνια της ερευνητικής δραστηριότητας μπορεί να βρεθεί σε προηγούμενη ενότητα , όπου έχουμε κάνει εκτενέστερες αναφορές.

Στο tokamak JET (Εικόνα 29) υπάρχουν οκτώ ημιαγώγιμα πηνία πεδίου διαθέσιμα στο σύστημα ελέγχου της μορφής πλάσματος. Αυτά τα πηνία σημειώνονται ως P1, ..., P4 και D1, ..., D4. Οι πηνία P συνδέονται για να σχηματίσουν πέντε κυκλώματα. Τα ρεύματα που ρέουν σε αυτά τα κυκλώματα είναι που υποδεικνύονται από τα IP1E, IPFX, ISHA, IP4T, IIMB, ενώ τα ρεύματα που ρέουν στα D-πηνία υποδεικνύονται από IDi, με $i = 1, \dots, 4$.



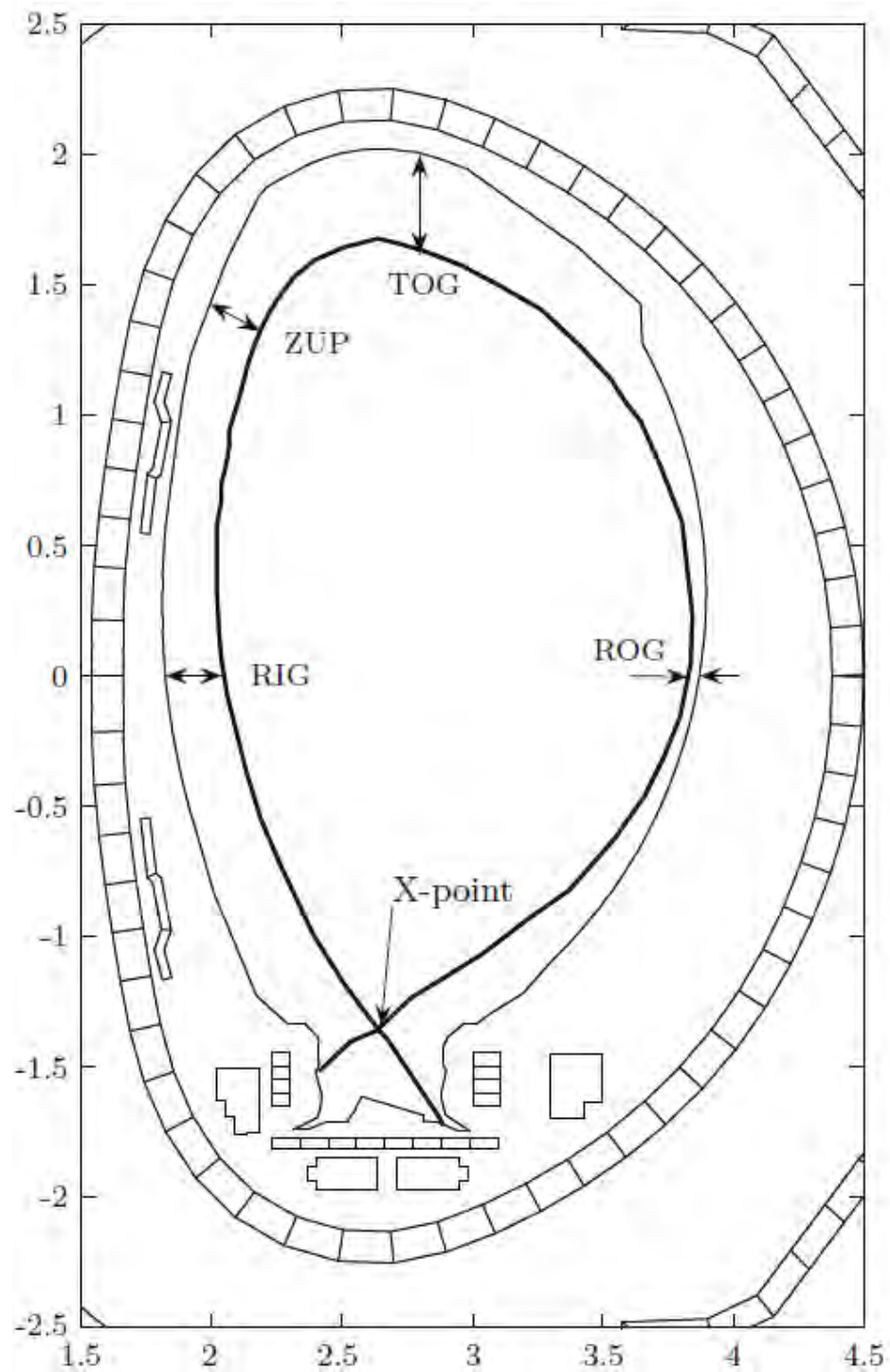
Εικόνα 29 : The JET cross-section. The plasma boundary is shown as a solid line. The poloidal coils (P1–P4 and D1–D4) and the toroidal coils, which surround the plasma ring, produce the necessary confinement magnetic field.

Ως εκ τούτου διαθέτουμε εννέα κυκλώματα στο σύστημα ελέγχου πλάσματος. Ένα από αυτά τα κυκλώματα, P1E, χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του ρεύματος πλάσματος, ενώ τα άλλα οκτώ κυκλώματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο του πλάσματος. Ο ελεγκτής που θέλουμε να σχεδιάσουμε θα πρέπει να είναι σε θέση να ελέγχει το σχήμα του πλάσματος. Ένα πρόβλημα σχετικά με τον έλεγχο της μορφής πλάσματος είναι η επιλογή ελεγχόμενων μεταβλητών. Σε αυτή την περίπτωση το σχήμα πλάσματος έχει χαρακτηριστεί από έναν πεπερασμένο αριθμό παραμέτρων που προσδιορίζονται με βάση τις διαθέσιμες μαγνητικές μετρήσεις.

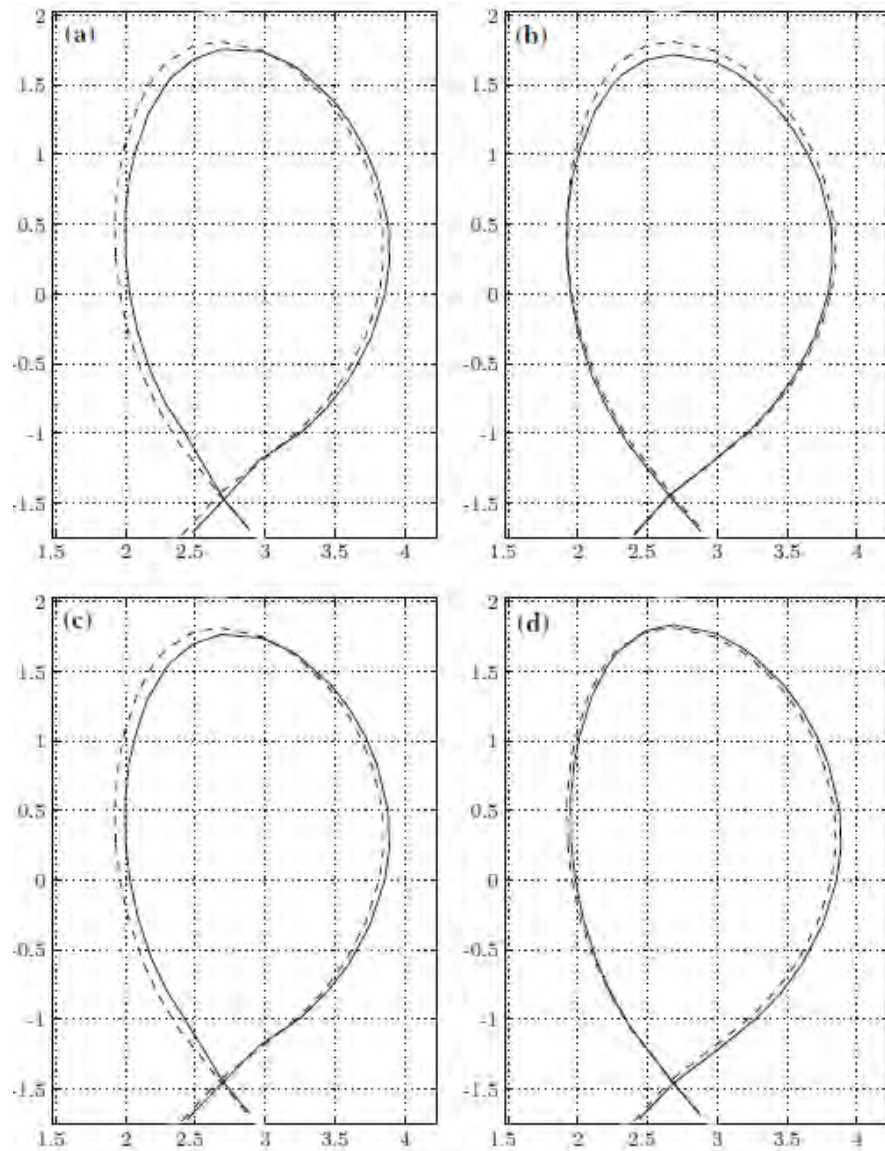
Πιο συγκεκριμένα (Εικόνα 30), οι γεωμετρικές παράμετροι που ελέγχονται από το XSC είναι ένα σύνολο 28 κενών γύρω από το δοχείο, η ακτινική και κατακόρυφη θέση του σημείου X και τέλος δύο παράμετροι που περιγράφουν τις θέσεις των σημείων σύζευξης. Τα σημεία σύζευξης είναι τα σημεία επαφής με τα κεραμίδια στη ζώνη εκτροπής (στο κάτω μέρος της εικόνας 30). Δεδομένου ότι τα καυσάερια πλάσματος μεταφέρονται στον εκτροπέα, τα κεραμίδια είναι ικανά να χειρίζονται ροή υψηλής ισχύος (προς το παρόν σύνθετα από ίνες άνθρακα). Τα σημεία σύζευξης-επαφής με αυτά τα κεραμίδια πρέπει να ελέγχονται προσεκτικά.

Συνοψίζοντας, το σύστημα που θέλουμε να ελέγξουμε χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι ο αριθμός των ελεγχόμενων εξόδων, 32, είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό των εισροών ελέγχου, οκτώ .

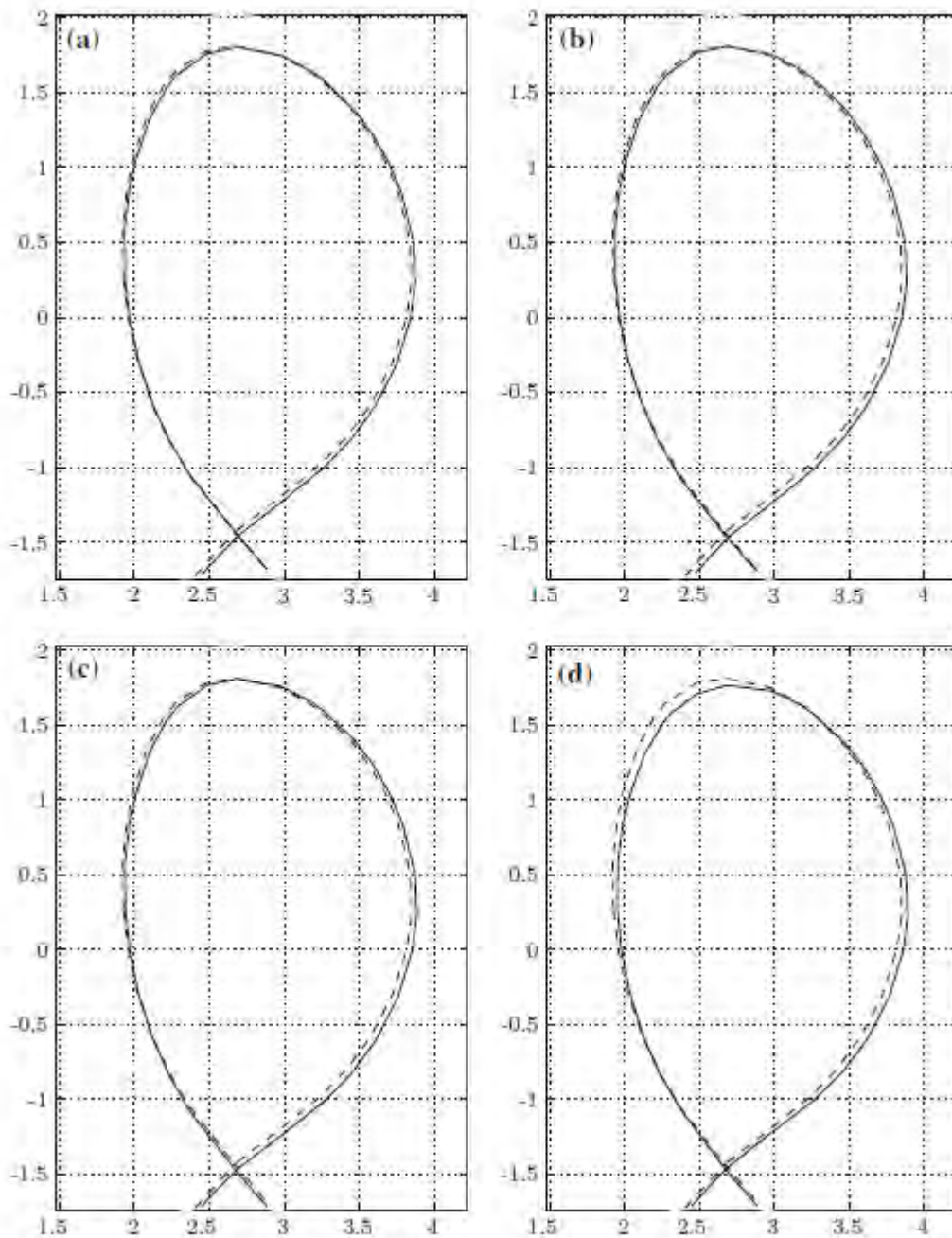
Στην πραγματικότητα, στο JET, παρά τη διαθεσιμότητα οκτώ ξεχωριστά τροφοδοτούμενων πολοειδών κυκλωμάτων διαθέσιμων για τον έλεγχο της μορφής πλάσματος, στην πραγματικότητα υπάρχουν μόνο πέντε ή έξι (ανάλογα με τη μαγνητική διαμόρφωση του συγκεκριμένου πλάσματος που εξετάζεται) ανεξάρτητους βαθμού διαθεσιμότητας (εικόνες 31 και 32).



Εικόνα 30 : Some JET gaps. The figure shows some of the gaps defined for the JET control system: RIG is the Radial Inner Gap, TOG is the Top Gap, and ROG is the Radial Outer Gap. A gap is the distance between the plasma surface and the first wall, measured along a given line; this definition simplifies the calculations needed by the plasma shape identification code



Εικόνα 31 : Plasma shape before (dashed) and after (solid) a current variation in one of the JET poloidal field circuits for IP4T , II MB, IPFX and ISH A. It is evident that current variations in different coils can cause similar variations of the shape



Εικόνα 32 : Plasma shape before (dashed) and after (solid) a current variation in one of the JET poloidal field circuits for ID1, ID2, ID3 and ID4. It is evident that current variations in different coils can cause similar variations of the shape

Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο LTI για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση της απόδοσης του ελεγκτή μέσω προσομοιώσεων, πριν από την εφαρμογή στο εργοστάσιο. Το μοντέλο περιγράφει το σταθερό μέρος της εγκατάστασης: το ασταθές είναι, ο τρόπος λειτουργίας, ο οποίος σταθεροποιείται

μέσω ενός ξεχωριστού αποκλειστικού βρόχου. Αυτό το σταθεροποιημένο μοντέλο μπορεί να γραφτεί στην τυπική μορφή των εξισώσεων :

$$\frac{d}{dt}i = Ai + Bu$$

$$y = Ci$$

, όπου i είναι τα ρεύματα στα εννέα πηνία PF και στο πλάσμα, u είναι οι τάσεις που εφαρμόζονται στα πηνία PF και y είναι οι 32 ελεγχόμενες παράμετροι σχήματος. Το ρεύμα πλάσματος ελέγχεται χρησιμοποιώντας έναν αποκλειστικό βρόχο, μέσω ενός αναλογικού ελεγκτή ο οποίος υπολογίζει την τάση που εφαρμόζεται στο κύκλωμα P1E. Τα άλλα οκτώ κυκλώματα χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του πλάσματος.

Ο ελεγκτής χωρίζεται σε δύο μέρη: ο εσωτερικός βρόχος (ελεγκτής ρεύματος) είναι αφιερωμένος στον έλεγχο των οκτώ ρευμάτων πηνίων PF, ο εξωτερικός βρόχος (ελεγκτής σχήματος) υπολογίζει το ρεύμα PF που απαιτείται για την επίτευξη και τη διατήρηση του συγκεκριμένου σχήματος.

Αυτή η δομή ελεγκτή οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχουν κάποιες φάσεις εκφόρτισης, συνήθως στις πρώτες στιγμές, όταν το σύστημα ελέγχου απαιτείται εξ ολοκλήρου για την παρακολούθηση συγκεκριμένων κυματομορφών ρεύματος, αντί να εγγυηθεί ένα συγκεκριμένο σχήμα, που θέλουμε.

Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο εξωτερικός βρόχος είναι απλά αποσυνδεδεμένος και οι τρέχουσες αναφορές πηγαίνουν απευθείας στον τρέχοντα ελεγκτή. Επομένως, αυτός ο διαχωρισμός σε δύο βρόχους μπορεί να θεωρηθεί ως απαίτηση για τον σχεδιασμό του ελεγκτή, και όχι ως επιλογή σχεδιασμού.

Ο ελεγκτής ρεύματος, εγγυάται ότι ο πίνακας μεταξύ των ρευμάτων PF αναφοράς και των ρευμάτων PF που προέκυψαν πειραματικά είναι περίπου ίση με τον διαγώνιο πίνακα

$$W(s) = \frac{1}{1+0.1s} I_8$$

όπου I_8 είναι ένας πίνακας 8×8 . Ως συνέπεια, για το σχεδιασμό του ελεγκτή σχήματος πλάσματος ακολουθούμε το γραμμικό απλοποιημένο μοντέλο

$Y(s) = P(s)U(s)$ όπου $Y(s)$ είναι οι ελεγχόμενες παράμετροι και $U(s)$ είναι οι τρέχουσες αναφορές για τα κυκλώματα $m = 8$ που διατίθενται στον ελεγκτή

σχήματος και $P(s) = \frac{C}{1+s\tau}$ with $\tau = 0.1$ s, and $C \in \mathbb{R}^{(p \times m)}$ with $p = 32$.

Experimental Results

Το XSC έχει υλοποιηθεί στο JET σε PowerPC 400 MHz G4. Η αρχιτεκτονική λογισμικού του ελεγκτή έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να επιτρέπει τον έλεγχο του συνόλου του λογισμικού εκτός σύνδεσης.

Το XSC έχει σχεδιαστεί για να ελέγχει το σχήμα πλάσματος κατά τη φάση της επίπεδης κορυφής, όταν το ρεύμα πλάσματος έχει σταθερό μέγεθος. Η διατήρηση της σταθερής μορφής του πλάσματος κατά τη διάρκεια τέτοιων μεγάλων μεταβολών είναι πολύ απαιτητική, αφού όλοι οι παράμετροι του πλάσματος αλλάζουν και η υπόθεση ότι ένα μόνο γραμμικό μοντέλο μπορεί να περιγράψει τη συμπεριφορά του πλάσματος δεν ισχύει πλέον.

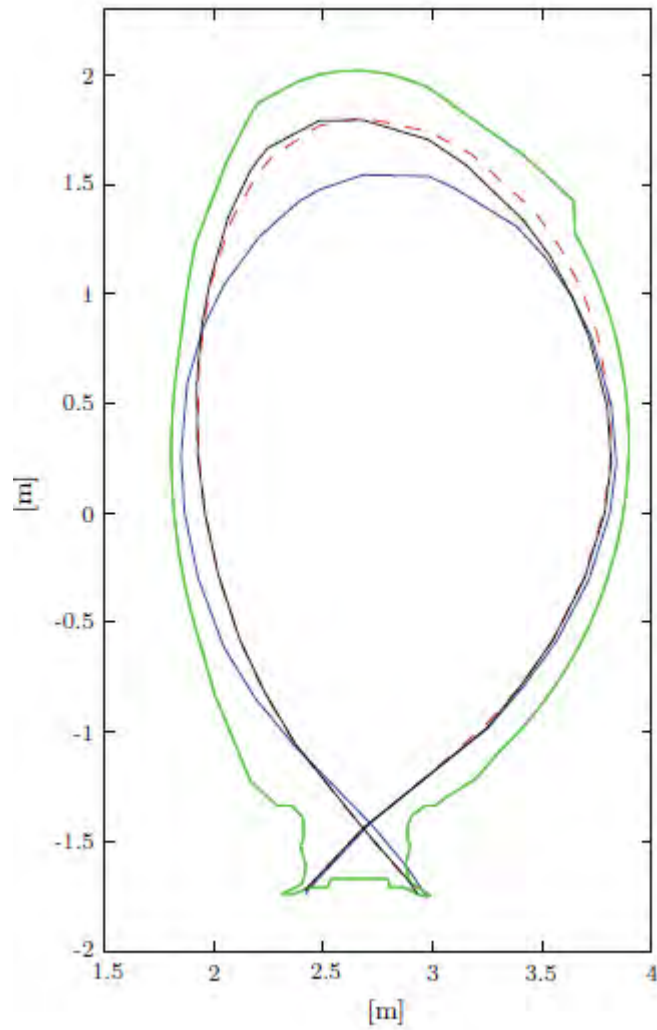
Κατά τη διάρκεια των εκκενώσεων στο JET, υπάρχουν μερικές περιοχές του ορίου πλάσματος που πρέπει να ελέγχονται με μεγαλύτερη ακρίβεια. αυτό συμβαίνει για παράδειγμα (βλ. Εικόνα 31) της περιοχής γύρω από το κενό ROG, ή των κενών γύρω από την περιοχή εκτροπής.

Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που ελήφθησαν κατά τον αριθμό πυροβολισμού JET 62837, όπου το XSC πήρε τον έλεγχο κατά την επίπεδη κορυφή πλάσματος σε $t = 54$ s. Ο ελεγκτής ρωτήθηκε για την παρακολούθηση δύο διαφορετικών σχημάτων: μία στο $t = 54$ s (Δοκιμή 1) και η δεύτερη σε $t = 61$ s (Δοκιμή 2).

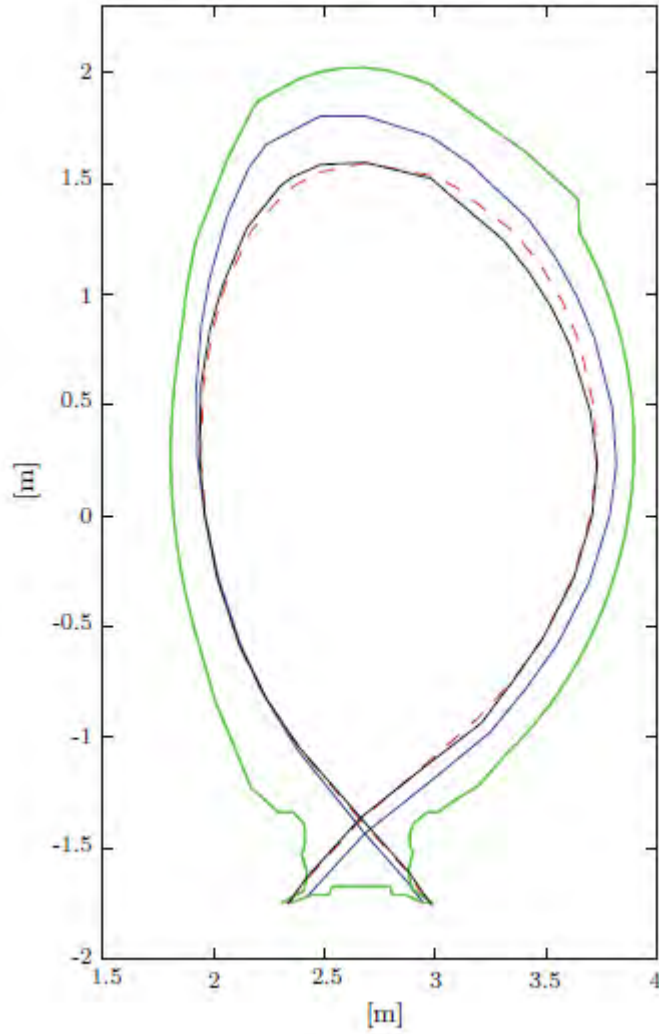
Ας υποδηλώσουμε :

- από r την επιθυμητή σταθερή αναφορά.
- από τον χρόνο μεταγωγής, δηλαδή από την ώρα που αλλάζει η αναφορά στο σχήμα.
- από $t_{tr} = 3$ s ένας λεγόμενος χρόνος μετάβασης.
- από γ τις γεωμετρικές μεταβλητές σχήματος που θέλουμε να ρυθμίσουμε.

Στη συνέχεια, για να αποφευχθούν μεγάλα σήματα ελέγχου, η αναφορά σχήματος που δίνεται στον ελεγκτή είναι γραμμικώς παρεμβαλλόμενη μέσω $t_{tr} = 3$ s με τον ακόλουθο τρόπο.



Εικόνα 33 : Test 1 of the XSC during the shot #62837: the switching time is $t_s = 54$ s and the transition time $t_{tr} = 3$ s. The Figure shows: (i) the reference shape to be tracked (dashed in red); (ii) the plasma boundary at $t = 54$ s (solid in blue); (iii) the plasma boundary at $t = 57$ s (solid in black). The vessel is shown in green.



Εικόνα 34 : Test 2 of the XSC during the shot #62837: the switching time is $t_s = 61$ s and the transition time $t_{tr} = 3$ s. The Figure shows: (i) the reference shape to be tracked (dashed in red); (ii) the plasma boundary at $t = 61$ s (solid in blue); (iii) the plasma boundary at $t = 64$ s (solid in black). The vessel is shown in green.

$$r(t) = y(t_s) + r^* - y(t_s) \frac{t - t_s}{t_{tr}}, t_s \leq t \leq t_s + t_{tr}$$

$$r(t) = r^*, t > t_s + t_{tr}$$

Τα σχήματα 33 και 34 δείχνουν το σχήμα αναφοράς και το σχήμα που έχει ληφθεί με βάση τα δείγματα XSC για τις δοκιμές 1 και 2 αντίστοιχα. Και στις δύο περιπτώσεις το σχήμα επιτυγχάνεται με ένα μικρό σφάλμα σταθερής κατάστασης.

4 . Συμβολή του JET στον μετριοσμό των λειτουργικών κινδύνων του ITER

4.1 Εισαγωγή στις νέες τεχνικές λειτουργικών σεναρίων

Η έρευνα στον Joint European Torus (JET) επικεντρώνεται σε μεγάλο βαθμό σχετικά με τις προετοιμασίες για την μετέπειτα καλύτερη και πιο αποδοτική εκμετάλλευση του ITER. Όλη αυτή η μελέτη χρόνων πάνω στον ήδη υπάρχων JET , γίνεται με σκοπό την ανάπτυξη λειτουργικών σεναρίων που απαιτούνται προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι του , υποστηρίζοντας παράλληλα την ανάπτυξη και τις τεχνολογικές δοκιμές. Στην ουσία πρόκειται για μια σειρά ενεργειών φάσης κατασκευής , φάσης προετοιμασίας με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ολοκληρωμένων εργαλείων μοντελοποίησης της βελτίωσης της απόδοσης του ITER.

Αρχική μας μελέτη της βελτίωσης αφορά αποκλειστικά την διαδικασία της καύσης με την αντικατάσταση των εξαρτημάτων , εξοπλισμένων τόσο στον JET , όσο και στον ITER , από τον άνθρακα στο συνδυασμό βηρυλλίου και βολφραμίου που προβλέπεται για τον ITER. Επίσης , θα μελετήσουμε την τροφοδοσία καυσίμου και μελέτες ελέγχου ELM , την επιπρόσθετη τοποθέτηση ενός σφαιριδίου υψηλής συχνότητας τ για το πλάσμα καθώς και μια συχνά νέων διαγνωστικών που θα αναπτύξουμε παρακάτω. Η όλη μελέτη έχει προβλεφθεί στο να μετριάσει τον κίνδυνο της λειτουργίας του ITER. Περιλαμβάνει κατάλογο κορυφαίων επιχειρησιακών κινδύνων που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν από το παγκόσμιο πρόγραμμα σύντηξης παράλληλα με την κατασκευή του ITER. Ο παρών κατάλογος , φαίνεται στην παρακάτω εικόνα και συνοπτικά θα ασχοληθούμε με τα κρίσιμότερα από τα ζητήματα αυτά , μερικά εκ των οποίων είναι τα υψηλά επίπεδα κατακράτησης τρίτου , την παρουσία του βολφραμίου στον εκτροπέα αντί του άνθρακα , τον κατακόρυφο έλεγχο σταθερότητας.

Table 1

Top 12 risks to the ITER scientific programme as listed in the ITER Research Plan [2].

1	Inadequate disruption mitigation
2	H-mode power threshold at high end of uncertainty range
3	Inadequate ELM mitigation schemes
4	Inadequate vertical stability control
5	Lack of reliable high power heating during non-active phase of programme
6	Unacceptable "divertor" performance with tungsten PFCs
7	Level of toroidal field ripple degrades plasma performance
8	Lack of plasma rotation leads to a degradation of plasma performance
9	High levels of tritium retention require more frequent tritium removal procedures than foreseen
10	Incompatibility of core plasma requirements for $Q = 10$ with radiative divertor operation
11	Inability to achieve densities near Greenwald value required for $Q = 10$
12	Inadequate particle control to sustain high- Q plasma scenario

Εικόνα 35: Top 12 risks to the ITER scientific program as listed in the ITER Research Plan

4.2 Συμβολή του JET στον μετριάσμό των λειτουργικών κινδύνων του ITER

- Υψηλά επίπεδα κατακράτησης τριτίου

Όπως γνωρίζουμε, ο άνθρακας είναι το προτιμώμενο υλικό για εξαρτήματα που έχουν σχέση με τη μαγνητική συγκράτηση του πλάσματος τα λεγόμενα PFCs, δεδομένο του ότι σύμφωνα με έρευνες στο μακρινό 1970 διαπιστώθηκε ότι λόγω της αντοχής του στη μετάβαση και στα χαμηλά επίπεδα που τον διακρίνουν όταν τον προσμείζουμε με πλάσμα, τα επίπεδα αραίωσης και ακτινοβολίας του παραμένουν χαμηλά και δεν δημιουργούν προβλήματα, με το κυριότερο να είναι ότι περιορίζει κατά πολύ την οφέλεια του προϊόντος, δηλαδή για ορισμένη ποσότητα πλάσματος με πρόσμειξη άνθρακα πέρνουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα, ενώ σε περίπτωση που διαλέγαμε κάποιο άλλο υλικό, η ποσότητα του πλάσματος θα έπρεπε να αυξανόταν. Όλα αυτά στη περίπτωση του Jet reactor. Από την άλλη πλευρά με δεδομένη την εξέλιξη που υπάρχει, διαπιστώθηκε ότι λόγω των

«κακών» επιπέδων συγκράτησης του άνθρακα στο δοχείο , υπάρχει μία απαίτηση συχνής αφαίρεσης και καθαρισμού καυσίμου , διότι η πρόσμειξη άνθρακα με πλάσμα έχει ως αποτέλεσμα το προϊόν να χάνει προοδευτικά με την πάροδο του χρόνου με αποτέλεσμα την μείωση της προόδου στο νέο κύριο πειραματικό πρόγραμμα του ITER. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι να συνεργαστούν μαζί δύο στοιχεία το βηρύλλιο και το βολφράμιο ως τα πρώτα υλικά τοιχοποιίας.

Από τη μία το βηρύλλιο θα χρησιμοποιηθεί στον κύριο θάλαμο , καθώς ο εκτροπέας θα είναι θωρακισμένος με βολφράμιο. Ο συνδυασμός αυτός , επί της ουσίας δεν χρησιμοποιήθηκε καθώς και δεν δοκιμάστηκε ποτέ ως το βασικό συστατικό του JET.

Επιπλέον , τα υλικά αυτά αναμένεται να μειώσουν την επικάλυψη του τριτίου σε αποθηκευμένα στρώμενα σε πιο χαμηλά επίπεδα , ενώ σε δεύτερη ανάλυση είναι ικανά να παρέχουν χαμηλά επίπεδα πρόσμειξης και οφέλειας του προϊόντος σε αντίθεση με τον άνθρακα . Ταυτοχρόνως , πληρούν τις αυστηρές απαιτήσεις κόστους και διαχείρισης των υλικών στον αντιδραστήρα ITER.

Η βελτίωση του νέου προγράμματος βασίζεται στην εγκατάσταση και δοκιμή ενός τοίχου του ITER , όπως βλέπουμε στο παρακάτω σχήμα. Ο κύριος θάλαμος είναι η μεγαλύτερη πηγή ακαθαρσιών στα τοκαμάκ , καθώς εκεί ,μετά τις προσμείξεις των προϊόντων στο πλάσμα γίνεται η μεγαλύτερη κατακράτηση καυσίμου και η εναπόθεση στο τελικό προϊόν διαφόρων ακαθαρσιών.

Η κατακράτηση καυσίμου σε στρώματα βηρυλλίου θα δοκιμαστεί μέσω τεχνικών μετρήσεων ισοζυγίου αέρος στον αντιδραστήρα Jet , και εφόσον καταστεί προσοδοφόρα σύμφωνα με τα αποτελέσματα , ο χρόνος θα δείξει αν θα δοθεί στο κυρίως πρόγραμμα του ITER για ανάπτυξη.

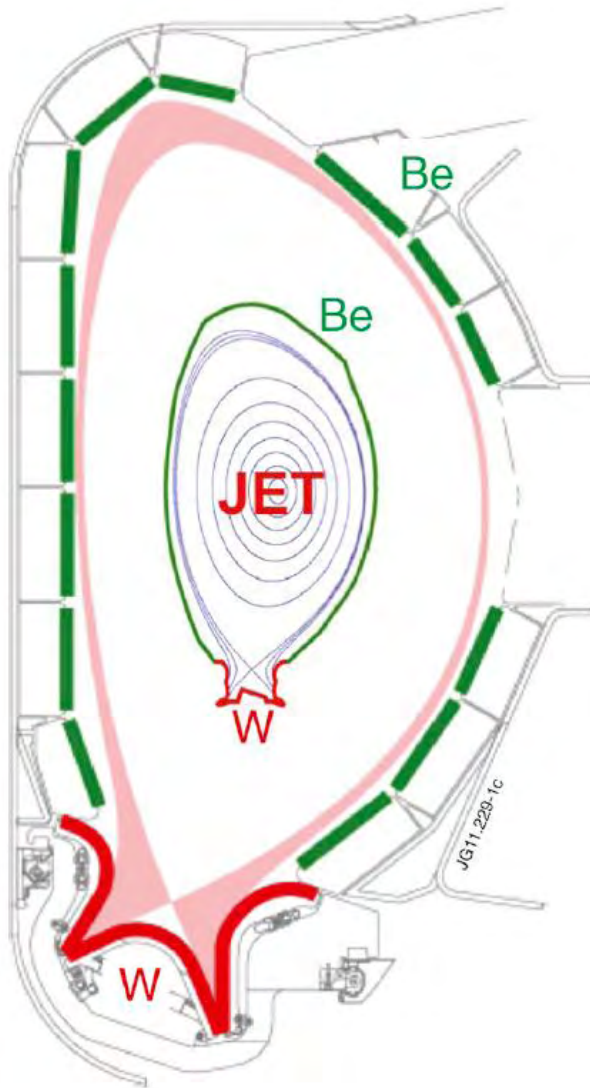


Figure: Schematic showing the use of beryllium and tungsten in JET and ITER.

- *Υλικά μαγνητικής συγκράτησης πλάσματος PFCs βολφραμίου*

Υψηλής ποιότητας υλικού εξαρτήματα μαγνητικής συγκράτησης πλάσματος PFCs είναι επιθυμητά σε κάθε υλοποίηση του δοχείου κενού Vessel Vacuum διότι έχει διαπιστωθεί ότι μειώνουν τη διάβρωση και ως αποτέλεσμα ευθύνονται για την αύξηση της διάρκειας ζωής των εξαρτημάτων εντός του δοχείου κενού. Η μειωμένη διάβρωση λοιπόν, λόγω της χρήσης του βολφραμίου αναμένεται να οδηγήσει σε χαμηλότερη παραγωγή σκόνης και κατακράτησης τριτίου, σενάρια τα οποία σκοπεύουμε να αποφύγουμε στην νέα μας υλοποίηση του ITER.

Πράγματι , το να θωρακίσουμε τα PFCs με βολφράμιο είναι πρωταρχικός στόχος στους αντιδραστήρες σύντηξης. Υπάρχει , όμως , μια ανησυχία και αυτή έγκειται στο γεγονός ότι οι ακαθαρσίες είναι πιθανόν να παράγουν έντονη ακτινοβολία κατά την έκθεση τους σε υψηλές θερμοκρασίες πλάσματος. Το πρόβλημα αυτό , μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση του βολφραμίου στο τοίχωμα , έτσι ώστε κατά την αλληλεπίδραση του τοιχώματος με το πλάσμα η συγκέντρωση της ακτινοβολίας να διατηρείται πολύ χαμηλή.

Οι υπόλοιπες ανησυχίες για τη βελτίωση και υλοποίηση του ITER δείχνουν να ξεπερνιούνται , αναφορικά με το βολφράμιο στο τοίχωμα του δοχείου καθώς τα αποτελέσματα μετρήσεων είναι ευνοϊκά για το μεγαλύτερο μέρος των υλικών και των μηχανημάτων , ιδίως σε ότι αφορά τις ωφέλιμες επιδόσεις καθώς και την απουσία αρνητικών επιπτώσεων από την ανάμειξη των δυο στοιχείων βηρυλλίου και βολφραμίου που αναφέραμε παραπάνω.

Επιπλέον , το πρόγραμμα υποστήριξης του ITER περιλαμβάνει επίσης μια σημαντική αναβάθμιση των διαγνωστικών στο μηχάνημα μας, όπως IR και κάμερες κοντά στην υπέρυθρη ακτινοβολία για τη μέτρηση του όγκου , των επιφανειών και της θερμοκρασίας. Ακόμη , περιλαμβάνει , οθόνες διάβρωσης – εναπόθεσης καθώς και ευρύ φάσμα βελτιώσεων στα φασματοσκοπικά συστήματα.

Στο παρακάτω σχήμα , παρουσιάζουμε το νέο ενδοσκόπιο σχεδιασμένο για μετρήσεις υψηλής ανάλυσης του νέου εκτροπέα βολφραμίου.



Figure: Field-of-view of the new divertor endoscope, showing the tungsten divertor, composed of tungsten-coated CFC tiles on its vertical surfaces and a solid tungsten module on the divertor floor.

- **H-mode power threshold (ανώτατο όριο κατωφλίου ισχύος)**

Υπάρχει σημαντική αβεβαιότητα στον αντιδραστήρα ITER όσον αφορά την κλιμάκωση που παρουσιάζει η απαιτούμενη ισχύς για την πρόσβαση σε υψηλά επίπεδα περιορισμού λειτουργίας. Η ειδική αρμόδια επιτροπή IRP θεωρεί ότι υπάρχουν τόσο αισιόδοξες όσο και απαισιόδοξες αποκλίσεις σε αρκετούς παράγοντες που σχετίζονται με το παραγόμενο όριο κατωφλίου ισχύος. Αυτό ασφαλώς και θα μπορούσε να αποτελέσει θέμα για τον αντιδραστήρα ITER στη μη ενεργή φάση της λειτουργίας του , δεδομένου του ότι εξακολουθούν να τίθενται σε λειτουργία συστήματα θέρμανσης. Ομοίως , η λειτουργία του Jet Reactor στις υψηλότερες επιδόσεις του , δηλαδή σε συνθήκες όσο το δυνατόν πλησιέστερα σε εκείνες του ITER , απαιτεί επίσης , ισχύ εισόδου κοντά στο μέγιστο επίπεδο , στο ανώτατο δηλαδή όριο. Στις συνθήκες αυτές , ο περιορισμός της ενέργειας είναι χαμηλότερος από ότι αναμένεται από τους νόμους της κλιμάκωσης που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της απόδοσης του ITER.

Η αναμενόμενη , παρατηρούμενη ανατροπή της απόδοσης του JET είναι η έλλειψη διαθέσιμης ισχύος εισόδου. Η απόδειξη αυτή στο JET , μας είναι αρκετή ώστε να προβλέψουμε την απαιτούμενη ισχύ εισόδου στον ITER.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αυτά τα θέματα και να σχεδιάσουμε σωστά και στρατηγικά τον ITER, είναι να αυξήσουμε το σύστημα θέρμανσης. Ουσιαστικά, έχουμε αύξηση μέγιστης ισχύος και διάρκειας παλμού του συστήματος από 24MW 10s → 34MW 20s, ενώ παράλληλα μια τέτοια ενέργεια αυξάνει την αξιοπιστία του συστήματος. Οι αρχικές δοκιμές έδειξαν ότι οι μεμονωμένες πηγές ιόντων πληρούν τις προδιαγραφές του έργου. Μετά την εγκατάσταση των αναβαθμίσεων στα εσωτερικά συστήματα ψύξης, το σύστημα θα φτάσει σταδιακά σε πληρή ισχύ και ενέργεια, όπως μας δείχνει το παρακάτω σχήμα με ρυθμό που πιθανόν να υπαγορεύεται περισσότερο από τις απαιτήσεις του προγράμματος παρά από τη διαθεσιμότητα του συστήματος θέρμανσης.

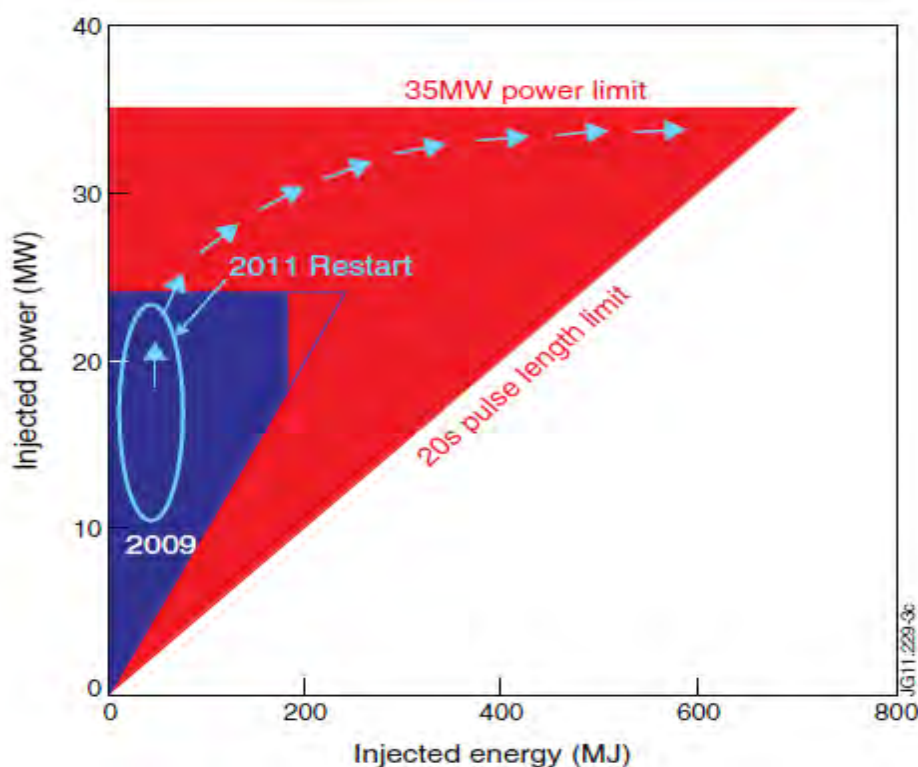


Figure: Χώρος λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης με ουδέτερη δέσμη πριν και μετά την πρόσφατη βελτίωση. Το ωοειδές δείχνει τον χώρο λειτουργίας που τίθεται σε λειτουργία κατά την παρούσα επανεκκίνηση, ενώ τα βέλη υποδεικνύουν την αναμενόμενη απόδοση τροχιάς ως την πρόοδο των πειραματικών εκστρατειών του 2011/12 για τη βελτίωση του ITER.

- ELM mitigation (ELM μετριασμός)

Η ισχύς και η ενέργεια που προσδιορίστηκαν από Edge Localised Modes ELMs στον αντιδραστήρα ITER καθώς και τα PFCs που αναπτύξαμε παραπάνω αντιπροσωπεύουν μια πιθανή απειλή για περιορισμένα φορτία. Οι προβολές υποδεικνύουν ότι το μέγεθος των μη μετριασμένων ELM στον ITER θα πρέπει να μειωθεί κατά 10-20, προκειμένου να εξασφαλιστεί μια αποδεκτή διάρκεια

διαφυγής. Ο ITER είναι σε φάση να προβλέπει δύο μεθόδους μετριασμού ή καταστολής ELM: την εισαγωγή επαναλαμβανόμενων σφαιριδίων δευτερίου και την εφαρμογή μαγνητικών διαταραχών (RMPs) στην άκρη του πλάσματος. Η έγχυση pellet (pellet injection) έχει αποδειχθεί ως ένα αξιόπιστο εργαλείο για τον μετριασμό του ELM, όπου σε επαρκώς υψηλή συχνότητα έγχυσης, κάθε σφαιρίδου ενεργοποιεί ELM και η ενέργεια ELM πέφτει αντίστροφα προς τη συχνότητα ELM.

Η συχνότητα ELM μειώνεται με το μέγεθος της μηχανής (αυτός είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους τα ELM αποτελούν ένα τέτοιο ζήτημα στον ITER), ώστε να επιτευχθεί πιο δυναμική εμβέλεια με την ίδια τεχνολογία, αλλά σε μεγαλύτερο μέγεθος όπως ο ITER αντιδραστήρας. Επιπλέον, η απόδοση των μεγαλύτερων μηχανών θα επηρεάζεται λιγότερο από την τροφοδοσία που παρέχεται από τη βηματοδότηση των σφαιριδίων, καθώς αυτή η τροφοδοσία θα είναι μικρότερη σε σχέση με το απόθεμα σωματιδίων πλάσματος.

Ένας ψεκαστήρας υψηλής συχνότητας έχει τοποθετηθεί στον JET και μετά από μια αναβάθμιση κατά τη διάρκεια των πρόσφατων ερευνών και πειραμάτων προγραμματίζεται η δοκιμή ELM ελέγχου και μετριασμού του στον αντιδραστήρα JET περίπου σε 10 φορές μικρότερο της φυσικής συχνότητας ELM. Τα αποτελέσματα από αυτή την αναβάθμιση σε αυτό τον αντιδραστήρα, θα καθορίσουν σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο εφαρμογής του στον ITER, όπου ενδέχεται να έχει ακόμα καλύτερη λειτουργία και λόγω του μεγάλου μεγέθους του, καθώς όπως έχουμε ήδη πεί η συχνότητα ELM μειώνεται έτσι και αλλιώς λόγω της αύξησης του μεγέθους της μηχανής.

- **Vertical Stability Control (Έλεγχος κατακόρυφης σταθερότητας)**

Στον JET, όπως και στον ITER, η μέγιστη απόδοση πλάσματος μπορεί να περιορίζεται από την κατακόρυφη σταθερότητα της στήλης πλάσματος.

Αυτό είναι ιδιαίτερα ανησυχητικό για τον ITER, όπου η μέγιστη απόδοση είναι ο πρωταρχικός στόχος του, αλλά επηρεάζει επίσης και την ικανότητα του JET να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο τις συνθήκες πλάσματος του ITER με τη λειτουργία ενός μέγιστου ρεύματος πλάσματος και τοροειδούς πεδίου. Και πάλι τα ELM αποτελούν βασικό ζήτημα, αυτή τη φορά σε σχέση με τη διαταραχή που προκαλούν στην κατακόρυφη θέση του πλάσματος και στους μαγνητικούς αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση αυτής της θέσης. Τα μεγαλύτερα ELM στο JET μπορούν να οδηγήσουν σε γεγονότα κατακόρυφης μετατόπισης (VDEs) και διαταραχές του πλάσματος, όπως παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα. Για το λόγο αυτό, ένα σημαντικό μέρος του προγράμματος ενίσχυσης του JET, που θα

εφαρμοστεί και στον ITER ήταν η παροχή ενός νέου κάθετου συστήματος σταθεροποίησης.

Το νέο σύστημα αποτελείται από ενισχυμένο ενισχυτή ακτινωτού πεδίου με 20% υψηλότερη τάση και χωρητικότητας ρεύματος από τον προηγούμενο, καθώς και νέο ψηφιακό ελεγχτή πραγματικού χρόνου με πολύ βελτιωμένο χρόνο απόκρισης. Ο ενισχυτής εγκαταστάθηκε κατά τη διάρκεια επέμβασης 7 εβδομάδων του 2009 και το νέο σύστημα τέθηκε πλήρως σε λειτουργία αμέσως, όπου αφού δοκιμάστηκε επιτυχώς, αποφασίστηκε να στελεχωθεί το νέο ITER. Σε αυτό το μεσοδιάστημα, ο έλεγχος των ELM > 1 MJ αποδείχθηκε και η μοντελοποίηση επικυρώθηκε. Αυτή η μοντελοποίηση υποδεικνύει ότι ο στόχος του έργου για ανάκτηση από ELMs των 2 MJ στο 4 MA είναι ρεαλιστική και θα μπορούσε να επιτευχθεί. Πράγματι, αυτές οι προσομοιώσεις υποδηλώνουν ότι τα ELM έως 5 MJ μπορεί να είναι επιβιώσιμα ακόμα και για μεσαίου ρυθμού ανάπτυξης πλάσματα.

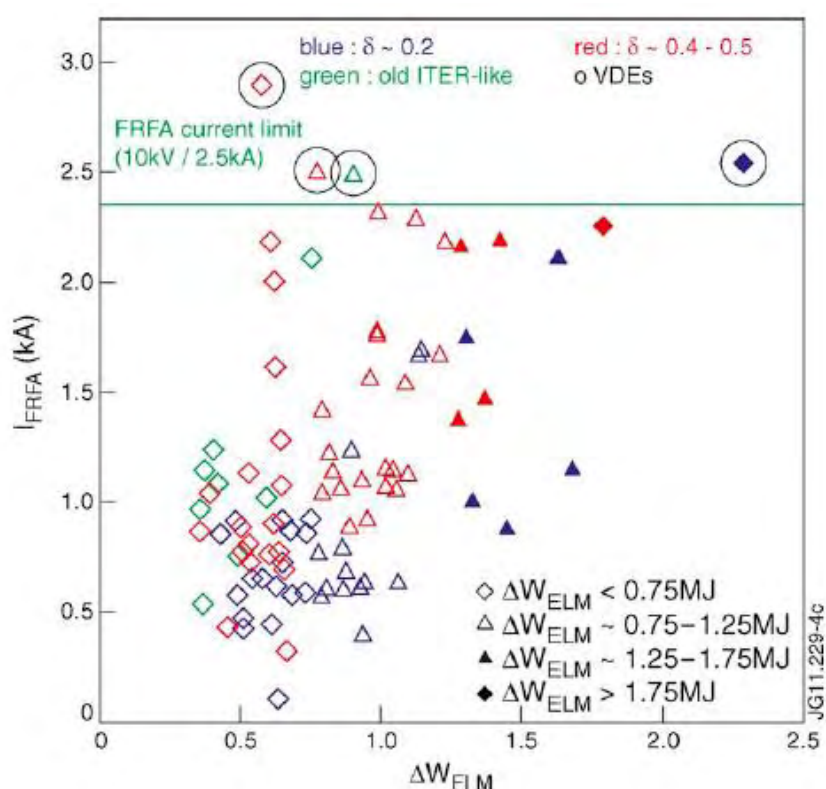


Figure : Μέγιστο ρεύμα που απαιτείται από το παλιό σύστημα κατακόρυφης σταθεροποίησης JET σε απόκριση της διαταραχής που προκαλείται από ένα ELM ως συνάρτηση του μεγέθους ELM στο MJ. Τα ρεύματα πάνω από το όριο του συστήματος (η οριζόντια γραμμή) οδήγησαν σε κατακόρυφη μετατόπιση και διαταραχές της στήλης πλάσματος.

4.3 Πρόγραμμα προώθησης JET – ITER

Το σενάριο αναφοράς της εκμετάλλευσης του JET για την ορθότητα της λειτουργίας του ITER προβλέπει πλήρη οριοθέτηση των σημερινών βελτιώσεων που καλύπτουν την περίοδο περίπου 2011-2015. Το λειτουργικό αυτό σενάριο χωρίζεται σε 3 φάσεις.

Η πρώτη φάση επικεντρώνεται στον πλήρη χαρακτηρισμό του εξωτερικού τοίχου του ITER, καθώς και στην συμβατότητα του με το καθεστώς λειτουργίας του νέου αντιδραστήρα. Αυτή η φάση μόλις ξεκίνησε χρονικά το 2011 και αναμένεται να ολοκληρωθεί μέχρι τα μέσα του 2012. Τα πράγματα τα οποία πραγματεύεται αυτή η φάση είναι: η επαρκώς χαμηλή κατακράτηση του καυσίμου, η εκτίμηση της ισχύος του τοίχου, η έρευνα σχετικά με την ανάμειξη βηρυλλίου βολφραμίου, η πρόσμειξη καθώς και η ανάπτυξη των καθεστώτων λειτουργίας του ITER συμβατών με το τοίχωμα στην πορεία της μέτρια ισχύς εισόδου.

Στην δεύτερη φάση του σεναρίου αναπτύσσονται επιχειρησιακά σενάρια για τον ITER, με αφορμή την διευρεύνηση που πραγματοποιήσαμε στον JET. Τα βασικά παραδοτέα της φάσης αυτής είναι: οι απαιτήσεις θέρμανσης, οι απαιτήσεις ελέγχου και τροφοδοσίας προκειμένου να επιτευχθούν υψηλά καθεστώτα περιορισμού και η επίτευξη πλασμάτων περιορισμού υψηλής ενέργειας, διατηρώντας παράλληλα αποδεκτά φορτία σταθερής ELMs στα PFCs. Αυτή η δεύτερη φάση αναμένεται να διαρκέσει για ολόκληρο το 2013 – 2014. Ανάλογα με την πρόοδο που σημειώθηκε στην ανάπτυξη των σεναρίων, που επί της ουσίας περιγράφηκαν παραπάνω, θα εφαρμοζόνταν τα εν λόγω εσκεμμένα πειράματα στον αντιδραστήρα ITER.

Η τρίτη φάση του σεναρίου αναφοράς είναι μια επίδειξη σε πλάσματα DT (Deuterium – Tritium Plasmas) που αναπτύχθηκαν νωρίτερα. Μια τελική απόφαση για το αν θα προχωρήσει ή όχι στο DT Plasma θα ληφθεί εφόσον είμαστε σίγουροι για την οριστική επιβεβαίωση της απομάκρυνσης τριτίου και της βελτιστοποίησης της γενικότερης διαδικασίας με τον υπολογισμό σε κόστος των νετρονίων που θέλουμε να επιτύχουμε στη φάση αυτή. Αυτό θα αποτελούσε την πλέον ολοκληρωμένη δοκιμή των λειτουργικών σεναρίων του ITER, λίγο πριν τη δημιουργία και στελέχωση του ίδιου του ITER. Σύμφωνα με το σενάριο αναφοράς, η λειτουργία του JET θα σταματήσει στη μέση αυτής της 10ετίας.

Υπάρχει όμως και ένα εναλλακτικό σενάριο για το μελλοντικό πρόγραμμα προώθησης του JET προς τον ITER, όπως μπορούμε να δούμε στην παρακάτω εικόνα, το οποίο μοντέλο βασίζεται στην έννοια της δοκιμής όλων των εργαλείων ελέγχου που προβλέπονται για τον ITER, όχι στον ίδιο τον JET, αλλά σε μία παρόμοια με τον ITER μηχανή ίδιων προδιαγραφών, λίγο πριν την ολοκληρωτική κατασκευή του.

Αυτή η μηχανή θα πρέπει να φέρει αναβαθμίσεις σε όλα τα στάδια των μηχανημάτων του JET , σύμφωνα με όσα μελετήσαμε , να είναι χαμηλού κόστους , να ταιριάζει με τις δυνατότητες ελέγχου του ITER , τόσο σε μέγεθος , όσο και σε λειτουργικότητα συμπεριλαμβανομένων τον μετρίασμό των ELM με σύστημα ECRH για το προφίλ του ρεύματος πλάσματος ελέγχου και της ευρέως σταθεροποίησης των NTMs. Η πλήρης εκμετάλλευση των νέων αυτών εργαλείων ελέγχου αναμένεται να απαιτήσει τρία έως πέντε χρόνια και έτσι σε αυτό το εναλλακτικό σενάριο , η λειτουργία του JET θα επεκταθεί μέχρι το τέλος της δεκαετίας. Η φάση προκαθορισμού θα εξακολουθούσε να συμπεριλαμβάνει τη λειτουργία DT , αλλά στην περίπτωση αυτή θα έπρεπε να προσαρμοστεί έτσι ώστε να επωφεληθεί από τα νέα εργαλεία ελέγχου.

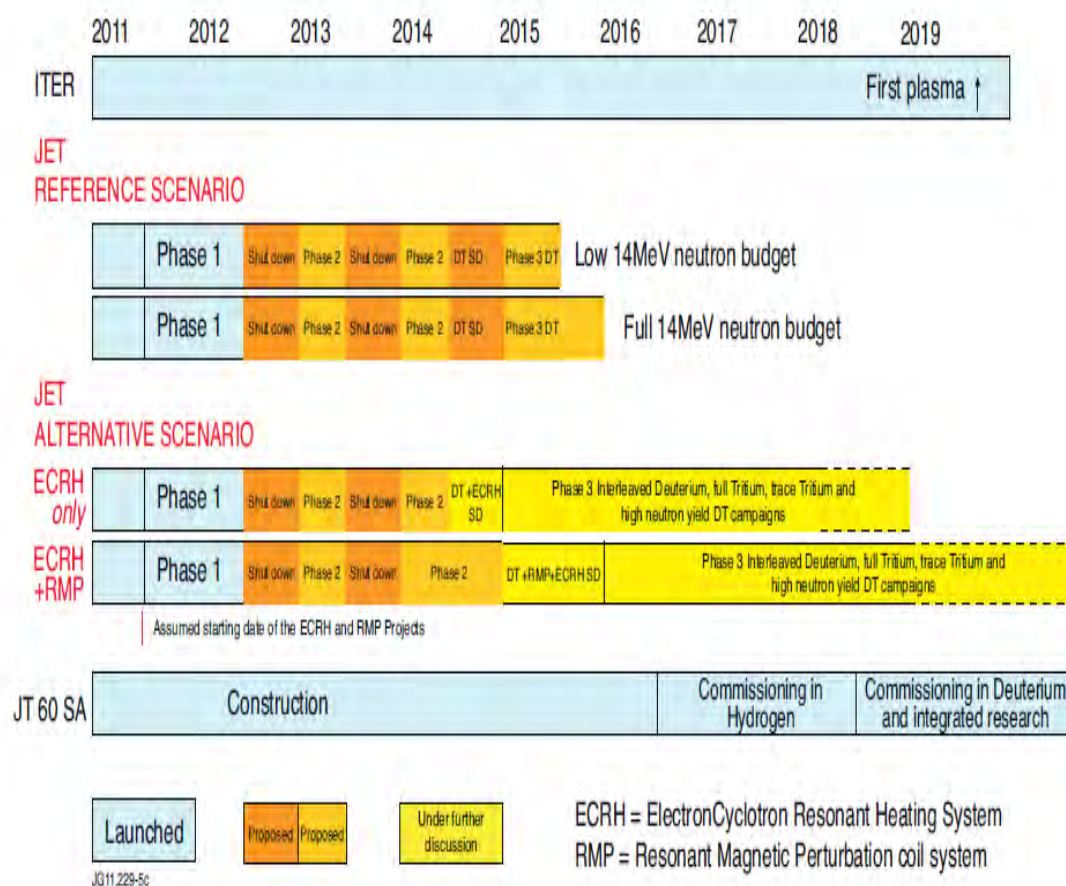


Figure: Timeline for the JET reference and alternative program scenarios.

Η επέκταση της λειτουργίας του Jet με τη δημιουργία της μηχανής ως εναλλακτικό σενάριο θα προσφέρει σημαντικούς τρόπους εκμετάλλευσης όλων των παραμέτρων

του JET , πριν την υλοποίηση και λειτουργία του ITER. Το σενάριο και γενικότερα το πρόγραμμα δεν βασίζεται μόνο στην ισχυρή διεθνή συνεισφορά που παρέχει , αλλά και στην παροχή ανθρώπινου δυναμικού για την εκμετάλλευση της μηχανής.

4.4 Περίληψη και συμπεράσματα

Το τοκαμάκ του JET μόλις ολοκλήρωσε το πρόγραμμα βελτίωσης στο πλαίσιο της αποστολής του για την υποστήριξη της αποτελεσματικής λειτουργίας του ITER. Αν και σχεδιάστηκε πριν από την ανάπτυξη του ερευνητικού σχεδίου ITER, το πρόγραμμα βελτίωσης του JET μπορεί να αντιμετωπίσει τους κυριότερους λειτουργικούς κινδύνους, δίνοντας μας σωστή πρόβλεψη για ορθή λειτουργία και χρονοπρογραμματισμό του ITER.

Το πρόγραμμα για την υποστήριξη του ITER, έχει αναπτυχθεί κατά μήκος σε τρεις βασικούς άξονες:

- i) Πειραματισμός και προσωμοίωση με τοίχο τύπου ITER
- ii) Ανάπτυξη παραμέτρων πλάσματος καθώς και παραμέτρων πλέον σχετικών με τις συνθήκες του ITER, που μπορεί να επιτευχθούν σήμερα.
- iii) Ολοκληρωμένος πειραματισμός σε δευτέριο – τρίτιο

Χρονοδιάγραμμα σε βάση 2 σεναρίων :

- i) Στο πρώτο σενάριο αναφοράς για την ολοκλήρωση αυτού του προγράμματος, η λειτουργία του JET θα συνεχιστεί μέχρι τα μέσα της δεκαετίας.
- ii) Ένα εναλλακτικό σενάριο με βάση την ενσωμάτωση όλων των εργαλείων ελέγχου που προβλέπονται για τον ITER με τις πλησιέστερες δυνατές συνθήκες πλάσματος θα συνεχιστεί για άλλα τρία έως πέντε έτη.

Το JET πρόγραμμα προσωμοίωσης των λειτουργικών κινδύνων του ITER, είναι ένα πρόγραμμα που χρηματοδοτείται και αξιοποιείται σε συνεργασία με όλα τα ευρωπαϊκά εργαστήρια σύντηξης. Ως εκ τούτου, το JET αποτελεί ένα εργαλείο δοκιμής για πολυεθνική χρήση μιας ενιαίας εγκατάστασης σύντηξης, όπως προβλέπεται για τον ITER.

Παράρτημα-Λεξιλόγιο

Ακτινοβολία γ: Η ακτινοβολία ή ακτίνες γ είναι μια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υψηλής συχνότητας και παράγεται από αλληλεπιδράσεις υποατομικών μαζών, όπως η σχάση και η σύντηξη.

Αμπέρ (Ampere, Kiloampere, megampere): Μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού ρεύματος. Αντιστοιχεί στη ροή ηλεκτρικού φορτίου ενός Κουλόμπ ανά δευτερόλεπτο.

Ανακλαστομετρία: Τεχνική που χρησιμοποιεί την ανάκλαση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων πάνω σε διασυνδέσεις και επιφάνειες προκειμένου να ανιχνεύσει ή να χαρακτηρίσει αντικείμενα.

Ανισοτροπία: Όρος της φυσικής που σημαίνει μεταβολή των φυσικών ιδιοτήτων (μηχανικών, θερμικών, οπτικών, μαγνητικών και ηλεκτρικών) μιας ουσίας, ανάλογα με τη διεύθυνση κατά την οποία αυτή εξετάζεται.

Άτομο: Η μικρότερη μονάδα ενός στοιχείου που διατηρεί τα χαρακτηριστικά του στοιχείου αυτού. Στο κέντρο του ατόμου βρίσκεται ο πυρήνας, ο οποίος αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια, ενώ γύρω του περιστρέφονται τα ηλεκτρόνια. Το άτομο του υδρογόνου – που είναι το ελαφρύτερο στοιχείο – συγκροτείται από έναν πυρήνα ενός πρωτονίου γύρω από τον οποίο περιστρέφεται ένα ηλεκτρόνιο.

Άτομο Δευτέριου: Ισότοπο του υδρογόνου με ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο στον πυρήνα του, και ένα ηλεκτρόνιο που περιστρέφεται γύρω από τον πυρήνα.

Βολόμετρο: Όργανο για τη μέτρηση της ακτινοβολούμενης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Η ακτινοβολούμενη ενέργεια, καθώς απορροφάται τελείως από ένα λεπτότατο έλασμα (πλατίνη ή μαγκανίνη) καλυμμένο από αιθάλη, προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας. Οι μεταβολές αυτές της θερμοκρασίας μπορούν να μετρηθούν εμμέσως από τις μεταβολές της ηλεκτρικής αντίστασης του ελάσματος, όταν αυτό τοποθετηθεί σε έναν κλάδο μιας γέφυρας Γουίτστον, ή από τις μεταβολές της ηλεκτρικής αντίστασης ενός άλλου μεταλλικού ελάσματος που θερμαίνεται από το πρώτο.

Εκκένωση πλάσματος: Είναι μια τεχνολογία που εφαρμόζεται στο πλάσμα με σκοπό τη μείωση της θερμοκρασίας ανάπτυξης αφού η ενέργεια για τις αντιδράσεις δεν είναι θερμική αλλά παρέχεται από τα υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια (μέσω ανελαστικών κρούσεων) που βρίσκονται στην εκκένωση του.

Euratom (European Atomic Energy Community): Οργανισμός που συστάθηκε το 1958 από χώρες μέλη της ΕΕ, με σκοπό τη δημιουργία κοινής αγοράς για την ανάπτυξη των ειρηνικών χρήσεων της ατομικής ενέργειας.

Edge-localized mode (“ELM”): Αποδιοργανωτική αστάθεια που συμβαίνει στην ακραία περιοχή ενός πλάσματος tokamak λόγω της περιοδικής χαλάρωσης ενός φραγμού μεταφοράς που σχηματίστηκε προηγουμένως κατά τη διάρκεια μιας μετάβασης σε κατάσταση H. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε για πρώτη φορά στο tokamak ASDEX το 1981.

Ηλεκτρονιοβόλτ (eV): Μονάδα ενέργειας ίση με αυτή που αποκτά ένα ηλεκτρόνιο όταν περνάει από δύο σημεία διαφοράς δυναμικού ενός βόλτ. Το ηλεκτρονιοβόλτ χρησιμοποιείται και σαν μονάδα θερμοκρασίας του πλάσματος.

Ηλεκτρόνιο: Στοιχειώδες σωματίδιο με αρνητικό φορτίο. Τα ηλεκτρόνια στο άτομο περιστρέφονται γύρω από τον θετικά φορτισμένο πυρήνα.

Ημιζωή/Χρόνος ημιζωής: Ο χρόνος μέσα στον οποίο διασπώνται οι μισοί ατομικοί πυρήνες μιας ραδιενεργού ουσίας. Οι χρόνοι αυτοί κυμαίνονται ανάλογα με το είδος του πυρήνα, από εκατομμυριοστά του δευτερολέπτου σε εκατομμύρια χρόνια.

Θερμοκρασία πλάσματος: Είναι μέτρο της κινητικής ενέργειας των ιόντων, ή των ηλεκτρονίων του πλάσματος.

Θερμοπυρηνική σύντηξη: Σύντηξη σε υψηλή θερμοκρασία με μεγαλύτερη έκλυση ενέργειας.

Ιόν: Άτομο, το οποίο φορτίστηκε, λόγω του ότι έδωσε ή πήρε ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια. Πλήρως ιονισμένο άτομο λέγεται εκείνο που έχει χάσει όλα τα ηλεκτρόνια του.

Ιονισμός: Η προσθήκη ή αφαίρεση ηλεκτρονίων από το ουδέτερο άτομο, δηλαδή η δημιουργία ιόντος.

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor): Διεθνής Θερμοπυρηνικός Πειραματικός Αντιδραστήρας. Αντιδραστήρας σύντηξης που σχεδιάζουν από κοινού οι ΗΠΑ, η ΕΕ, η Σοβιετική Ένωση και η Ιαπωνία.

JET (Joint European Torus): Κοινό Ευρωπαϊκό Τοροειδές. Εργαστήριο της ΕΕ, που διαθέτει μεγάλη συσκευή σύντηξης τύπου tokamak και βρίσκεται στην περιοχή της Οξφόρδης στην Αγγλία.

Κυκλοτρόνιο: Κυκλικός επιταχυντής ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων (πρωτόνια, σωματίδια α, δευτερόνια κλπ.). Κατασκευάστηκε κατά το 1930 από τον Έρνεστ Ορλάντ ο Λόρενς (Νόμπελ φυσικής, 1939) του πανεπιστημίου της Καλιφόρνια και λειτούργησε για πρώτη φορά το 1932. Υπήρξε η πρώτη επιταχυντική διάταξη που κατασκευάστηκε ποτέ και αποτελεί τον πρόγονο των σημερινών γιγάντιων επιταχυντών, των οποίων η σημασία κρίνεται νευραλγική για την εξέλιξη της σύγχρονης φυσικής.

Κυματαριθμός k: Ο κυματαριθμός k είναι η χωρική συχνότητα, ο ρυθμός των επαναλήψεων στη μονάδα του μήκους. Μας δείχνει πόσες φορές επαναλαμβάνει

κάτι τον εαυτό του μέσα στη μονάδα του μονοδιάστατου χώρου. Για ένα κύμα ο κυματαριθμός ισούται με το πόσα μήκη κύματος ξεδιπλώνονται στο χώρο όταν το κύμα έχει διανύσει απόσταση ίση με ένα μέτρο (ή όποια άλλη μονάδα μήκους ορίσουμε ως μοναδιαία).

Μεταστοιχείωση: Με τον όρο μεταστοιχείωση στην Πυρηνική φυσική χαρακτηρίζεται η μετατροπή ενός χημικού στοιχείου σε κάποιο άλλο στοιχείο. Μια τέτοια μετατροπή στοιχείου μπορεί να γίνει μόνο όταν αλλάξει ο αριθμός πρωτονίων του πυρήνα του ατόμου του, οπότε και διαφοροποιείται ο ατομικός αριθμός του στοιχείου.

Λίθιο: Μαλακό ασημί μέταλλο. Είναι το ελαφρότερο μέταλλο το οποίο τήκεται στους 180 βαθμούς Κελσίου και χρησιμοποιείται για την παραγωγή τριτίου και ως ψυκτικό υγρό στους αντιδραστήρες σύντηξης.

Νετρίνο Ηλεκτρονίου: Το νετρίνο είναι ένα υποατομικό σωματίδιο, που μοιάζει πολύ με το ηλεκτρόνιο, αλλά δεν έχει ηλεκτρικό φορτίο ενώ η μάζα του είναι πολύ μικρή, με πιθανότητα να είναι ακόμα και μηδενική. Τα σωματίδια γενικά που εμφανίζουν αυτή την ιδιότητα ονομάζονται λεπτόνια.

NTMs : Το NTM είναι μια μετασταθερή λειτουργία. σε ορισμένες διαμορφώσεις πλάσματος, μια επαρκώς μεγάλη παραμόρφωση του ρεύματος εκκίνησης που παράγεται από ένα "νησί σπόρων" και μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη του νησιού.

Παλμικός Μετασχηματιστής: Ο μετασχηματιστής είναι συσκευή η οποία μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια μεταξύ δύο κυκλωμάτων, διαμέσου επαγωγικά συζευγμένων ηλεκτρικών αγωγών.

Πηγή τροφοδοσίας : Μια ηλεκτρική συσκευή που παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε ένα ηλεκτρικό φορτίο. Η κύρια λειτουργία της είναι η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας στις σωστές προδιαγραφές τάσης, ρεύματος και συχνότητας της ενέργειας του ηλεκτρικού φορτίου.

Πρωτόνιο: Στοιχειώδες σωματίδιο που βρίσκεται στους πυρήνες όλων των ατόμων και φέρει θετικό ηλεκτρικό φορτίο.

Πλάσμα: Ιονισμένο αέριο. Στην περίπτωση μας, πρόκειται για αέριο, τα άτομα του οποίου διασπώνται σε θετικά ιόντα και ισάριθμα ηλεκτρόνια και κινούνται σαν ελεύθερα σωματίδια στο χώρο του πλάσματος, Ο Ήλιος αποτελείται από πλάσμα.

Πυρήνας: Το κεντρικό μέρος ενός ατόμου. Συγκροτείται από πρωτόνια και νετρόνια.

Συμβολομετρία: Η συμβολομετρία είναι μια τεχνική στην οποία ηλεκτρομαγνητικά κύματα συμβάλουν για να πάρουμε πληροφορίες για τα κύματα. Αν είναι σε φάση τα πλάτη προστίθενται (ενισχυτική συμβολή), ενώ αν έχουν διαφορά φάσης 180ο αλληλοεξουδετερώνονται (αποσβεστική συμβολή).

Σύντηξη: Η συγχώνευση δύο ατομικών πυρήνων σε ένα μεγαλύτερο με απώλεια μάζας. Η σύντηξη συνοδεύεται με έκλυση ενέργειας. Δες επίσης θερμοπυρηνική σύντηξη.

Σωματίδια βήτα: Είναι σωματίδια υψηλής ενέργειας, είτε ηλεκτρόνια υψηλής ταχύτητας ή ποζιτρόνια που εκπέμπονται από ορισμένες μορφές ραδιενεργών πυρήνων, όπως το κάλιο-40. Τα σωματίδια βήτα που εκπέμπονται, είναι μια μορφή ιονίζουσας ακτινοβολίας, επίσης γνωστή ως **ακτινοβολία βήτα**.

Tokamak: Συσκευή πλάσματος βασισμένη στο σοβιετικό πρότυπο. Το πλάσμα στο θάλαμο – που έχει σχήμα δακτυλιοειδούς κυλίνδρου (τόρου) – συγκρατείται με συνδυασμό δύο μαγνητικών πεδίων: αυτό που προέρχεται από τα γύρω από τον τόρο πηνία, και αυτό που προέρχεται από το ισχυρό ηλεκτρικό ρεύμα του πλάσματος, το οποίο επιπλέον χρησιμεύει για την θέρμανση του πλάσματος. Ο TFTR και ο JET είναι συσκευές tokamak.

Τοροειδές σύστημα: Έτσι ονομάζεται η οικογένεια των μαγνητικών συσκευών που οι μαγνητικές γραμμές είναι κλειστές, όπως για παράδειγμα στους tokamak και στους Stellarator.

Τρίτιο: Ραδιενεργό ισότοπο του υδρογόνου με ένα πρωτόνιο και δύο νετρόνια στον πυρήνα του γύρω από τον οποίο περιστρέφεται ένα ηλεκτρόνιο. Μαζί με το δευτέριο αποτελεί το καύσιμο του αντιδραστήρα σύντηξης.

Τυρβώδης Κατάσταση: Είδος κατάστασης που χαρακτηρίζεται από χαώδεις ή τυχαίες μεταβολές του πεδίου ροής αυτών. Δηλαδή μεταβλητές όπως πίεση και ταχύτητα, μεταβάλλονται απότομα και τυχαία για κάθε σημείο του χώρου που καταλαμβάνει το πεδίο κατάστασης κατά τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου.

Υδρογόνο: Το ελαφρότερο στοιχείο, τα άτομα του οποίου αποτελούνται από έναν πυρήνα με ένα πρωτόνιο. Τα ισότοπά του είναι το δευτέριο (που ο πυρήνας του έχει ένα επιπλέον νετρόνιο) και το τρίτιο (με δύο νετρόνια στον πυρήνα).

Υψίσυχνα ηλεκτρομαγνητικά πεδία: Ηλεκτρομαγνητικά πεδία που λειτουργούν ή παράγουν υψηλές συχνότητες.

Vde Institute: The independent and neutral VDE Testing and Certification Institute is a national and internationally accredited institution in the field of testing and certification of electrotechnical devices, components and systems. The electroproducts are tested for their safety, electromagnetic compatibility and other product characteristics. The VDE Institute headquartered in Offenbach was founded in 1920 and is responsible for the worldwide know-how. The results of the tests are scientifically evaluated and impact further developments of electrotechnical standards.

References– Bibliography

1. Άρθρα – Articles :

- ❖ Rebut, P.H. and Keen B.E. The JET experiment, evolution, present status and prospects.
- ❖ Bertolini, E., Mondino, P.L. and Noll, P. The JET machine design, construction and operation of the major systems.
- ❖ Van der Beken, H., Best, C.H., Fullard, K., Herzog, R.R., Jones, E.M., and Steed, C.A. CODAS: The JET control and data acquisition system.
- ❖ Millward, P., Ainsworth, A., Caldwell-Nichols, C.J., Lobel, R., and Hancock, C.J. Engineering aspects of JET diagnostic systems.
- ❖ Dean., J.R. and Raimondi, T. JET remote maintenance during active operation.
- ❖ Pamela, et al., The JET programme in support of ITER, Fusion Eng. Des. 82 (2007)
- ❖ I. Nunes, et al. Confinement and edge studies towards low β_{*} and β_{*} at JET, in: IAEA Fusion Energy Conf., Daejeon, 2010, Paper EXC/P 8-03.
- ❖ S. Saarelma et al, Phys. Plasmas 22 (2015) 056115
- ❖ P.B. Snyder et al, Phys. Plasmas 16 (2009) 056118
- ❖ P. Batistoni et al, Fusion Eng. Des. 89 (2014) 1-10
- ❖ O. Motojima, Nucl. Fusion 55, 104023 (2015).
- ❖ L.M. Giancarli et al., Fusion Eng. Des. 109–111, 1491 (2016).
- ❖ Έντυπο, Euratom «Έρευνα για την ελεγχόμενη σύντηξη, μια ενεργειακή επιλογή για το μέλλον της Ευρώπης», Γραφείο επίσημων εκδόσεων των Ευρωπαϊκών κοινοτήτων, Λουξεμβούργο.
- ❖ Μάξιμος Τσάλας, Στοιχεία Ηλεκτροδυναμικής και Εισαγωγή στο Πλάσμα, Σχολείο Φυσικής και Τεχνολογίας Σύντηξης, Βόλος.
- ❖ Λ. Βομβορίδης, Εισαγωγή στην Ελεγχόμενη Θερμοπυρηνική Σύντηξη, Σχολείο Φυσικής και Τεχνολογίας Σύντηξης, Βόλος.
- ❖ Θεοφάνης Γ. Γραμμένος, Εισαγωγή στην κλασική ηλεκτροδυναμική και το πλάσμα, 3ο Σχολείο Φυσικής και Τεχνολογίας Σύντηξης, Βόλος 2004.
- ❖ Kaname Ikeda, ITER Project Leader, Fusion Energy and ITER.

2. Βιβλία – Books :

- ❖ J. Wesson, The science of JET, IoP, 2006.
- ❖ I. H. Hutchinson, Principles of plasma diagnostics, Cambridge University Press, 2002.
- ❖ G. F. Matthews et al., Tokamak plasma diagnosis by electrical probes, Plasma Phys. Control. Fusion 36 (1994) 1595.
- ❖ Design Proposal for the Joint European Torus - EUR-JET-R5, European Commission, Luxembourg, 1973.
- ❖ P. Andrew, et al., Tritium recycling and retention in JET, J. Nucl. Mater. 266–269 (1999) 153–159.
- ❖ Roth, et al., Recent analysis of key plasma wall interaction issues in ITER, Nucl. Mater. 390–391 (2009) 1–9.
- ❖ F. Rimini, et al., First plasma operation of the enhanced JET vertical stabilization system, Fusion Eng. Des. 86 (2011) 539–543.
- ❖ J. Wesson. Tokamaks. 4th ed. New York: Oxford University Press, 2011.
- ❖ M. Kikuchi and K. Lackner. Fusion physics. Vienna: International - Atomic Energy Agency, 2012. isbn: 978-920-1304-100.
- ❖ K. Miyamoto. Plasma Physics for Controlled Fusion (Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics). Springer, 2016. isbn: 978-3-662-49781-4. [4] K. Crombe, ed.
- ❖ P. C. Stangeby. The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices. Series in Plasma Physics and Fluid Dynamics. Taylor & Francis, 2000. isbn: 9780750305594.
url:<https://books.google.cz/books?id=qOliQgAACAAJ>.
- ❖ P. H. Diamond and Y.-B. Kim. “Theory of mean poloidal flow generation by turbulence”. In: Physics of Fluids B: Plasma Physics 3.7 (1991), 1626–1633.
- ❖ Stephen Jardin. Computational methods in plasma physics. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis, 2010. isbn: 978-1-4398-1095-8.
- ❖ Je_rey P. Freidberg. Plasma physics and fusion energy. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 671 s. isbn: 978-0-521-85107-7 978-0-521-73317-5.
- ❖ Ioki, K., et. al., J. Nucl. Mat. 283-287 (2000) 957.
- ❖ Matsunami, N., et al., Univ. Nagoya, Inst. of Physics, Report IPPJ-AM-32 (1983).
- ❖ Davis, J.W., Haasz, A.A., J. Nucl. Mater. 241-243 (1997) 37.
- ❖ Roth, J., Bohdansky, J., Blewer, R.S., Ottenberger, W., Borders, J., J. Nucl. Mater. 85-86 (1979) 1077.
- ❖ G. De Temmerman et al, Efficiency of thermal outgassing for tritium removal in ITER Proc. 22nd Int. Conf. on Plasma Surface Int. in Cont. Fusion Devices (Rome, Italy) 2016

- ❖ S. Jachmich et al, Disruption mitigation experiments at JET in support of ITER in Proc. 22nd Int. Conf. on Plasma Surface Int. in Cont. Fusion Devices (Rome, Italy) 2016
- ❖ A.V. Chankin et al, Possible influence of near SOL plasma on the H-mode power threshold Proc. 22nd Int. Conf on Plasma Surface Int. Cont. Fusion Devices (Rome, Italy) 2016
- ❖ J. García et al, Challenges in the extrapolation from D-D to D-T plasmas: analysis and theory based predictions Invited talk at 43rd EPS Conf. on Plasma Physics (Leuven, Belgium, 2016) to appear in Plasma Phys. Contr. Fusion.
- ❖ Th. Eich et al, ELM divertor heat load scaling to ITER with data from JET, MAST and ASDEX Upgrade in Proc. 22nd Int. Conf. on PSI in Cont. Fusion Devices (Rome, Italy) 2016
- ❖ ITER Technical Basis, ITER EDA Documentation Series No. 24, IAEA, Vienna (2002).
- ❖ ITER Technology R&D, ITER Joint Central Team and Home Teams, Fusion Eng. Des. 55, 97 (2001).
- ❖ J.Wesson, Tokamaks, Oxford Science Publications, 1997.
- ❖ ITER, Energy for the Future, DG-Research of the EU Commission, 2002.
- ❖ Goran Ericsson, The ITER fusion energy project and its neutron diagnostics, Dept. Neutron Research, Uppsala University.
- ❖ J.Wesson, Tokamaks, Oxford Press, 2004.
- ❖ G.Janeschitz, A.Antipenkov, G.Federici, C.Ibbott, A.Kukushkin, P.Ladd, Em artin, R.Tivey, Divertor Design and its Integration into the ITER Machine.
- ❖ Harms & Miley, Principles of Fusion Energy, World Scientific, Hackensack, NJ: 2005.
- ❖ J.Marton, Production of Exotic Atoms, Institute for Medium Energy Physics, 23 May 2003.
- ❖ Gran R, Rossi MJ, Sobierajski F (1977) Plasma position control for TFTR using modern control theory. In: Proceedings of 17th symposium on engineering problems of fusion research, Knoxville
- ❖ Ariola M, Pironti A (2005) Plasma shape control for the JET Tokamak. IEEE Control System 25:65–75
- ❖ Ariola M et al (2008) Integrated plasma shape and boundary flux control on JET tokamak. Fusion Sci Technol 53:789–805
- ❖ Equipe TFR (1978) Tokamak plasma diagnostics. Nucl Fusion 18:647–731
- ❖ Wotton AJ (1979) Measurements of plasma shape in a Tokamak. Nucl Fusion 19:987–990
- ❖ Lazarus EA, Lister JB, Neilson GH (1990) Control of vertical instability in Tokamaks. Nuclear Fusion 30:111–141

3. Σχετικές ιστοσελίδες – Sites (URLs)

- ❖ <http://home.earthlink.net/~jimlux/nuc/reactions.htm>
- ❖ <http://home.earthlink.net/~jimlux/nuc/sigma.htm>
- ❖ http://ec.europa.eu/research/energy/fu/article_1122_en.htm
- ❖ <http://www.iter.org>
- ❖ <http://www.fusion-eur.org>
- ❖ <http://www.efda.org>
- ❖ http://www.europa.eu.int/comm/research/energy/inex_en.htm
- ❖ <http://www.hellasfusion.gr>
- ❖ www.cc.uoa.gr/~dfassoul/Syghroni_fysiki.html
- ❖ <http://www.physics4u.gr>
- ❖ <http://www.ppppl.gov>
- ❖ <http://www.fusion.org.uk>
- ❖ <http://www.euroforum.org>
- ❖ <http://www.llnl.gov/nif>
- ❖ <http://fusedweb.llnl.gov/CPEP>
- ❖ www.kek.jp
- ❖ www.kayelaby.npl.co.uk

Units Used in Plasma Physics

In this chapter we summarize the dimensions of the most common quantities involved in the electromagnetic and plasma physics fields (Table C.2). We refer to the International System (SI) nomenclature, which is based on the units reported in Table C.1.

Table C.1 The International System (SI) base units

Physical quantities	Symbol for quantities	Name of unit	Symbol for Unit
Length	l	Metre	m
Mass	m	Kilogram	kg
Time	t	Second	s
Current	I, i	Ampere	A
Temperature	T	Kelvin	K
Amount of substance		Mole	mol
Luminous intensity		Candela	cd

Table C.2 Units of some physical quantities encountered in plasma physics

Physical quantity	Symbol	Dimensions	SI units	Comment
Capacitance	C	$\frac{t^2 q^2}{ml^2}$	Farad (F)	
Charge	q	q	Coulomb (C)	
Charge density	ρ	$\frac{q}{l^3}$	C/m ³	
Conductance		$\frac{t q^2}{ml^2}$	Siemens (S)	

Physical quantity	Symbol	Dimensions	SI units	Comment
Conductivity	σ	$\frac{tq^2}{ml^3}$	S/m	
Current	I, i	$\frac{q}{t}$	Ampere (A)	
Current density	J, j	$\frac{q}{l^2t}$	A/m ²	
Displacement	D	$\frac{q}{l^2}$	C/m ²	$D = \epsilon E$
Electric field	E	$\frac{ml}{t^2q}$	V/m	
Energy	U, W	$\frac{ml^2}{t^2}$	Joule (J)	Electronvolt (eV) is also used; 1eV \simeq 1.60 \times 10 ⁻¹⁹ J
Inductance	L	$\frac{ml^2}{q^2}$	Henry (H)	
Magnetic intensity	H	$\frac{q}{lt}$	A/m	$B = \mu H$
Magnetic flux	ϕ, ψ	$\frac{ml^2}{tq}$	Weber (Wb)	$\psi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$
Magnetic induction	B	$\frac{m}{tq}$	Tesla (T)	Gauss (G) is also used; 1G = 10 ⁻⁴ T
Permeability	μ	$\frac{ml}{q^2}$	H/m	In plasma $\mu \simeq \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Hm ⁻¹
Permittivity	ϵ	$\frac{t^2q^2}{ml^3}$	F/m	In plasma $\epsilon \simeq \epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}$ Fm ⁻¹
Potential	V	$\frac{ml^2}{t^2q}$	Volt (V)	
Power	P	$\frac{ml^2}{t^3}$	Watt (W)	
Resistance	R	$\frac{ml^2}{tq^2}$	Ohm (Ω)	
Resistivity	η, ρ	$\frac{ml^3}{tq^2}$	Ω m	
Magnetic vector potential	A	$\frac{ml}{tq}$	Wb/m	$B = \nabla \times A$

Dimensions are expressed in SI base units where l = length in metres, m = mass in kg, and t = time in seconds