



Διπλωματική Εργασία

**Βιβλιογραφική
ανασκόπηση πυρηνικής
σύντηξης για την
παραγωγή ενέργειας**

Ιούλιος 2024

Ιωάννης Αποστόλου

Εξεταστική επιτροπή

Επιβλέπων : Γεώργιος Σ. Ατσαλάκης, Αναπληρωτής
Καθηγητής

1^ο μέλος : Ζοπουνίδης Κων/νος, Καθηγητής

2^ο μέλος : Ιψάκης Δημήτρης, Επίκουρος Καθηγητής

Περίληψη

Ένα βασικό χαρακτηριστικό της σημερινής εποχής είναι η ανάγκη παροχής ενέργειας από πηγές με μικρό κόστος και μικρή επίπτωση στο περιβάλλον. Ο πληθυσμός της γης αυξάνεται, οι ορυκτοί πόροι εξαντλούνται, οι υπάρχουσες μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν επαρκούν και παρουσιάζουν υψηλά κόστη.

Μία μορφή ενέργειας που τα τελευταία χρόνια συγκεντρώνει όλο και μεγαλύτερο ερευνητικό και επενδυτικό ενδιαφέρον είναι η πυρηνική σύντηξη. Η πυρηνική σύντηξη είναι η ενέργεια που τροφοδοτεί τον ήλιο και όλους τους αστέρες και η επίτευξή της στη Γη βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Η εξάρτησή της από ανεξάντλητους πόρους και οι ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις έχουν τη δυνατότητα να δημιουργήσουν έναν πόρο που καθοδηγείται από την τεχνολογία. Μια μονάδα παραγωγής ενέργειας σύντηξης είναι ουσιαστικά μια θερμική μονάδα με στόχο την αξιοποίηση της θερμικής για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Με σκοπό την επίτευξη μιας τέτοιας μονάδας στο άμεσο μέλλον, πολλά κράτη παγκοσμίως, κάποια από τα οποία βρίσκονται και σε συνεργασία, λειτουργούν πειραματικούς αντιδραστήρες σύντηξης. Στη συγκεκριμένη εργασία περιγράφονται αναλυτικά κάποια από τα σημαντικότερα πειραματικά προγράμματα σύντηξης παγκοσμίως, με μεγαλύτερη έμφαση να δίνεται στο πρόγραμμα ITER, συνεργασία 35 κρατών που βρίσκεται στη Γαλλία, και στην εγκατάσταση NIF (National Ignition Facility) που βρίσκεται στην Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών.

Αυτός είναι και ο στόχος της παρούσας εργασίας, μια ολοκληρωμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση της σημερινής κατάστασης και της εξέλιξης των σημαντικότερων πειραματικών προγραμμάτων σύντηξης με αναλυτική τεχνική ανάλυση και σύγκριση των χαρακτηριστικών τους. Παράλληλα, γίνεται και η σύνδεση της πυρηνικής σύντηξης με το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής και πραγματοποιείται επιπλέον μια οικονομική ανάλυση σχετικά με το κόστος των μελλοντικών αντιδραστήρων και της μελλοντικής ηλεκτρικής ενέργειας σύντηξης.

Λέξεις κλειδιά : πυρηνική σύντηξη, αντιδραστήρας σύντηξης, διάταξη tokamak, διάταξη stellarator, μαγνητικός περιορισμός πλάσματος, αδρανειακός περιορισμός πλάσματος, ITER, ανάφλεξη σύντηξης, NIF

Abstract

A key feature of today's world is the need to provide energy from sources with low cost and low impact on the environment. The world's population is growing, fossil resources are depleting, existing non-renewable energy sources are insufficient and have high costs.

One form of energy that has attracted increasing research and investment interest in recent years is nuclear fusion. Nuclear fusion is the energy that powers the sun and all the stars, and its achievement on Earth is still at an experimental stage. Its dependence on inexhaustible resources and minimal environmental impact has the potential to create a technology-driven resource. A fusion power plant is essentially a thermal power plant with the goal of harnessing heat to generate electricity.

With a view to achieving such a plant in the near future, many countries around the world, some of which are in cooperation, are operating experimental fusion reactors. This paper describes in detail some of the most important experimental fusion projects worldwide, with the main emphasis on the ITER project, a collaboration of 35 countries located in France, and the NIF (National Ignition Facility) located in California, United States.

This is the goal of this paper, a comprehensive literature review of the current status and evolution of the most important experimental fusion programmes with a detailed technical analysis and comparison of their characteristics. At the same time, a link between nuclear fusion and the climate change phenomenon is made and an economic analysis of the costs of future fusion reactors and future fusion electricity is also carried out.

Key words : nuclear fusion, fusion reactor, tokamak device, stellarator device, magnetic plasma confinement, inertial confinement plasma, ITER, fusion ignition, NIF

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.1 Ανάγκη για Ενέργεια	6
1.2 Ιστορική Αναδρομή Πυρηνικής Σύντηξης.....	11
1.3 Βασικά πυρηνικής σύντηξης.....	13
1.3.1 Χημικές Αντιδράσεις	13
1.3.2 Προσεγγίσεις της σύντηξης	15
1.3.2.1 Μαγνητικός περιορισμός (magnetic confinement).....	15
Διάταξη tokamak.....	15
Διάταξη stellarator	17
1.3.2.2 Αδρανειακός περιορισμός (inertial confinement).....	18
1.4 Παραγωγή Ενέργειας	19
1.5 Σκοπός.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΣΥΝΤΗΞΗΣ	20
2.1 Περιγραφή.....	21
2.2 Αντιδραστήρες tokamak	21
2.2.1 ITER PROJECT.....	21
2.2.2 Ο EU DEMO και η σύνδεσή του με τον ITER.....	25
2.2.3 Joint European Torus (JET)	29
2.2.4 JT-60SA PROJECT	31
2.2.5 T-15MD tokamak.....	37
2.2.6 EAST PROJECT.....	39
2.2.7 CFETR PROJECT	42

2.2.8 KSTAR PROJECT.....	44
2.2.9 SST-1 tokamak.....	47
2.3 Αντιδραστήρες stellarator	49
2.3.1 WENDELSTEIN 7-X STELLARATOR.....	49
2.4 Η πρόοδος του αδρανειακού περιορισμού στις ΗΠΑ.....	52
2.4.1 NIF PROJECT	52
2.4.2 Το μεγάλο επίτευγμα του NIF	55
2.4.2.1 Το φαινόμενο της ανάφλεξης (ignition)	56
2.4.2.2 Η ανάφλεξη στο πείραμα του Δεκεμβρίου 2022	57
2.4.2.3 Η σύνδεση του επιτεύγματος του NIF με το μέλλον της ενέργειας σύντηξης	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΤΕΧΝΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΗΜΕΡΙΝΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	
ΣΥΝΤΗΞΗΣ ΚΑΙ ΟΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ 61	
3.1 Περιγραφή.....	61
3.2 Σύγκριση αντιδραστήρων tokamak παρόμοιων με τον ITER.....	62
3.3 Σύγκριση του stellarator Wendelstein 7-X με τους tokamaks	68
3.4 Σύγκριση των πιο εξελιγμένων αντιδραστήρων	69
3.5 Οικονομική ανάλυση	73
3.5.1 Οικονομικό κόστος μελλοντικών αντιδραστήρων σύντηξης.....	73
3.5.2 Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας σύντηξης.....	77
3.6 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα.....	79
3.6.1 Περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα της σύντηξης	79
3.6.2 Διαχείριση των αποβλήτων των αντιδραστήρων σύντηξης.....	80
3.6.2.1 Είδη αποβλήτων σύντηξης.....	80

3.6.3 Επιλογές διαχείρισης των ραδιενεργών αποβλήτων σύντηξης.....	81
3.6.3.1 Απόρριψη ραδιενεργών αποβλήτων σύντηξης	81
3.6.3.2 Ανακύκλωση ραδιενεργών αποβλήτων σύντηξης	82
3.6.3.3 Εκκαθάριση ραδιενεργών αποβλήτων σύντηξης	83
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	83
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	85

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ανάγκη για Ενέργεια

Είναι κοινώς αποδεκτό ότι η παροχή ενέργειας από πηγές με μικρό κόστος και μικρή επίπτωση στο περιβάλλον θα αποτελέσει το πιο σημαντικό ζήτημα που θα απασχολήσει τον πλανήτη τον 21^ο αιώνα. Η συνεχόμενη αύξηση του πληθυσμού σε συνδυασμό με τη μείωση των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αναμένεται να προκαλέσουν σημαντική αύξηση στη ζήτηση για ηλεκτρισμό και άλλες μορφές ενέργειας στο άμεσο μέλλον (Horvath ; Rachlew, 2016).

Παράλληλα, οι κυβερνήσεις προσπαθούν να στραφούν σε μορφές ενέργειας φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς οι πόροι ορυκτών καυσίμων ,που χρησιμοποιούνται κατά το πλείστον για παραγωγή ενέργειας σήμερα, είναι η βασική αιτία για την υπερθέρμανση του πλανήτη και την κλιματική αλλαγή (Hayat S. et al. , 2023).

Έτσι, πολλές κυβερνήσεις πραγματοποιούν σήμερα σημαντικές επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια. Ωστόσο, ο περιοδικός χαρακτήρας αυτών των πηγών, σε συνδυασμό με την απουσία αποτελεσματικών επιλογών αποθήκευσης αλλά και της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας, περιορίζει τον βαθμό στον οποίο αυτές οι ανανεώσιμες πηγές μπορούν να συμβάλουν στο συνολικό ενεργειακό μείγμα (Διάγραμμα 3) (Trainer, 2017).

Εκτός από αυτούς τους παράγοντες, φαίνεται ότι το κόστος μετάβασης στην πράσινη ενέργεια είναι τεράστιο, καθώς δεν υπάρχει μια κοινή παγκόσμια πολιτική αντιμετώπισης της ενεργειακής κρίσης. Για παράδειγμα, στην Ευρώπη οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρουσιάζουν μεγάλη εκθετική αύξηση τα τελευταία χρόνια (Διάγραμμα 1) και ακολουθούνται αυστηρές περιβαλλοντικές πολιτικές, όμως οι χώρες της Ε.Ε αντιμετωπίζουν αυξανόμενο κόστος παραγωγής λόγω των ακριβών

υποδομών ηλεκτροποίησης και των κοστοβόρων δικτύων μεταφοράς ενέργειας .Στον αντίποδα , υπερδυνάμεις όπως η Κίνα αλλά και άλλες χώρες της Ασίας που στηρίζονται στη βιομηχανία και στις εξαγωγές σε Ευρώπη και ΗΠΑ, παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη κατανάλωση άνθρακα παγκοσμίως (Διάγραμμα 2). Το εμπορικό πλεόνασμα της Κίνας σε σχέση με την Ε.Ε και τις ΗΠΑ είναι μεγάλο και αυξάνεται τα τελευταία χρόνια, επομένως είναι πολύ δύσκολο να στραφεί προς την πράσινη μετάβαση τη στιγμή που παρουσιάζει τόσο μεγάλα κέρδη χωρίς επιπτώσεις.

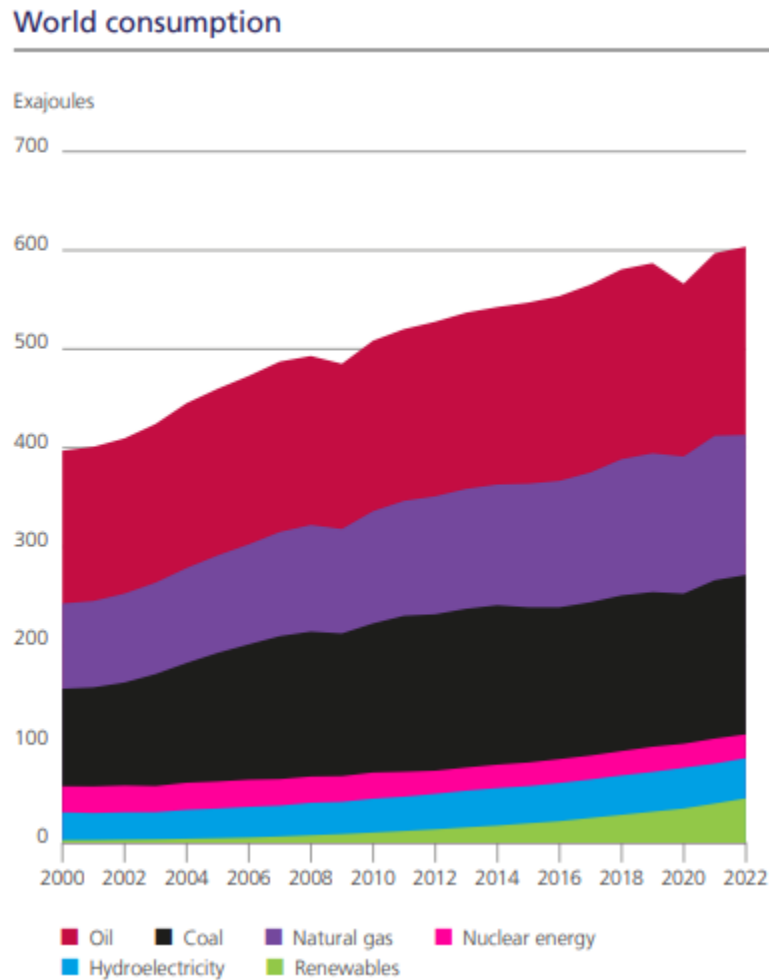
(Πηγή ιστοσελίδα : <https://www.energia.gr/article/213486/energeiakos-shediasmos-kai-athemitos-antagonismos>) .

Από την άλλη πλευρά, η πυρηνική ενέργεια, που προέρχεται από την πυρηνική σχάση, αποτελεί μια πολύτιμη επιλογή που ήδη χρησιμοποιείται σε ένα ποσοστό από τις αναπτυγμένες χώρες, καθώς έχει τη δυνατότητα να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη για πολλούς αιώνες. Ωστόσο, υπάρχουν σοβαρές ανησυχίες για την εξάπλωση των πυρηνικών και θέματα ασφαλείας όπως η μεγάλη προσοχή που απαιτείται στο χειρισμό των πυρηνικών αποβλήτων. Πολλές από αυτές τις προκλήσεις διαθέτουν τεχνικές λύσεις, αλλά η επίλυσή τους μπορεί να έχει σημαντικές οικονομικές, πολιτικές και κοινωνικές συνέπειες. Κατά συνέπεια, ο βαθμός στον οποίο οι ενεργειακές ανάγκες μπορούν να καλυφθούν μέσω της πυρηνικής σχάσης παραμένει αβέβαιος (Kikuchi M. , 2002).

Παρατηρείται στο Διάγραμμα 1 η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας σε exajoules από το 2000 και μετά. Παρά την αύξηση χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές όπως πυρηνική ενέργεια, υδροηλεκτρισμός και άλλες πηγές, η κατανάλωση πετρελαίου, κάρβουνου και φυσικού αερίου είναι και αυτή σε αύξηση.

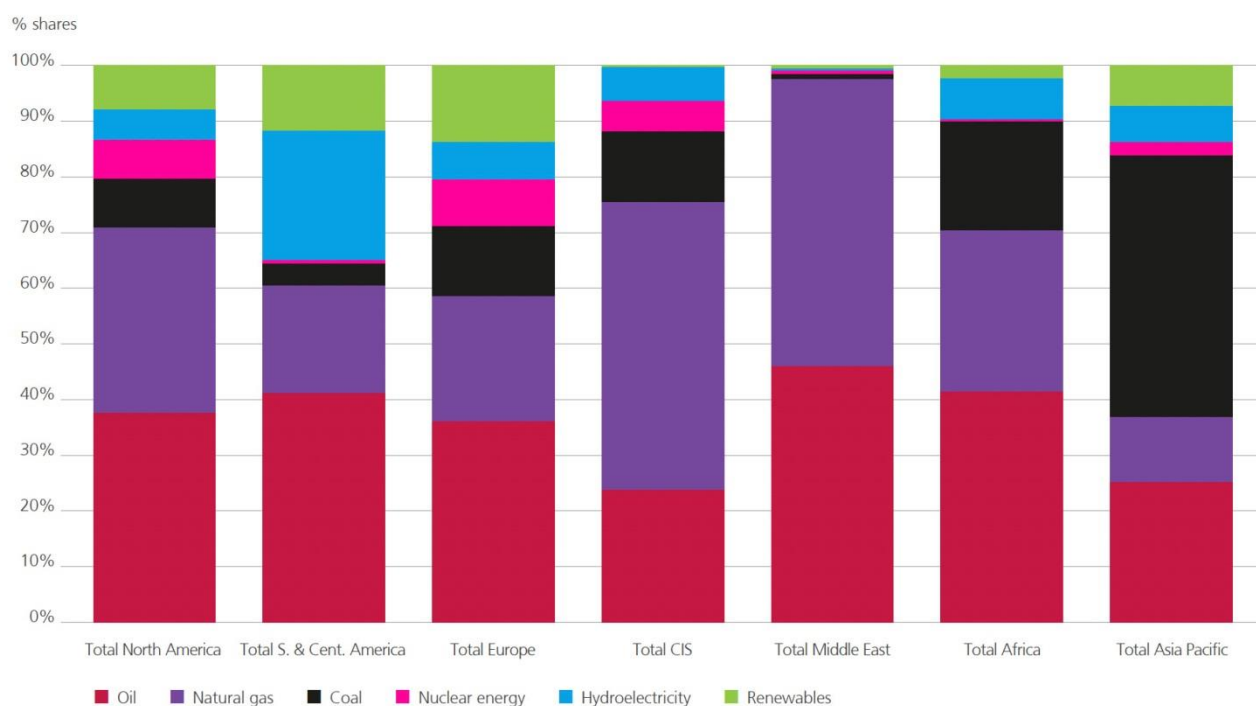
Για το έτος 2023, η παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας πέτυχε νέο ρεκόρ για δεύτερη συνεχόμενη χρονιά, με τα ορυκτά καύσιμα να αποτελούν το 84% του ενεργειακού μείγματος. Στο Διάγραμμα 3 παρατηρείται το παγκόσμιο ενεργειακό

μείγμα για το 2023 με μονάδα μέτρησης τα Exajoules. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας φαίνεται ότι εξακολουθούν να αποτελούν μικρό τμήμα της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας.

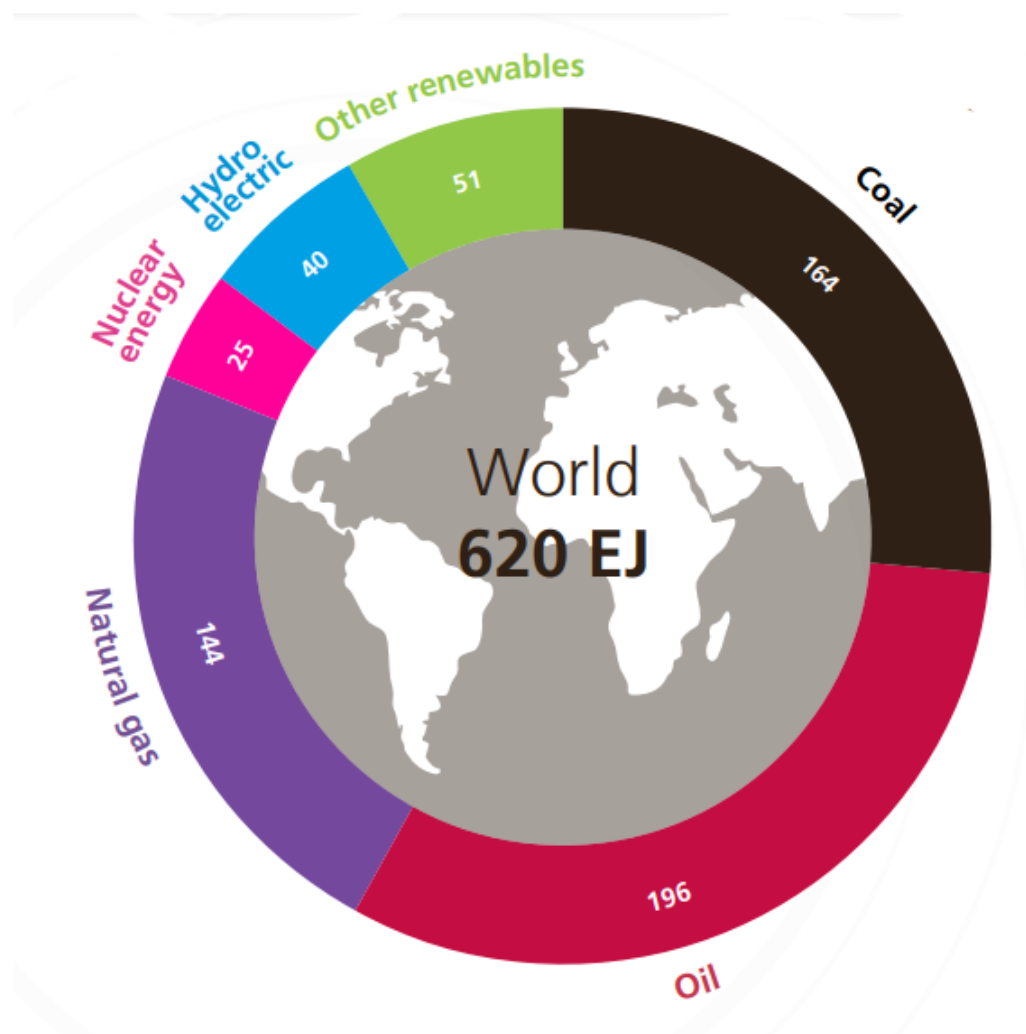


Διάγραμμα 1. Κατάταξη πηγών ενέργειας παγκοσμίως από το 2000 μέχρι το 2022 με βάση την παγκόσμια κατανάλωση σε exajoules (Πηγή : EI Statistical Review of World Energy June 2023)

Regional consumption pattern 2022



Διάγραμμα 2. Το ενεργειακό μείγμα σε ποσοστά για διάφορες περιοχές του πλανήτη
(Πηγή :EI Statistical Review of World Energy June 2023)



Διάγραμμα 3. Το παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα του 2023 μετρούμενο σε Exajoules.
(Πηγή :EI Statistical Review of World Energy June 2024).

Υπάρχει ωστόσο και άλλη μια μορφή ενέργειας ,η ενέργεια πυρηνικής σύντηξης, που χρησιμοποιεί μη ανανεώσιμους πόρους όπως το λίθιο και το δευτέριο και στοχεύει να φέρει επανάσταση στο πρότυπο του ενεργειακού εφοδιασμού. Η εξάρτησή της από

ανεξάντλητους πόρους και οι ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις έχουν τη δυνατότητα να δημιουργήσουν έναν πόρο που καθοδηγείται από την τεχνολογία. Η μετατόπιση αυτή θα μπορούσε να οδηγήσει σε απεριόριστη προσαρμοστικότητα και δυνητική μείωση του κόστους παραγωγής με την πρόοδο της τεχνολογίας. Φυσικά η πυρηνική σύντηξη βρίσκεται ακόμα σε πειραματικό στάδιο αλλά τα πιθανά ενεργειακά της οφέλη σε συνδυασμό με τη μικρή επιβάρυνση του περιβάλλοντος αλλά και τη μεγαλύτερη ασφάλεια που παρέχει σε σύγκριση με την πυρηνική σχάση την καθιστούν πολύ ελκυστική λύση στο ενεργειακό πρόβλημα της ανθρωπότητας (Sánchez, 2014).

1.2 Ιστορική Αναδρομή Πυρηνικής Σύντηξης

Η πυρηνική σύντηξη ως έννοια, ξεκίνησε αρχικά να ερευνάται από φυσικούς που μελετούσαν τι συμβαίνει στους πυρήνες των αστερών τις δεκαετίες του 1920 και 1930. (Atkinson and Houtermans, 1929; Oliphant et al., 1934; Bethe, 1939). Τα επόμενα χρόνια η πυρηνική σύντηξη ήταν το αντικείμενο μελέτης για την αξιοποίησή της στην κατασκευή ατομικών όπλων από τις ΗΠΑ και τη Σοβιετική Ένωση. Εκείνη την περίοδο αποτελούσε απόρρητο ζήτημα από αυτές τις κυβερνήσεις και το ευρύ κοινό δε μάθαινε λεπτομέρειες και εξελίξεις πάνω στο θέμα, κάτι που άλλαξε το 1958, στο Δεύτερο Συνέδριο των Ηνωμένων Εθνών για τις Ειρηνικές Χρήσεις της Ατομικής Ενέργειας, που έλαβε χώρα στη Γενεύη της Ελβετίας (Prager, 2019). Αυτό το συνέδριο έθεσε τις βάσεις για την έναρξη της παγκόσμιας συνεργασίας και της Παγκόσμιας Αντιπροσωπείας Ατομικής Ενέργειας (IAEA). Εκεί έγινε η παρουσίαση τεσσάρων διαφορετικών σχεδίων για τη λειτουργία θερμοπυρηνικών αντιδραστήρων σύντηξης : του tokamak, του pinch, του μαγνητικού καθρέφτη (magnetic mirror) και του stellarator. Παράλληλα, ιδρύθηκε μια διεθνής επιστημονική εφημερίδα (Nuclear Fusion) και καθιερώθηκε το Συνέδριο για την Ενέργεια Σύντηξης (FEC) στο οποίο ανακοινώνονταν οι ερευνητικές εξελίξεις κάθε λίγα χρόνια.

Επόμενη σημαντική ημερομηνία είναι το 1968, με τα πρώτα αισιόδοξα πειραματικά αποτελέσματα από το σοβιετικό αντιδραστήρα T-3 tokamak που παρουσίασε την υψηλότερη απόδοση ενέργειας εκείνη την εποχή, δίνοντας το έναυσμα σε Ευρώπη, ΗΠΑ και Ιαπωνία να εκκινήσουν τα δικά τους προγράμματα tokamak.

Στη δεκαετία του 1970, κατόπιν επικοινωνίας μεταξύ πολλών κρατών, αποφασίστηκε να γίνει μια συλλογική προσπάθεια για την ανάπτυξη της ενέργειας σύντηξης και έτσι το 1979 δημιουργήθηκε το σχέδιο INTOR, ώστε να γίνουν οι πρώτες δοκιμαστικές έρευνες που θα οδηγούσαν σε μια μελλοντική κατασκευή ενός πειραματικού αντιδραστήρα πυρηνικής σύντηξης.

Το 1982 πραγματοποιήθηκε μία από τις σημαντικότερες ανακαλύψεις στην ιστορία της έρευνας σύντηξης στον αντιδραστήρα ASDEX tokamak της Γερμανίας με τον περιορισμό πλάσματος να διπλασιάζεται σε ακραία υψηλές θερμοκρασίες. Ακολούθησε, κατά τη διάρκεια του ψυχρού πολέμου, συνάντηση στη Γενεύη των δύο ηγετών των ΗΠΑ και της Σοβιετικής Ένωσης οι οποίοι προέτρεψαν ,χάρη στην επιτυχία του ITOR, την ανάπτυξη διεθνούς συνεργασίας για την εξέλιξη της ενέργειας πυρηνικής σύντηξης προς όφελος όλης της ανθρωπότητας. Έτσι, το 1988, στη Βιέννη, αποφασίστηκε από τις δύο μεγάλες δυνάμεις σε συνεργασία με την Ευρώπη και την Ιαπωνία, η έναρξη του πρότζεκτ του Διεθνούς Θερμοπυρηνικού Πειραματικού Αντιδραστήρα (ITER).

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, έγιναν πολλές πειραματικές προσπάθειες από τις χώρες που βρίσκονταν σε συνεργασία, με σκοπό να ερευνηθεί αν αυτό το έργο είναι εφικτό. Τα αποτελέσματα ήταν αισιόδοξα με την παραγωγή αξιοσημείωτων ποσών ενέργειας από τους πειραματικούς αντιδραστήρες και για αυτό το λόγο αποφασίστηκε εν τέλει το 2005 να κατασκευαστεί ο ITER στη Γαλλία. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 2010 και βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη (Barbarino, 2020).

Τον Άυγουστο του 2021, στο National Ignition Facility (NIF) στην Καλιφόρνια αποδείχτηκε σε πείραμα ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί ανάφλεξη πλάσματος , μία σημαντική διαδικασία για την επίτευξη σύντηξης, σκορπίζοντας αισιοδοξία στην επιστημονική κοινότητα (Clery, 2021; Abu-Shawareb et al., 2022).

Το μεγαλύτερο επίτευγμα στην ιστορία της πυρηνικής σύντηξης πραγματοποιήθηκε στις 5 Δεκεμβρίου του 2022 στο National Ignition Facility (NIF) στην Καλιφόρνια(Clery, 2022). Σε αυτό το πείραμα επιτεύχθηκε για πρώτη φορά ανάφλεξη σύντηξης, με παραγωγή μεγαλύτερου ποσού ενέργειας από την πειραματική συσκευή από αυτή που καταναλώθηκε για την έναρξη της διαδικασίας. (Danson-Gizzi, 2023).

Σήμερα, η επιτυχία του NIF έχει κινήσει το ενδιαφέρον επενδυτών αλλά και νεοσύστατων εταιρειών να επενδύσουν στην πυρηνική σύντηξη ώστε να γίνει μια βιώσιμη εμπορική πηγή ενέργειας (Kramer, 2023). Παράλληλα στο ITER, τα πρώτα πειράματα αναμένεται να ξεκινήσουν το 2025 και η επίτευξη της πρώτης πλήρης σύντηξης το 2035 (Prager, 2019).

1.3 Βασικά πυρηνικής σύντηξης

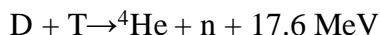
1.3.1 Χημικές Αντιδράσεις

Η πυρηνική σύντηξη είναι μια αντίδραση που τροφοδοτεί ενεργειακά τον ήλιο αλλά και όλα τα αστέρια. Αποτελεί τη συνένωση ελαφριών στοιχείων, ώστε αυτά να συντηχθούν και να σχηματίσουν βαρύτερα στοιχεία. Τα προκύπτοντα βαρύτερα στοιχεία έχουν ελαφρώς μικρότερη μάζα από τα στοιχεία που συντήχθηκαν και αυτή η διαφορά μάζας έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση ενέργειας. Για να πραγματοποιηθεί η σύντηξη, θα πρέπει δύο πυρήνες να ξεπερνούν την απωστική ηλεκτροστατική δύναμη που τους κρατάει χωριστά και έτσι να σχηματίσουν έναν ή

περισσότερους νέους πυρήνες και υποατομικά σωματίδια. Για την απελευθέρωση σημαντικού ποσού ενέργειας, επιλέγονται σχετικά ελαφριοί αρχικοί πυρήνες (μέχρι ^{56}Fe και ^{62}Ni), καθώς αυτοί έχουν υψηλή ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο (Kikuchi M. , 2002).

Στον Ήλιο, οι τεράστιες βαρυτικές δυνάμεις δημιουργούν τις κατάλληλες συνθήκες για σύντηξη, αλλά στη Γη είναι πολύ πιο δύσκολο να επιτευχθούν. Στον πλανήτη μας δε μπορούμε να βασιστούμε σε τόσο ισχυρές βαρυτικές δυνάμεις, οπότε θα πρέπει να αναζητήσουμε πιο προσιτές αντιδράσεις, αν και ακόμα είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθούν. Η αντίδραση σύντηξης με μεγαλύτερη διατομή υπό λογικά εφικτές συνθήκες είναι η σύντηξη του δευτερίου (D) με το τρίτιο (T), δύο ισοτόπων του υδρογόνου. Η αντίδραση παράγει ως αποτέλεσμα έναν πυρήνα ηλίου και ένα νετρόνιο και απελευθερώνει 17,6 MeV (mega electron volt) ενέργειας (91.000 kWh ανά γραμμάριο καυσίμου). Από αυτή την ενέργεια, το 80% μεταφέρεται από το νετρόνιο και το 20% από τον πυρήνα του ηλίου (Sánchez, 2014).

Χημική Αντίδραση δευτερίου-τρίτιου :



Εκτός από την αντίδραση δευτερίου-τρίτιου που είναι η πιο ευνοϊκή, μελετώνται και άλλες αντιδράσεις σύντηξης (δευτέριο με δευτέριο, δευτέριο με ήλιο, πρωτόνιο με βόριο) κάποιες από τις οποίες έχουν στόχο την αποφυγή νετρονίων στα προϊόντα. Οι τέσσερις πιο σημαντικές αντιδράσεις σύντηξης είναι οι εξής :

- 1) $\text{D} + \text{T} \rightarrow {}^4\text{He} (3.5 \text{ MeV}) + \text{n} (14.1 \text{ MeV})$
- 2) $\text{D} + \text{D} \rightarrow \text{T} (1.01 \text{ MeV}) + \text{p} (3.02 \text{ MeV}) (50\%)$
 $\rightarrow {}^3\text{He} (0.82 \text{ MeV}) + \text{n} (2.45 \text{ MeV}) (50\%)$
[ισοπίθανες αντιδράσεις]
- 3) $\text{D} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} (3.6 \text{ MeV}) + \text{p} (14.7 \text{ MeV})$
- 4) $\text{p} + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3{}^4\text{He} + 8,7 \text{ MeV}$ (Kikuchi M. , 2002)

1.3.2 Προσεγγίσεις της σύντηξης

Το βασικό εμπόδιο της σύντηξης ως μιας δυνητικής πηγής ενέργειας είναι η δυσκολία να πραγματοποιηθεί και να διατηρηθεί η αντίδραση. Για να διατηρηθούν οι αντιδράσεις σύντηξης, τα αντιδρώντα θα πρέπει να βρίσκονται σε κατάσταση πλάσματος. Η έννοια του πλάσματος είναι θεμελιώδης στη μηχανική σύντηξης. Το όνομα του πλάσματος αποδίδεται σε ένα ιονισμένο αέριο, που συμπεριφέρεται με ηλεκτρική και μαγνητική αλληλεπίδραση μεγάλης εμβέλειας. Για επιτυχημένη σύντηξη απαιτείται η δημιουργία πλάσματος από αντιδρώντα σύντηξης σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες και πυκνότητες. Επιπλέον, απαιτείται ο περιορισμός αυτού του πλάσματος για μια σημαντική διάρκεια, απομονωμένο από τα περιβάλλοντα υλικά τοιχώματα (Kikuchi M. , 2002).

Οι δύο βασικές και πιο μελετημένες προσεγγίσεις για τον περιορισμό του πλάσματος είναι ο μαγνητικός περιορισμός και ο αδρανειακός περιορισμός.

1.3.2.1 Μαγνητικός περιορισμός (magnetic confinement)

Στη σύντηξη με μαγνητικό περιορισμό, χρησιμοποιούνται ισχυρά μαγνητικά πεδία για να συγκρατήσουν το καυτό πλάσμα. Η πρόοδος στην έρευνα και την ανάπτυξη της σύντηξης με μαγνητικό περιορισμό έχει οδηγήσει στην εμφάνιση διαφόρων διατάξεων περιορισμού με σημαντικότερες έννοιες να είναι οι tokamak και stellarator (Ongena et al., 2016).

Διάταξη tokamak

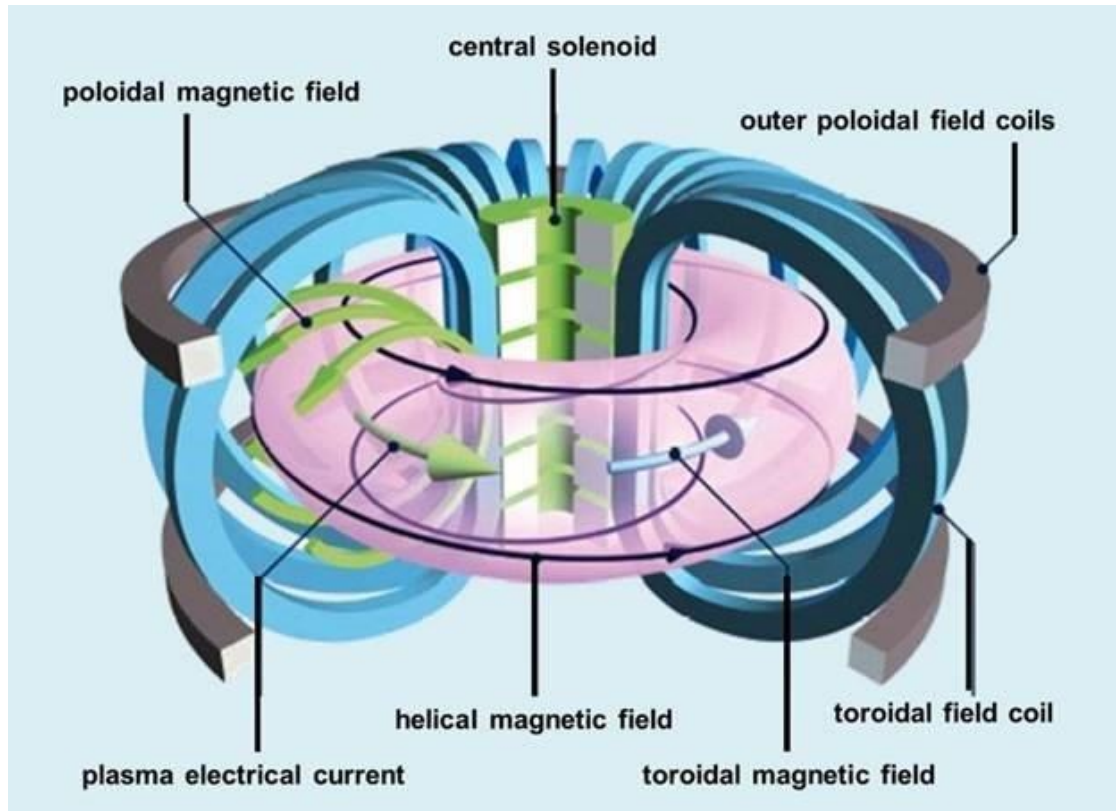
Οι συσκευές tokamak ξεκίνησαν να μελετώνται από τη δεκαετία του 1950 (H. P. Furth , 1975). Σε ένα tokamak, το πλάσμα διαμορφώνεται σε σχήμα ενός τόρου ή πιο απλοϊκά ενός λουκουμά χάρη σε ένα ειδικά σχεδιασμένο

μαγνητικό πεδίο (τοροειδές μαγνητικό πεδίο) που αποτελείται ένα σωληνοειδές σύνολο πηνίων που μοιάζουν με δακτύλιο. Οι διαστάσεις των πηνίων μπορούν να φτάσουν σε πολύ μεγάλα μεγέθη ανάλογα με το μέγεθος της μηχανής. Το πλάσμα διαμορφώνεται επίσης και από ένα ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το ίδιο το πλάσμα σχηματίζοντας ένα πολωτικό μαγνητικό πεδίο. Η χρήση ηλεκτρικού ρεύματος για εξωτερική κίνηση προσφέρει τη δυνατότητα λειτουργίας ενός σταθμού παραγωγής ενέργειας σταθερής κατάστασης με βάση tokamak. Ωστόσο, για την εφαρμογή αυτή είναι απαραίτητη η βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων εξωτερικής κίνησης ρεύματος. Εναλλακτικά, το ρεύμα που διαρρέει το πλάσμα μπορεί να παραχθεί από ένα κεντρικό σωληνοειδή που είναι τοποθετημένος στη μέση της διάταξης. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζονται τα βασικά εξαρτήματα ενός tokamak. Φαίνονται τα πηνία τοροειδούς πεδίου (με μπλε χρώμα), ο κεντρικός σωληνοειδής (με πράσινο χρώμα) και τα πηνία πολωειδούς πεδίου (με γκρι χρώμα). Το συνολικό μαγνητικό πεδίο (με μαύρο χρώμα) γύρω από τον τόρο περιορίζει τη διαδρομή κίνησης των φορτισμένων σωματιδίων πλάσματος.

Οι αντιδραστήρες tokamak αποτελούν τον πιο υποσχόμενο υποψήφιο για την πρώτη γενιά αντιδραστήρων πυρηνικής σύντηξης. Πάνω στην ιδέα του tokamak έχει βασιστεί και το project ITER στη Γαλλία.

Ωστόσο, τα πλάσματα tokamak παρουσιάζουν ασταθή συμπεριφορά όταν δε λειτουργούν εντός ορισμένων ορίων (π.χ πυκνότητας, ρεύματος), προκαλώντας μεγάλα επαγόμενα ρεύματα και ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις στα γύρω εξαρτήματα της μηχανής. Αυτό το πρόβλημα της διαταραχής του πλάσματος έχει μελετηθεί από τους επιστήμονες με διάφορες μεθόδους,

σημαντικότερη των οποίων είναι η έρευνα πάνω στις διατάξεις περιορισμού stellarator (Kikuchi M. , 2002).

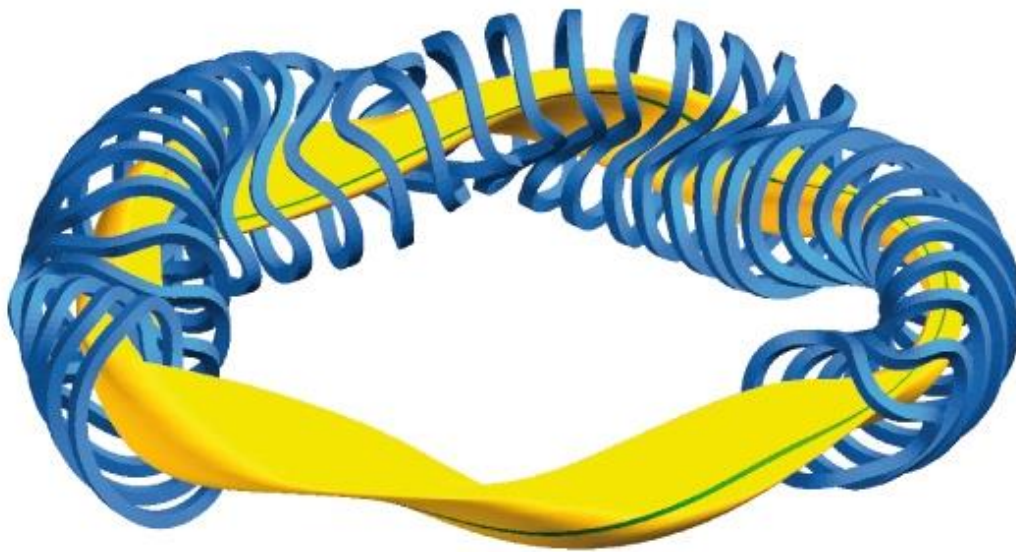


Εικόνα 1. Σχηματική αναπαράσταση των βασικών εξαρτημάτων του tokamak.
(Πηγή ιστοσελίδα : <https://www.euro-fusion.org>)

Διάταξη stellarator

Οι stellarators λειτουργούν παρόμοια με τους tokamaks, χρησιμοποιώντας μαγνητικά πηνία για να περιορίσουν το πλάσμα σε μια περιοχή με σχήμα τόρου. Ωστόσο, σε αντίθεση με τους tokamaks, το πλάσμα τους δε διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα με αποτέλεσμα να μη διαθέτουν κεντρικό σωληνοειδή στη διάταξή τους. Επομένως , ένα μοναδικό σύστημα πηνίων δημιουργεί το τοροειδές και το πολωτικό μαγνητικό πεδίο. Αυτός ο σχεδιασμός έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη σταθερότητα του πλάσματος και δυνατότητα σταθερής

λειτουργίας της συσκευής, όμως η δομή του είναι αρκετά πολύπλοκη προκαλώντας δυσκολίες στην κατασκευή του. Ο σχεδιασμός που περιγράφηκε παρουσιάζεται στην Εικόνα 2. Τα σημαντικότερα προγράμματα που διερευνούν την προσέγγιση και δουλεύουν με μεγάλους αντιδραστήρες stellarator είναι το Wendelstein 7-X στη Γερμανία, το Large Helical Device (LHD) στην Ιαπωνία και το Helical Symmetric Experiment (HSX) στις ΗΠΑ (Boozer, 2021).



Εικόνα 2. Σχηματικό διάγραμμα των πηνίων μαγνητικού πεδίου και της διαμόρφωσης του πλάσματος ενός stellarator (Πηγή ιστοσελίδα : <https://www.ipp.mpg.de/>)

1.3.2.2 Αδρανειακός περιορισμός (inertial confinement)

Ο αδρανειακός περιορισμός σύντηξης αποελεί τη συμπίεση ενός μικρού σφαιριδίου που περιέχει καύσιμο σύντηξης σε εξαιρετικά υψηλές πυκνότητες με τη χρήση ισχυρών λέιζερ υψηλής ισχύος ή ακτίνων σωματιδίων μέχρι αυτό να φτάσει στην

ανάφλεξη. Κατά την ανάφλεξη καταστρέφεται το εξωτερικό στρώμα της σφαίρας δημιουργώντας ένα εσωτερικό κρουστικό κύμα που συμπιέζει το καύσιμο, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του από 1 έως 10 KeV (κιλο-ηλεκτροβόλτ). Η διαδικασία πραγματοποιείται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Αποτελεί νεότερη ερευνητική γραμμή που έχει σημειώσει μεγάλη πρόοδο κυρίως στο NIF (National Ignition Facility) το οποίο βρίσκεται στο ερευνητικό κέντρο της Καλιφόρνιας Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). Μία ακόμα εγκατάσταση με παρόμοιες δυνατότητες του NIF έχει χτιστεί στην πόλη Μπορντό της Γαλλίας και ονομάζεται Laser Megajoule (LMJ) (Kikuchi M. , 2002).

1.4 Παραγωγή Ενέργειας

Οι τεχνολογίες πυρηνικής σύντηξης βρίσκουν τις κύριες εφαρμογές τους στην παραγωγή ενέργειας. Μια μονάδα παραγωγής ενέργειας από σύντηξη είναι ουσιαστικά μια θερμική μονάδα. Στόχος είναι η παραγωγή ενέργειας με την αξιοποίηση της θερμότητας που παράγεται μέσω των αντιδράσεων πυρηνικής σύντηξης. Η ενέργεια που απελευθερώνεται από την αντίδραση σύντηξης απορροφάται από ένα ψυκτικό μέσο και εξάγεται στους εναλλάκτες θερμότητας και στους στροβίλους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια σύντηξης θα είναι ιδανική για πυκνοκατοικημένες χώρες και ιδιαίτερα βιομηχανικές περιοχές, όπου η έλλειψη γης εμποδίζει την αξιοποίηση των διαλείπουσων πηγών (Romanelli et al, 2012). Οι αντιδραστήρες σύντηξης πρώτης γενιάς θα εκμεταλλευτούν δευτέριο και τρίτιο, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ανανεώσιμα καύσιμα, και σχεδιάζονται για να μην παράγουν απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας. Το δευτέριο περιέχεται στο θαλασσίνο νερό, γεγονός που το καθιστά ανεξάντλητο, ενώ το τρίτιο υπάρχει σε ελάχιστες ποσότητες στη φύση, αλλά μπορεί να παραχθεί από λίθιο μέσα στον ίδιο τον αντιδραστήρα. Το λίθιο υπάρχει επίσης άφθονο στη φύση και μπορεί να εξαχθεί με προσιτό κόστος από άλατα του θαλασσινού νερού. (M. Kovari et al 2018). Εκτός

από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχει δυνατότητα αξιοποίησης των μεγάλων ποσών θερμότητας που εκλείονται κατά την σύντηξη για τηλεθέρμανση, θερμότητα για βιομηχανικές διεργασίες ή παραγωγή υδρογόνου, για τις οποίες η ζήτηση είναι μεγάλη (Lindley et al, 2023).

1.5 Σκοπός

Η εργασία αυτή έχει στόχο την ανασκόπηση βιβλιογραφίας, παλαιάς και κυρίως πρόσφατης που σχετίζεται με την προσπάθεια παραγωγής ενέργειας από την πυρηνική σύντηξη, αλλά και τη σύνδεσή της με το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής. Πραγματοποιείται επιπλέον μια οικονομική ανάλυση σχετικά με το κόστος των μελλοντικών αντιδραστήρων και της μελλοντικής ηλεκτρικής ενέργειας σύντηξης. Μεγαλύτερη έμφαση έχει δοθεί στα πειραματικά προγράμματα μαγνητικού περιορισμού που βρίσκονται σε λειτουργία σε διάφορες χώρες και συνεργάζονται για την επίτευξη του προγράμματος ITER αλλά και στο πρόγραμμα αδρανειακού περιορισμού των ΗΠΑ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΣΥΝΤΗΞΗΣ

2.1 Περιγραφή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η υφιστάμενη κατάσταση των πιο σημαντικών προγραμμάτων παγκοσμίως που πραγματεύονται την κατασκευή και λειτουργία αντιδραστήρα πυρηνικής σύντηξης με βασικό στόχο την παραγωγή ενέργειας στο άμεσο μέλλον. Μεγαλύτερη έμφαση θα δοθεί στην περιγραφή του πρόγραμματος ITER στη Γαλλία καθώς αποτελεί το μεγαλύτερο πείραμα πυρηνικής σύντηξης στον πλανήτη (Geng, 2022), καθώς και στο NIF της Αμερικής όπου έχει πραγματοποιηθεί το πιο πετυχημένο πείραμα σύντηξης μέχρι σήμερα. Θα ακολουθήσει ανασκόπηση και άλλων σημαντικών προσπαθειών από άλλες χώρες, καθώς κάθε χώρα που συμμετέχει στο πρόγραμμα ITER και όχι μόνο επενδύει στην κατασκευή αντιδραστήρων με στόχο τη στήριξη του προγράμματος και την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών σύντηξης (Khvostenko, P. P. et al., 2020).

2.2 Αντιδραστήρες tokamak

2.2.1 ITER

Το πρόγραμμα ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) ,τα αρχικά του οποίου σημαίνουν Διεθνής Θερμοπυρηνικός Πειραματικός Αντιδραστήρας είναι μια συνεργασία μεταξύ 35 κρατών με βασικούς συνεργάτες την Ευρωπαϊκή Ένωση, την Κίνα, την Ιαπωνία, την Κορέα , τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, τη Ρωσία και την Ινδία (Jones et al., 2019). Αποτελεί τη σημαντικότερη εγκατάσταση της EFDA

(Ευρωπαϊκή Συμφωνία Ανάπτυξης της Σύντηξης) η οποία σε συνεργασία με την Ευρωπαϊκή Κομισιόν έχουν στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνική σύντηξη μέχρι το 2050 (Romanelli et al, 2012). Η κατασκευή του ξεκίνησε το 2010 στη Γαλλία και βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη (Barbarino, 2020). Το συνολικό κόστος του ITER προβλέπεται μέχρι το 2035 να είναι περίπου 20 δισεκατομμύρια ευρώ, αν και τα οικονομικά δεδομένα εύκολα αλλάζουν καθώς στο πρόγραμμα εμπλέκονται πολλά κράτη (Kramer, 2023).

Στην Εικόνα 3 φαίνονται σε φωτογραφία από ψηλά οι εγκαταστάσεις του ITER, με τον συναρμολογημένο αντιδραστήρα να σημειώνεται με κόκκινο κύκλο και με ένα τετράγωνο γύρω του παρουσιάζεται όλο το σύμπλεγμα του αντιδραστήρα. Η μεγαλύτερη κόκκινη γραμμή που περικλείει το χώρο δείχνει τα όρια της εγκατάστασης.



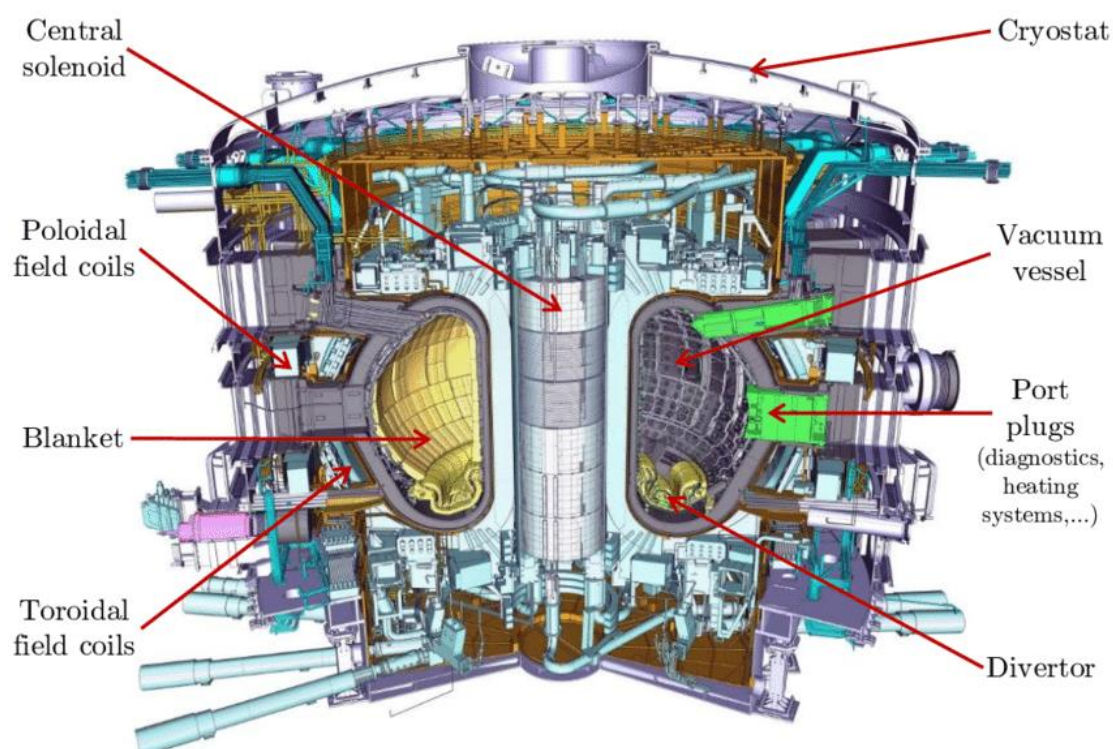
Εικόνα 3. Φωτογραφία των εγκαταστάσεων του ITER από ψηλά. (Πηγή ιστοσελίδα : <https://www.iter.org/>)

Σχεδιασμός του αντιδραστήρα

Ο πυρηνικός αντιδραστήρας που κατασκευάζεται είναι διατάξεως Tokamak και κατά την ολοκλήρωση της κατασκευής, η οποία με τα αρχικά πλάνα προβλέπεται να είναι το 2025, θα αποτελεί την πιο σημαντική συσκευή μαγνητικού περιορισμού πλάσματος και το μεγαλύτερο πειραματικό πυρηνικό αντιδραστήρα σύντηξης του είδους του παγκοσμίως.

Σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αντιδραστήρα, η μέγιστη ακτίνα πλάσματος του είναι $R=6.2\text{ m}$, το μέγιστο τορειδές μαγνητικό πεδίο είναι 11.8 T , ενώ το μέγιστο μαγνητικό πεδίο στον κεντρικό σωληνοειδή θα φτάνει μέχρι και 13 T . Ο όγκος πλάσματος ανέρχεται στα 840 m^3 και το πλάσμα μπορεί να μεταφέρει ρεύμα μέχρι και $I_p=15\text{ MA}$ (Πηγή ιστοσελίδα : <https://www.iter.org/>).

Ο αντιδραστήρας tokamak της εγκατάστασης είναι μια ισχυρή τοροειδής μηχανική κατασκευή αποτελούμενη από πολλά υπεραγωγικά πηνία (20 πηνία τοροειδούς πεδίου με περίβλημα και 7 πηνία πολοειδούς πεδίου). Στο κέντρο της κατασκευής υπάρχει ένας κεντρικός σωληνοειδής, δεξιά του οποίου υπάρχει ένα δοχείο κενού. Στην κορυφή της κατασκευής θα υπάρχει τοποθετημένος ένας κρυοστάτης (Geng, 2022). Τα μέλη που αναφέρθηκαν έχουν ήδη τοποθετηθεί κατά την έναρξη της πρώτης φάσης συναρμολόγησης του αντιδραστήρα που ξεκίνησε το 2020. Στη δεύτερη φάση της συναρμολόγησης θα τοποθετηθούν η κουβέρτα και ο εκτροπέας αριστερά και δεξιά του κεντρικού σωληνοειδή αντίστοιχα (Bigot, 2021). Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται τα κύρια μέλη συναρμολογημένα όπως έχουν σχεδιαστεί.



Εικόνα 4. Σχηματική διάταξη του πειράματος του αντιδραστήρα ITER (Πηγή: Dubus D., 2014).

Στόχοι του ITER

Η βασική ιδέα του ITER ως το πιο ακριβό και εξελιγμένο πείραμα πυρηνικής σύντηξης μέχρι σήμερα (Romanelli et al, 2012) είναι η κατασκευή συσκευών σύντηξης οι οποίες θα παρουσιάζουν σημαντικές προοπτικές παραγωγής ενέργειας ώστε να εφαρμοστούν αποτελεσματικά σε μεγάλες πυρηνικές εγκαταστάσεις (Geng, 2022). Όσον αφορά τη φυσική, στόχος είναι ο μαγνητικός περιορισμός πλάσματος ακραία υψηλής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της αντίδρασης δευτέρου-τρίτιου. Από αυτή τη διαδικασία αναμένεται να παραχθούν 500 MW ενέργειας σύντηξης, ενώ θα έχουν καταναλωθεί 50 MW εξωτερικής ενέργειας για τη θέρμανση του πλάσματος. Επομένως ο επιθυμητός λόγος ενέργειας σύντηξης/

εξωτερικής ενέργειας θέρμανσης είναι $Q=10$ (Horvath-Rachlew, 2016). Το ενεργειακό κέρδος $Q=10$ σκοπεύεται να διατηρηθεί για 400 δευτερόλεπτα στην πρώτη φάση με παραγωγή 500 MW ενέργειας σύντηξης, ενώ στη δεύτερη φάση θα γίνει προσπάθεια διατήρησης ενεργειακού κέρδους $Q=5$ για 3000 δευτερόλεπτα με παραγωγή 350 MW ενέργειας σύντηξης και καύση πλάσματος σταθερής κατάστασης (Sanchez, 2014). Στον τεχνολογικό τομέα, ο ITER θα πραγματοποιήσει μια σειρά πειραμάτων για να διερευνηθεί η απαιτούμενη τεχνολογική εξέλιξη ώστε να υπάρξει μονάδα παραγωγής ενέργειας από πυρηνική σύντηξη. Εκτός από την αυτοθέρμανση πλάσματος από σωματίδια άλφα, θα δοκιμαστεί για πρώτη φορά η αποτελεσματικότητα μιας κουβέρτας αναπαραγωγής και θα γίνει προσπάθεια αναπαραγωγής τρίτιου από λίθιο μέσω της χημικής αντίδρασης μέσα στον αντιδραστήρα, καθώς τα φυσικά αποθέματα του στη Γη είναι απειροελάχιστα. Τα πειραματικά αποτελέσματα των τελευταίων θα θέσουν τη βάση ώστε να αρχίσει η διαδικασία για την ανάπτυξη ενός αντιδραστήρα επίδειξης (DEMO) και εφόσον είναι επιτυχή, η πυρηνική σύντηξη θα μπορέσει να εφαρμοστεί στις ενεργειακές πολιτικές κρατών (Horvath-Rachlew, 2016).

2.2.2 Ο EU DEMO και η σύνδεσή του με τον ITER

Ο Ευρωπαϊκός αντιδραστήρας επίδειξης ή αλλιώς EU DEMO είναι το σχέδιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη διάδοχη συσκευή του ITER η οποία θα είναι το τελευταίο βήμα ανάμεσα στο πειραματικό ITER και σε μια εμπορική μονάδα παραγωγής ενέργειας από πυρηνική σύντηξη για όλες τις χώρες που είναι μέρος του προγράμματος. Σήμερα βρίσκεται στη φάση ενός εννοιολογικού σχεδιασμού μέχρι το 2027, στη συνέχεια θα ακολουθήσει η φάση του μηχανικού σχεδίου και η έναρξη της κατασκευής όπου θα πραγματοποιούνται αναλυτικά πειράματα και έλεγχοι που θα προετοιμάσουν το έδαφος για την έναρξη της λειτουργίας αρχικά το 2040 και μετέπειτα την αδειοδότηση της εγκατάστασης ως μονάδας παραγωγής ενέργειας το

2050. (Federici et al., 2019). Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται μια πιθανή διάταξη των εγκαταστάσεων του EU DEMO μετά την κατασκευή του. Παρατηρείται μεγάλη ομοιότητα με τις εγκαταστάσεις του ITER με διαφορά το μπλε κτίριο στη μεση της εικόνας όπου θα πραγματοποιείται μετατροπή της θερμικής ενέργειας που θα παράγεται από τον αντιδραστήρα σε ηλεκτρική ενέργεια.

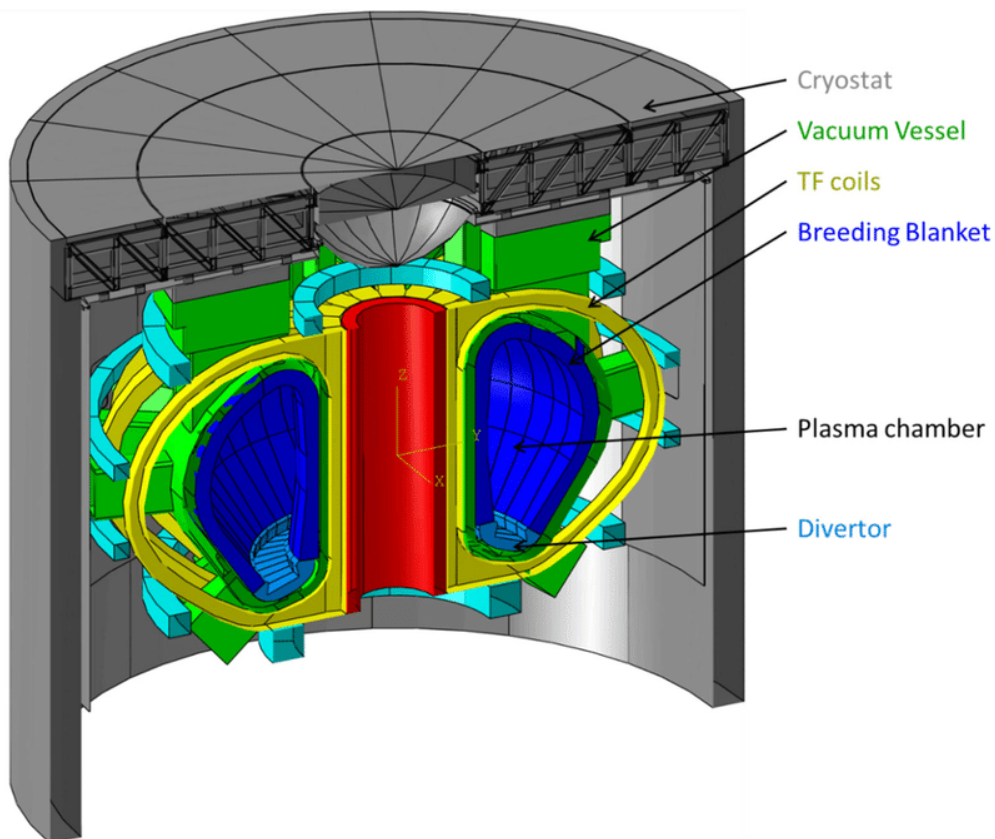


Εικόνα 5. Σχηματική απεικόνιση μιας πιθανής διάταξης των εγκαταστάσεων μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας σύντηξης από τον αντιδραστήρα επίδειξης (DEMO) (Πηγή ιστοσελίδα : <https://www.iter.org/>).

Σχεδιασμός του αντιδραστήρα

Ο αντιδραστήρας DEMO βρίσκεται προς το παρόν σε φάση εννοιολογικού σχεδίου και για την ώρα στα σχέδια υπάρχουν κάποιες φυσικές παραδοχές που η επίτευξή

τους είναι ακόμα αβέβαιη από τον ITER. Ο DEMO θα είναι διατάξεως tokamak και το μαγνητικό του σύστημα σχεδιάζεται να διαθέτει 16 πηνία τοροειδούς πεδίου για σταθερή λειτουργία πλάσματος, 6 πηνία πολωειδούς πεδίου για τον έλεγχο της διαμόρφωσης του πλάσματος και τον κεντρικό σωληνοειδή που θα αποτελείται από 5 μέρη για την επίτευξη και διατήρηση του ρεύματος πλάσματος. Σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αντιδραστήρα, η μέγιστη ακτίνα πλάσματος του θα είναι περίπου $R=9.47\text{ m}$, το τοροειδές μαγνητικό πεδίο του γύρω στα 6.5 T , ενώ το ρεύμα πλάσματός του υπολογίζεται να φτάνει τα $I=20\text{ MA}$. Γενικά πολλά από τα εξαρτήματα του αντιδραστήρα σχεδιάζονται παρόμοια με αυτά που κατασκευάστηκαν για τον ITER με σημαντική διαφορά την κουβέρτα αναπαραγωγής τριτίου που θα είναι απαραίτητη για το επόμενο βήμα στις εγκαταστάσεις πυρηνικής σύντηξης. Επιπλέον, ο DEMO θα χρησιμοποιεί πιο εξελιγμένο εκτροπέα με δυνατότητα εξάτμισης πλάσματος, βελτιωμένα εσωτερικά εξαρτήματα με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, αντοχή σε ακτινοβολία και θέρμαση και δυνατότητα απομακρυσμένης συντήρησης και πιο αποδοτικούς υπεραγωγίμους μαγνήτες (Federici et al., 2019). Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται σχηματική διάταξη του EU DEMO και από πάνω προς τα κάτω παρουσιάζονται με βελάκια με τη σειρά ο κρυοστάτης, το δοχείο κενού, τα πηνία τοροειδούς πεδίου, η κουβέρτα αναπαραγωγής, ο θάλαμος πλάσματος και ο εκτροπέας.



Εικόνα 6. Σχηματική αναπαράσταση του Ευρωπαϊκού αντιδραστήρα επίδειξης ενέργειας σύντηξης (EU DEMO) διατάξεως tokamak (Πηγή ιστοσελίδα : <https://www.euro-fusion.org> .)

Στόχοι του DEMO

Οι στόχοι του DEMO είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι περίπου 500 MW (που θα αντιστοιχεί σε ενέργεια σύντηξης 2 GW) με συντελεστή κέρδους ενέργειας σύντηξης για το δίκτυο $Q=10$, η αναπαραγωγή του απαιτούμενου τρίτιου για τη λειτουργία του κλειστού του κύκλου και η επίδειξη των τεχνολογιών και συστημάτων συντήρησης ικανά ώστε να επιτευχθεί διαθεσιμότητα για εμπορικές εγκαταστάσεις. Παράλληλα η επίτευξη των στόχων αυτών εξαρτάται άμεσα από τον ITER αλλά και από τη γενικότερη εξέλιξη της φυσικής και τεχνολογιών των αντιδραστήρων πυρηνικής σύντηξης καθώς ακόμα απαιτείται μεγάλη πρόοδος στην

έρευνα και την ανάπτυξη πολλών από τα συστήματα που χρησιμοποιούνται ή σχεδιάζονται για τον πειραματικό αντιδραστήρα ITER. Φυσικά, πολύ σημαντικό είναι να υπάρχει ένα οργανωμένο σχέδιο για τη βελτιστοποίηση όλων των σημαντικών παραμέτρων για την επιτυχία του εγχειρήματος, όπως είναι η βιομηχανική εφικτότητα, το κόστος, η συντήρηση, η μετατροπή ενέργειας, τα θέματα αδειών και η πυρηνική ασφάλεια. Γι αυτό το λόγο, ακολουθείται και ένα συγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα όπως αναφέρθηκε πιο πάνω (Siccinio et al, 2022).

2.2.3 Joint European Torus (JET)

Ο Joint European Torus (Κοινός Ευρωπαϊκός Τόρος) ή JET είναι ένας πειραματικός αντιδραστήρας tokamak που βρίσκεται στο Κέντρο Culham για Ενέργεια Σύντηξης στο Ηνωμένο Βασίλειο. Βρίσκεται σε λειτουργία από το 1983 και έχει αποτελέσει για πολλά χρόνια το επίκεντρο του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος σύντηξης. Είναι σχεδιασμένος για να μελετήσει τη σύντηξη σε συνθήκες που πλησιάζουν εκείνες που απαιτούνται για ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας. Αποτελεί την πρώτη συσκευή παγκοσμίως που λειτούργησε με αντίδραση μείγματος καυσίμου δευτέρου-τρίτιου για την παραγωγή ενέργειας σύντηξης. Τα πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί στον JET είναι ιστορικά και έχουν παίξει καθοριστικό ρόλο στην πρόοδο της έρευνας σύντηξης. Ενδεικτικά, το 1997 πέτυχε ρεκόρ ενέργειας για την εποχή, παράγοντας 16 MW ενέργειας σύντηξης. Η επιτυχία του οδήγησε στην κατασκευή της πρώτης συσκευής σύντηξης σε εμπορική κλίμακα, του ITER, και αύξησε την εμπιστοσύνη στο tokamak ως σχέδιο για μελλοντικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας από σύντηξη.

Σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του JET, η μεγάλη του ακτίνα είναι $R=3\text{m}$, το τοροειδές μαγνητικό πεδίο ισούται $B=3.4\text{ T}$, ο όγκος πλάσματος

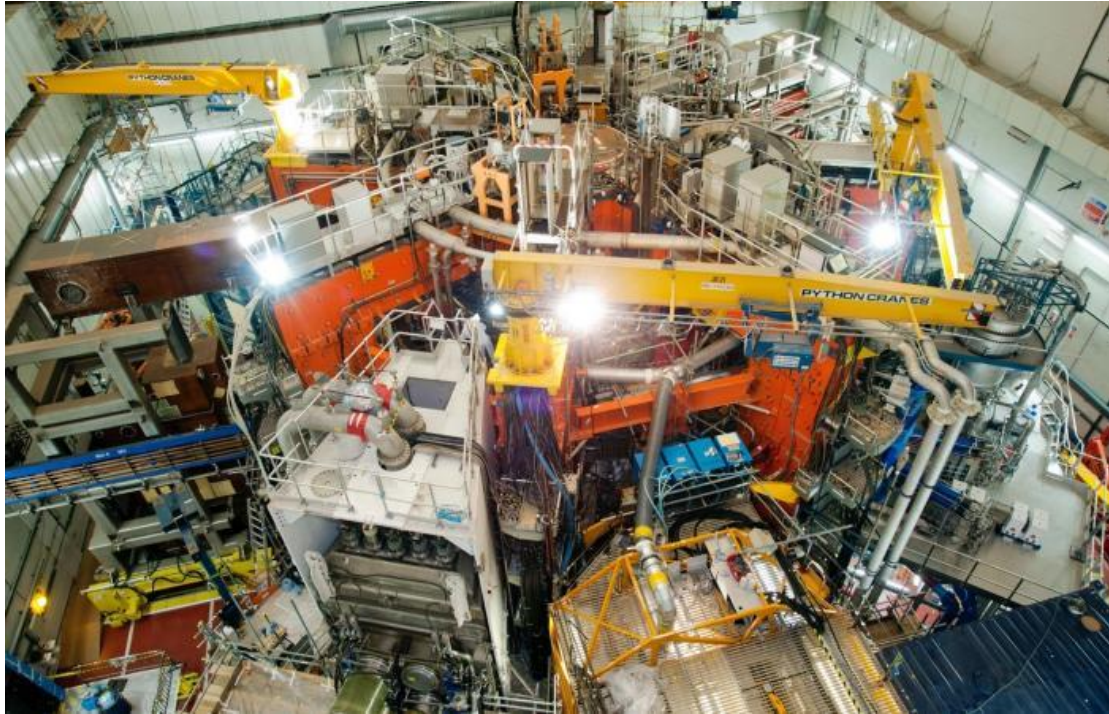
φτάνει τα 100m^3 και το ρεύμα πλάσματος φτάνει τα 5MA σε διατομές σχήματος D και τα 3MA σε κυκλικές διατομές. (Paul-Henri Rebut,2018).

Το JET ολοκλήρωσε τις επιστημονικές δραστηριότητές του στα τέλη Δεκεμβρίου 2023 όπου και έγινε η τελευταία εκτόξευση πλάσματος με μεγάλη επιτυχία, καθώς το Φεβρουάριο του 2024 ανακοινώθηκε ότι στο τελευταίο πείραμα στις εγκαταστάσεις του JET τέθηκε ένα νέο παγκόσμιο ρεκόρ ενέργειας 69.26 MJ που απελευθερώθηκαν σε διαρκή και ελεγχόμενη ενέργεια σύντηξης σε συνθήκες όσο το δυνατόν πιο κοντά σε εκείνες του ITER και των μελλοντικών εργοστασίων παραγωγής ενέργειας από σύντηξη. Το νέο επίτευγμα της ομάδας των επιστημόνων καταρρίπτει τα προηγούμενα παγκόσμια ρεκόρ των 59 MJ (2022) και 22.7 MJ (1997), τα οποία είχαν επίσης σημειωθεί στο JET (Πηγή ιστοσελίδα : <https://www.euro-fusion.org>).

Σχεδιασμός του αντιδραστήρα

Καθώς ο JET δεν είναι πια σε λειτουργία, δε θα μπορούμε σε πολλές λεπτομέρειες για το σχεδιασμό του, αξίζει όμως να σημειωθεί ότι υπήρξε πρωτοποριακός, καθώς λόγω της χρονολογίας που κατασκευάστηκε δοκιμάστηκαν για πρώτη φορά σχέδια με στόχο μείωση του κόστους και του χρόνου κατασκευής που αποτέλεσαν τελικά μέρος της επιτυχίας του. Σαν αντιδραστήρας tokamak, αποτελούνταν από ένα δοχείο κενού για την απομόνωση του πλάσματος από την ατμόσφαιρα και τη συγκράτηση του εγχυόμενου αερίου. Ο κύριος εξοπλισμός στο εσωτερικό του δοχείου κενού ήταν ο εκτροπέας ο οποίος παίζει σημαντικό ρόλο στον έλεγχο των προσμίξεων και της πυκνότητας του πλάσματος. Γύρω από το δοχείο κενού υπήρχε το μαγνητικό σύστημα αποτελούμενο από 32 πηνία τοροειδούς πεδίου σχήματος D συγκρατούμενα από μια μηχανική κατασκευή και από μεγάλα πηνία πολοειδούς πεδίου επικετρωμένα γύρω από τον άξονα περιστροφής. Το πλήρες βάρος του JET έφτανε περίπου τους 4000 τόνους, με το μαγνητικό κύκλωμα να καταλαμβάνει το μισό του

βάρους του (Paul-Henri Rebut, 2018). Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται ολόκληρος ο αντιδραστήρας JET σε συναρμολόγηση.

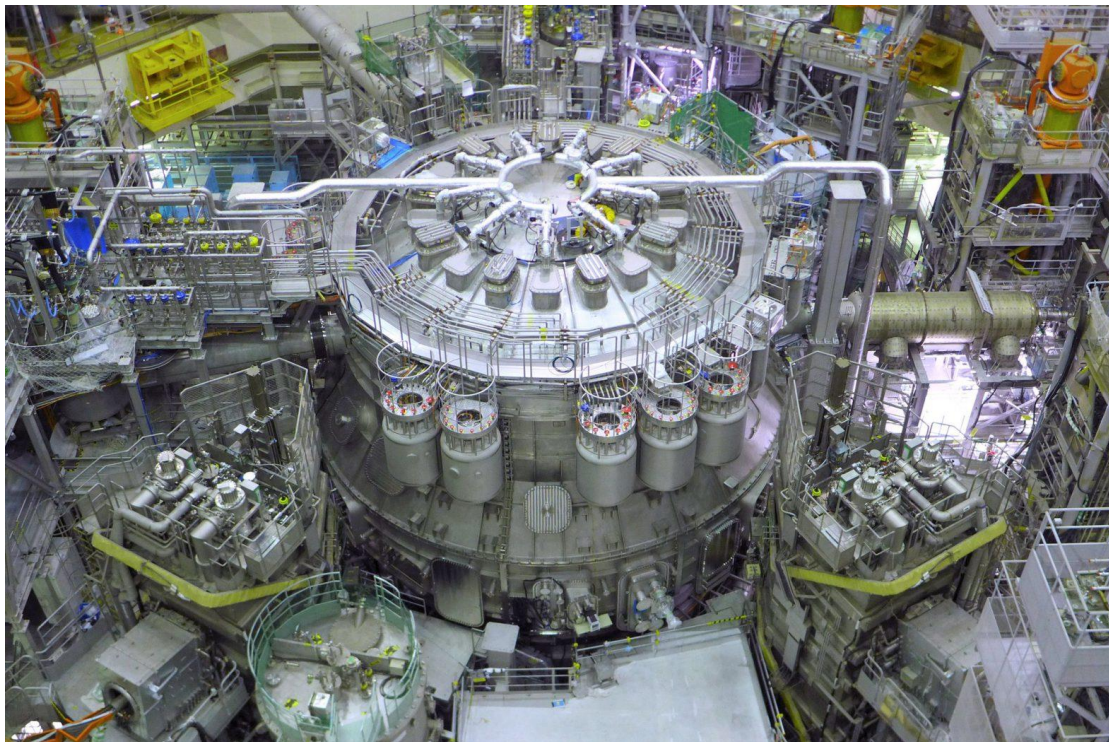


Εικόνα 7. Φωτογραφία του αντιδραστήρα JET (Πηγή ιστοσελίδα : <https://www.euro-fusion.org>).

2.2.4 JT-60SA

Το πρόγραμμα JT-60SA αποτελεί μια συνεργασία που ξεκίνησε το 2007 ανάμεσα στην Ευρωπαϊκή Ένωση και την Ιαπωνία για την πραγματοποίηση πειραμάτων και ερευνών πάνω στην ενέργεια πυρηνικής σύντηξης κατά τα οποία θα υπάρχει συνεργασία με το πρόγραμμα ITER με απώτερο στόχο την επίτευξη του σχεδίου

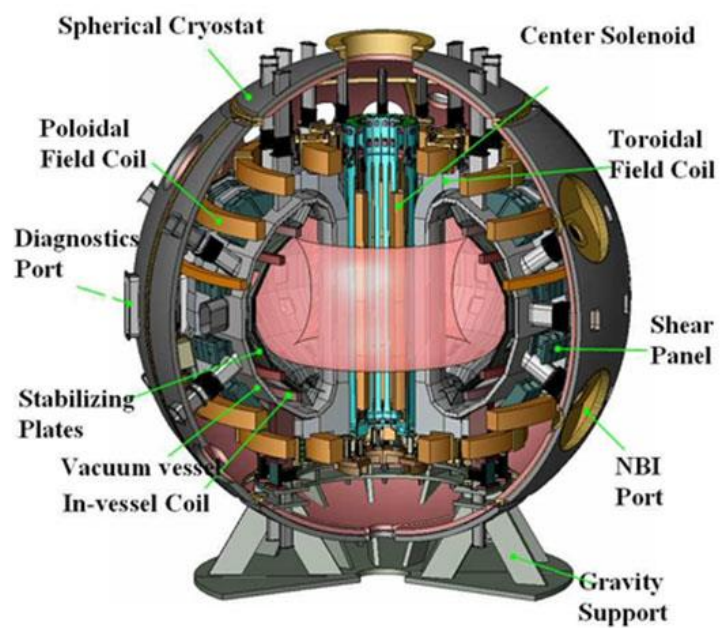
DEMO. Ο JT-60SA είναι ένας υπεραγώγιμος αντιδραστήρας διατάξεως tokamak (ο μεγαλύτερος στον κόσμο πριν τον ITER) και μπορεί να συγκρατεί πλάσματα δευτερίου που βρίσκονται σε κατάσταση παρόμοια με νεκρού σημείου (δηλαδή θα έχουν ενέργεια εισόδου ίση με την ενέργεια εξόδου) με μέγιστο ρεύμα πλάσματος $I_p=5.5$ MA, μέγιστη ακτίνα περίπου $R_p=3$ m και τοροειδές πεδίο 2.25 T. Η βασική ιδιότητά με την οποία έχει κατασκευαστεί είναι η ευελιξία διαμόρφωσης πλάσματος σε μεγάλο εύρος ισορροπιών μέσω της υψηλής ενέργειας θέρμανσης του πλάσματος (41 MW για 100s) με ουδέτερες ακτίνες και κύματα συχνότητας ECRF (είδος εύρους συχνοτήτων). Η συναρμολόγηση του tokamak που φαίνεται και στην Εικόνα 8, ολοκληρώθηκε το Μάρτιο του 2020 και μπήκε σε λειτουργία για πρώτη φορά το Δεκέμβριο του 2023 (Kamada et al. 2022). Το συνολικό κόστος του έργου για τη φάση της κατασκευής εκτιμάται ότι θα ανέλθει σε 560 εκατομμύρια ευρώ σε σημερινές τιμές, μοιρασμένο μεταξύ Ευρώπης και Ιαπωνίας (Πηγή ιστοσελίδα : <https://fusionforenergy.europa.eu/>).



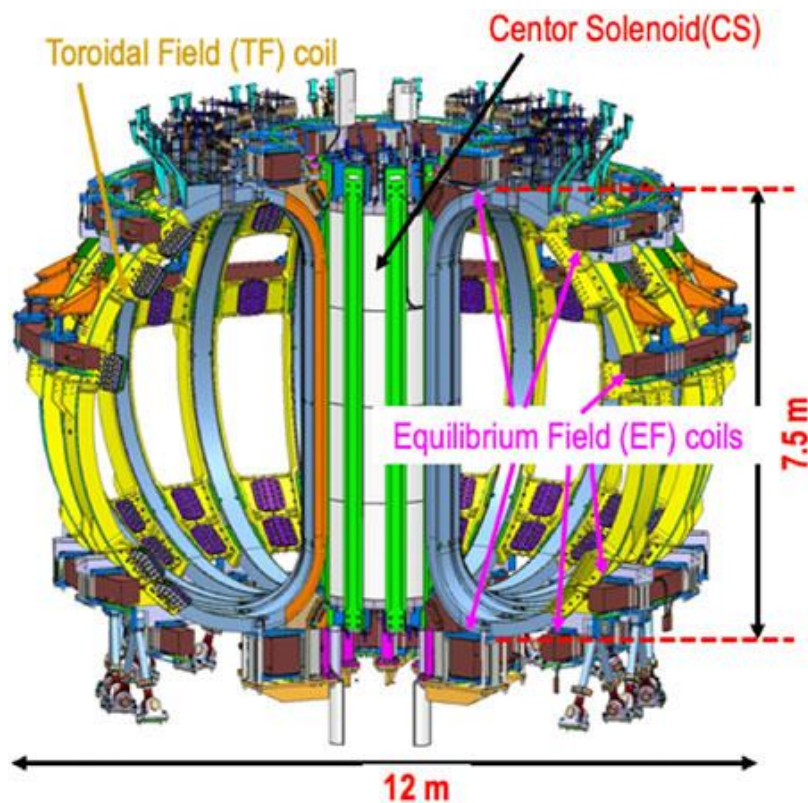
Εικόνα 8. Οπτική της ολοκληρωμένης κατασκευής του JT-60SA από ψηλά (Πηγή ιστοσελίδα : <https://fusionforenergy.europa.eu/>).

Σχεδιασμός του αντιδραστήρα

Ο αντιδραστήρας tokamak της εγκατάστασης σχεδιάστηκε με στόχο τις μικρές διαστάσεις του τοροειδούς πεδίου και χαμηλό λόγο των διαστάσεων πλάσματος. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 2013 και μέχρι το 2018 τοποθετήθηκαν ένας κρυοστάτης, 6 πηνία χαμηλού πεδίου ισορροπίας, 18 πηνία τοροειδούς πεδίου, ένα δοχείο κενού, μία θερμική ασπίδα του δοχείου κενού. Το 2019 η κατασκευή του συνεχίστηκε με την τοποθέτηση του κεντρικού σωληνοειδούς, του σώματος δοχείου κρυοστάτη, της θερμικής ασπίδας του κρυοστάτη και του άνω καπακιού του κρυοστάτη. Το 2020 η συναρμολόγηση του ολοκληρώθηκε εντός χρονοδιαγράμματος κάτι που αποτέλεσε πολύ σημαντικό επίτευγμα. Στην Εικόνα 9 παρουσιάζονται σχηματικά κάποια από τα μέρη που αναφέρθηκαν, αλλά και επιπλέον εξαρτήματα όπως σταθεροποιητικές πλάκες, θύρες διαγνωστικού ελέγχου και υποστηρικτική βάση. Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται αναλυτικά η διαμόρφωση του μαγνητικού συστήματος του αντιδραστήρα και οι διαστάσεις του (12 x 7,5 m), με τα πηνία τοροειδούς πεδίου να είναι τοποθετημένα στο αριστερό μέρος, τα πηνία χαμηλού πεδίου ισορροπία στο δεξιό μέρος και τον κεντρικό σωληνοειδή να βρίσκεται κατά μήκος του άξονα.



Εικόνα 9. Σχηματική αναπαράσταση των μελών του αντιδραστήρα JT-60SA (Πηγή ιστοσελίδα : <https://www.asgsuperconductors.com/>).



Εικόνα 10. Σχηματική αναπαράσταση των πηνίων και του κεντρικού σωληνοειδούς του αντιδραστήρα (Πηγή ιστοσελίδα :<https://www.jt60sa.org/wp/>).

Στόχοι του JT-60SA

Το πρόγραμμα JT-60SA έχει τρεις βασικούς στόχους. Ο πρώτος είναι να διεξάγει βοηθητικές έρευνες παράλληλα με το πρόγραμμα ITER ,ώστε να ωθήσει το τελευταίο να φτάσει τους επιθυμητούς τεχνικούς στόχους του. Πιο συγκεκριμένα τα πειράματα του JT-60SA θα ερευνήσουν καταστάσεις πλάσματος όπως στο ITER από την άποψη μη διαστατικών παραμέτρων πλάσματος και συνθηκών θέρμανσης. Έτσι θα διερευνηθούν τα όρια που μπορούν να φτάσουν τα πλάσματα υψηλής ολοκληρωμένης απόδοσης του ITER χωρίς να συμβαίνει κάποια διαταραχή ή μαγνητουδροδυναμικές αστάθειες. Ο δεύτερος στόχος του είναι να παρέχει

ερευνητικά αποτελέσματα στο ITER ώστε να βοηθήσει στη δημιουργία ενός τεχνικά πειστικού πλάνου για το σχέδιο DEMO. Για να είναι οικονομικά βιώσιμο το DEMO, δεν αρκεί η συνεισφορά μόνο του προγράμματος ITER, θα πρέπει να ξεπεραστούν τεχνικά εμπόδια, για τα οποία το JT-60SA μπορεί να αποτελέσει μια βασική ερευνητική υποδομή. Ο τρίτος του στόχος είναι να προωθήσει τη νέα γενιά επιστημόνων σύντηξης (βλ. Εικόνα 11) που αναμένεται να παίξουν καθοριστικό ρόλο στην πρόοδο των προγραμμάτων ITER και DEMO.

Η έρευνα του JT-60SA θα πραγματοποιηθεί σε 3 φάσεις που θα επεκτείνονται ταυτόχρονα με αναβαθμίσεις στον εξοπλισμό όπως είναι τα συστήματα θέρμανσης πλάσματος, ο εκτροπέας, τα συστήματα απομακρυσμένου χειρισμού και άλλα εξαρτήματα των μελών του αντιδραστήρα (Barabaschi et al. 2019; Y. Kamada et al., 2022).



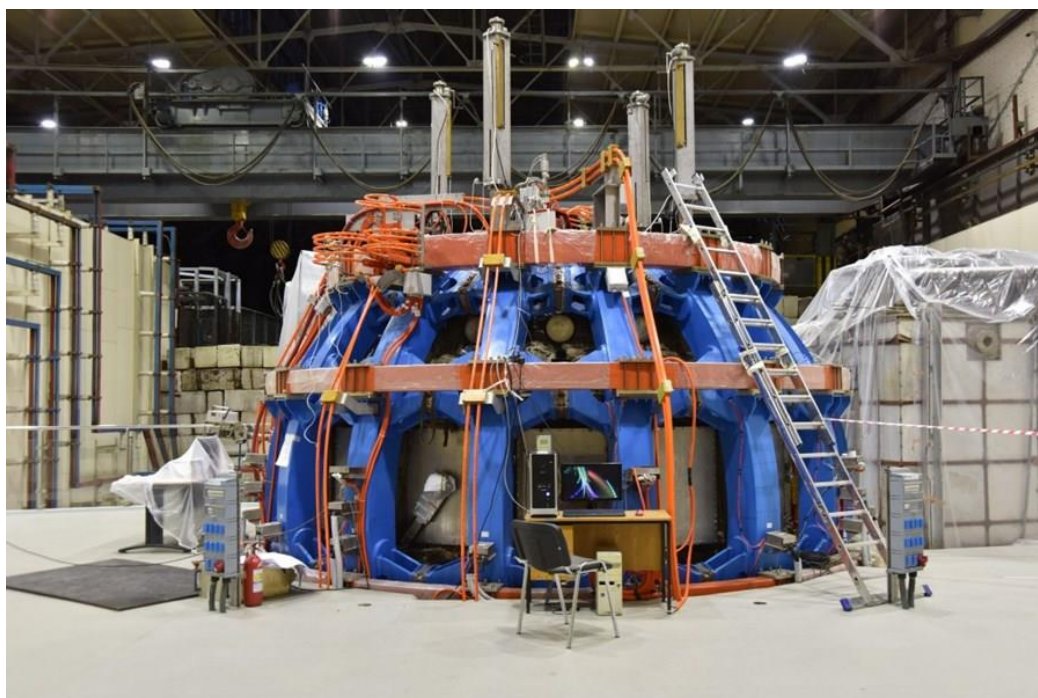
Εικόνα 11. Η νέα γενιά επιστημόνων σύντηξης στις εγκαταστάσεις του JT-60SA (Πηγή ιστοσελίδα : <https://fusionforenergy.europa.eu/>).

2.2.5 T-15MD

Ο αντιδραστήρας T-15MD αποτελεί το νεότερο αντιδραστήρα πυρηνικής σύντηξης tokamak στη Ρωσία και βρίσκεται στο Εθνικό Κέντρο Ερευνών Ινστιτούτο Kurchatov ,όπως φαίνεται στην Εικόνα 12 και εγκαινιάστηκε το Μάιο του 2021 (Πηγή ιστοσελίδα : <https://www.iter.org/>) .Αποτελεί μέρος των προσπάθειών της Ρωσικής κυβέρνησης να εκμοντερνίσει τους προηγούμενους αντιδραστήρες σύντηξης που είχαν χρησιμοποιηθεί και να αναβαθμίσει τις εγκαταστάσεις που είχε έως το 2020, παρέχοντας ταυτόχρονα βοηθητικά ερευνητικά αποτελέσματα για το πρόγραμμα ITER του οποίου η Ρωσία είναι μέλος. Ο T-15MD λειτουργεί με μέγιστο ρεύμα πλάσματος $I_p=2\text{ MA}$, μέγιστη ακτίνα $R=1.48\text{m}$,τοροειδές πεδίο 2T και είναι αρκετά πρωτοποριακή εγκατάσταση παρουσιάζοντας κάποια τεχνικά στοιχεία μοναδικά στο είδος του. Στο άμεσο μέλλον προβλέπεται να αναβαθμίζονται τα συστήματα θέρμανσης του πλάσματος που χρησιμοποιεί, φτάνοντας τα 15 με 20 MW.

Σχεδιασμός του αντιδραστήρα

Ο αντιδραστήρας tokamak της εγκατάστασης διαθέτει μαγνητικό σύστημα για τον περιορισμό του καυτού πλάσματος στη διαμόρφωση του εκτροπέα. Το μαγνητικό σύστημα περιλαμβάνει ένα τοροειδές τύλιγμα με 16 πηνία τοροειδούς πεδίου ,ένα πολοειδές μαγνητικό σύστημα και άλλα υποστηρικτικά μέλη. Το πολοειδές μαγνητικό σύστημα αποτελείται από έναν τριμελή κεντρικό σωληνοειδή ,6 πηνία πολοειδούς πεδίου και 4 οριζόντια πηνία πεδίου. Η εγκατάσταση επίσης διαθέτει και άλλα διαγνωστικά συστήματα όπως είναι το σύστημα άντλησης υψηλής υποπίεσης, σύστημα ψήξης νερού, σύστημα παροχής ενέργειας, διαγνωστικό σύστημα και σύστημα ελέγχου πληροφοριών (P. P. Khvostenko et. al, 2020).



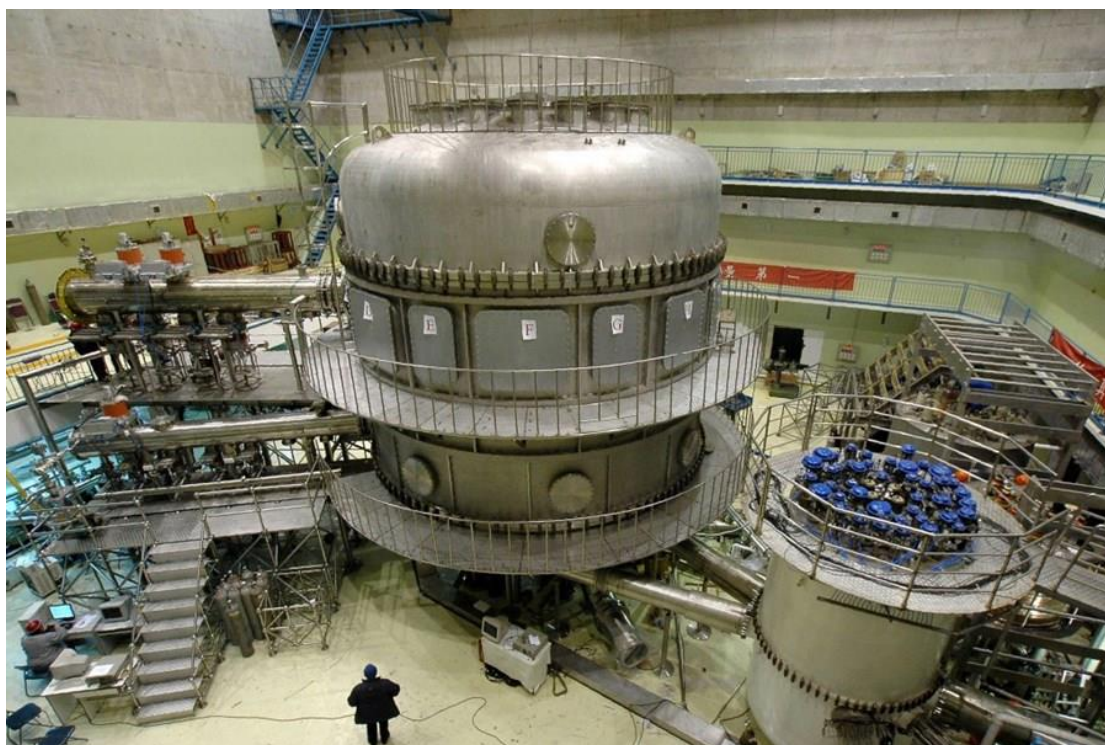
Εικόνα 12. Ο T-15MD συναρμολογημένος στην αίθουσα πειραμάτων (Πηγή ιστοσελίδα : <https://www.iter.org/>).

Στόχοι του T-15MD

Το επίκεντρο των ερευνών στον T-15MD θα είναι η πραγματοποίηση ερευνών για την παροχή βοήθειας στην επίλυση των πιο επειγόντων προβλημάτων του προγράμματος ITER. Τέτοια προβλήματα είναι η θέρμανση και ο περιορισμός καυτού πλάσματος, η σταθερή παραγωγή μη επαγωγικού ρεύματος, ο έλεγχος διεργασιών στον εκτροπέα, αλλά και η μείωση των συνολικών ασταθειών και των περιοδικών εκτοξεύσεων ενέργειας στο τοίχωμα του αντιδραστήρα. Παράλληλα με τις πειραματικές διαδικασίες θα πραγματοποιείται και ένα ερευνητικό πρόγραμμα με στόχο τη συλλογή δεδομένων που θα συμβάλλουν στη δημιουργία μιας θερμοπυρηνικής πηγής νετρονίων για την εξέλιξη της ατομικής ενέργειας (P.P. Khvostenko et al., 2021).

2.2.6 EAST

Ο EAST, τα αρχικά του οποίου σημαίνουν Experimental Advanced Superconducting Tokamak, δηλαδή Πειραματικός Προηγμένος Υπεραγώγιμος Τόκαμακ, είναι ένας πλήρως υπεραγώγιμος αντιδραστήρας διατάξεως τόκαμακ μεσαίου μεγέθους και χτίστηκε στο Ινστιτούτο Φυσικής Πλάσματος Κινέζικη Ακαδημία Επιστημών (ASIPP) στην Κίνα. Βρίσκεται σε λειτουργία από το 2006, όπου και πραγματοποίησε την πρώτη του εκκένωση πλάσματος (Yun Tao Song et al., 2014). Έχει κατασκευαστεί πάνω στην ιδέα του αντιδραστήρα του προγράμματος ITER και έχει παρόμοιες μαγνητικές διατάξεις με αυτόν. Η συναρμολόγησή του και η αίθουσα στην οποία λειτουργεί παρουσιάζονται στην Εικόνα 13. Η μέγιστη ακτίνα του είναι $R=1.85$ m, η ελάχιστη ακτίνα του $a=0.45$ m, το τοροειδές του πεδίο είναι 3.5 T και λειτουργεί με ρεύμα πλάσματος $I_p=1$ MA. Είναι εξοπλισμένος συνολικά με συνολική ισχύ θέρμανσης και ρεύματος 32 MW. Το 2021 επετεύχθη από τον EAST πλάσμα σταθερής κατάστασης με βελτιωμένο περιορισμό ενέργειας που θα μπορούσε να λειτουργήσει πάνω από 1000 δευτερόλεπτα με εισαγόμενη/εξαγόμενη ενέργεια 2 GJ, κάτι που αποτελεί και βασικό στόχο του ITER. Από τα πειράματα, τις επιστημονικές θεωρίες και τη μηχανική πρακτική που πραγματοποιούνται στον EAST, έχει αποδειχθεί η αξιοπιστία της κατασκευής αλλά και όλων των συστημάτων της κάνοντας τον βασικό κομμάτι στην έρευνα της Κίνας πάνω στη σύντηξη (Yuntao Song, 2023). Παράλληλα θα αποτελέσει τη βάση για το επόμενο βήμα της σύντηξης στη χώρα, που θα είναι το πρόγραμμα CFETR, ένας νέος ισχυρός αντιδραστήρας πυρηνικής σύντηξης διατάξεως τόκαμακ που βρίσκεται υπό σχεδίαση και στόχο έχει να γεφυρώσει τα κενά ανάμεσα στο πρόγραμμα ITER και τον αντιδραστήρα DEMO (Yuanxi Wan et al, 2017).

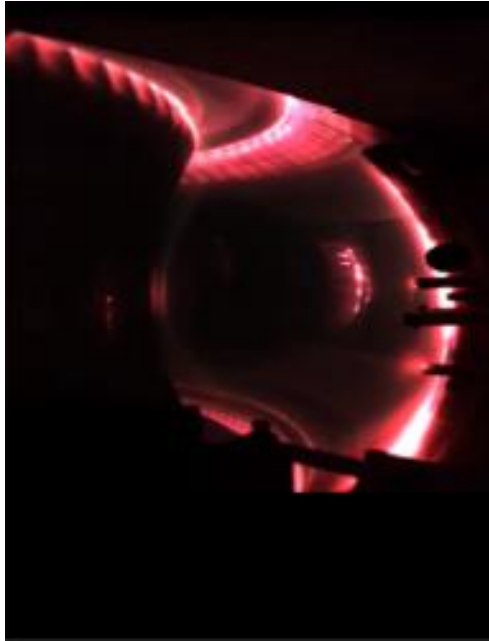


Εικόνα 13. Ο αντιδραστήρας EAST συναρμολογημένος (Πηγή ιστοσελίδα : <https://www.iter.org/>).

Σχεδιασμός του αντιδραστήρα

Ο EAST διαθέτει 14 υπεραγωγία πηνία πολωειδούς πεδίου τα οποία είναι τοποθετημένα γύρω από τα πηνία τοροειδούς πεδίου και αντλούν ενέργεια από 12 παροχές. Διαθέτει επίσης ενεργά πηνία ανατροφοδότησης εντός του δοχείου για γρήγορο έλεγχο της κάθετης αστάθειας του πλάσματος (G. Calabro et al, 2015). Ο EAST αναβαθμίζεται συνεχώς και από το 2015 έχει εξοπλιστεί με βοηθητικά συστήματα βοηθικής θέρμανσης και κίνησης ρεύματος, παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στον ITER. Στην Εικόνα 14 για παράδειγμα, που είναι μια φωτογραφία τραβηγμένη κατά τη διάρκεια εκτόξευσης πλάσματος τη χρονική στιγμή $t=6s$ ενός πειράματος, ο εκτροπέας βολφραμίου που έχει χρησιμοποιηθεί είναι

παρόμοιος με αυτόν του ITER και οδήγησε στην αποφυγή ισχυρών αλληλεπιδράσεων πλάσματος-υλικών τοιχώματος (X. Gao et al, 2020). Ακόμη, τα διαγνωστικά συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι σύγχρονα και αναβαθμισμένα και παρέχουν σημαντικά δεδομένα πάνω στη σταθερότητα του πλάσματος και των αλληλεπιδράσεών του με τα τοιχώματα κατά τη διάρκεια των πειραμάτων (B.N. Wan et al 2017).



Εικόνα 14. Φωτογραφία από το εσωτερικό δοχείο του EAST κατά τη διάρκεια πειράματος(X. Gao et al, 2020).

Στόχοι του EAST

Βασική αποστολή του EAST είναι η προσέγγιση του μαγνητικού περιορισμού πλάσματος μέσα από τη μέθοδο σταθερής κατάστασης και μακροχρόνιου παλμού. Το πλάσμα στα πειράματα του EAST βρίσκεται σε καθεστώς που ονομάζεται i-mode , που αποτελεί βελτιωμένη κατάσταση από το πλάσμα του ITER, που θα βρίσκεται σε h-mode και η ομάδα του EAST στοχεύει στη μελέτη της φυσικής και των

τεχνολογιών γύρω από αυτή τη μέθοδο. Έτσι, οι εμπειρίες και η κατανόηση σε λειτουργία υψηλής απόδοσης με μακροχρόνιο παλμό στον EAST θα είναι εξαιρετικά σημαντική για τη νέα γενιά αντιδραστήρων σύντηξης όπως του ITER (B.N. Wan et al 2017).

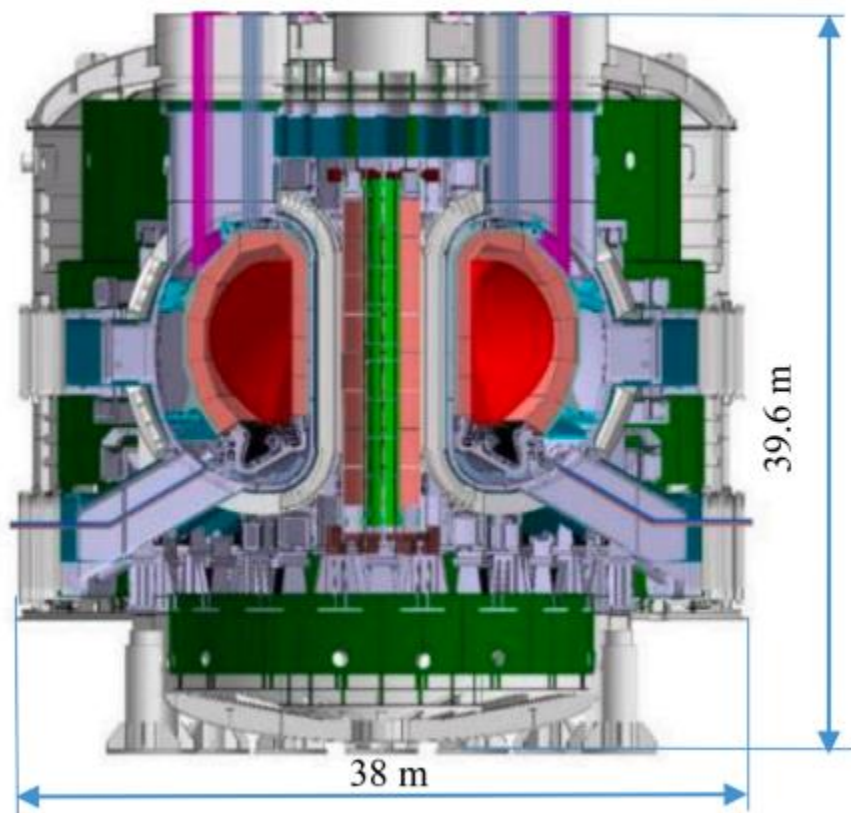
2.2.7 CFETR

Ο CFETR (China Fusion Engineering Test Reactor) , δηλαδή ο Δοκιμαστικός Αντιδραστήρας Μηχανικής Σύντηξης της Κίνας, είναι το επόμενο βήμα της Κίνας πάνω στην πρόοδο της πυρηνικής σύντηξης μαγνητικού περιορισμού και ο εννοιολογικός σχεδιασμός του ολοκληρώθηκε το 2017. Παρόλο που δεν έχει ολοκληρωθεί το μηχανικό του σχέδιο και δεν έχει ξεκινήσει η κατασκευή του, αποτελεί πολύ σημαντικό πρόγραμμα για να μην αναφερθεί. Το βασικό πλάνο κατασκευής του είναι η δημιουργία μιας συσκευής η οποία θα βελτιώσει κάποια ελαττώματα του ITER και θα φέρει τους επιστήμονες πιο κοντά στη δημιουργία ενός αντιδραστήρα επίδειξης (DEMO). Η μέγιστη ακτίνα του θα φτάνει τα $R=7.2$ m, το μαγνητικό του πεδίο θα ισούται με $B=6.5$ T και το ρεύμα πλάσματος θα είναι περίπου 13 MA (Song, Y et al, 2022).

Σχεδιασμός του αντιδραστήρα

Ο CFETR είναι διατάξεως tokamak και το μαγνητικό του σύστημα αποτελείται από 16 πηνία τοροειδούς πεδίου με υποστηρικτικό σύστημα, από 7 βρόχους υπεραγωγίων πηνίων πολοειδούς πεδίου και έναν κεντρικό σωληνοειδή για τη διαμόρφωση του πλάσματος. Το σύστημα δοχείων αποτελείται από ένα δοχείο κενού,

μια θερμική ασπίδα και έναν κρυοστάτη. Τα κύρια μέρη των δοχείων του αντιδραστήρα είναι το σύστημα κάλυψης για αναπαραγωγή τριτίου , ένα από τα πιο δύσκολα συστήματα στην κατασκευή και συντήρηση και το σύστημα εκτροπής. Στην Εικόνα 15 φαίνεται μια γραφική του απεικόνιση με τις διαστάσεις του. Τέλος, όπως και κάθε πυρηνικός αντιδραστήρας, θα είναι εξοπλισμένος με σύστημα απομακρυσμένης συντήρησης και σύστημα θέρμανσης. Ακόμη γίνονται προσπάθειες κατασκευής μιας κουβέρτας αναπαραγωγής τριτίου ώστε ο αντιδραστήρας να μπορεί να παράγει το δικό του τρίτιο για την αντίδραση σύντηξης.



Εικόνα 15. Σχέδιο διαμόρφωσης του CFETR (Song, Y et al, 2022)

Στόχοι του CFETR

Ο CFETR έχει ως στόχο να γεφυρώσει τα κενά μεταξύ του πειραματικού αντιδραστήρα σύντηξης ITER και του αντιδραστήρα επίδειξης DEMO, γιατί και ο σχεδιασμός του είναι τέτοιος ώστε να αποτελεί συνδετικό στοιχείο των δύο προηγούμενων. Όσον αφορά το επιστημονικό κομμάτι, η βασική εστίαση θα είναι ο έλεγχος σταθερότητας πλάσματος που βρίσκεται σε θέρμανση, η αναπαραγωγή και αυτοσυντήρηση τριτίου και συνεχής παραγωγή ενέργειας σύντηξης. Στον τομέα της τεχνολογίας, βασικός στόχος είναι η μελέτη των χαρακτηριστικών και των λειτουργιών του αντιδραστήρα πυρηνικής σύντηξης. Ο CFETR προβλέπεται να λειτουργήσει σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση η συσκευή του θα είναι μικρότερου μεγέθους και θα στοχεύει σε παραγωγή ενέργειας σύντηξης $P_{\text{fusion}} = 50\text{-}200 \text{ MW}$ και κέρδος ενέργειας σύντηξης $Q=1\text{-}5$, ενώ στη δεύτερη φάση του η συσκευή θα είναι μεγαλύτερου μεγέθους και θα έχει στόχο την επικύρωση του σχεδίου κατασκευής ενός αντιδραστήρα επίδειξης παράγοντας ενέργεια σύντηξης $P_{\text{fusion}} > 1 \text{ GW}$ και κέρδος ενέργειας σύντηξης $Q > 10$ (Yuanxi Wan et al, 2017).

2.2.8 KSTAR

Ο KSTAR (Korean Superconducting Tokamak Advanced Research) ή αλλιώς Κορεάτικος Υπεραγώγιμος Τόκαμακ Προηγμένης Έρευνας είναι ένας προηγμένος αντιδραστήρας σύντηξης σταθερής λειτουργίας που βρίσκεται σε λειτουργία από το 2008. Η ολοκληρωμένη κατασκευή του και η αίθουσα στην οποία λειτουργεί φαίνονται στην Εικόνα 16. Έχει κατασκευαστεί με προδιαγραφές ακτίνας $0.5\text{-}1.8 \text{ m}$, μέγιστο ρεύμα πλάσματος $I=2 \text{ MA}$, τοροειδές μαγνητικό πεδίο $B=3.5 \text{ T}$ και οι έρευνες που πραγματοποιεί δίνουν σημαντικά βοηθητικά τεχνολογικά στοιχεία στο

πρόγραμμα ITER , αλλά και στις μελέτες της Κορέας για τη μελλοντική κατασκευή ενός αντιδραστήρα επίδειξης στη χώρα τους (K-DEMO) (H.K. Park et al ,2019).

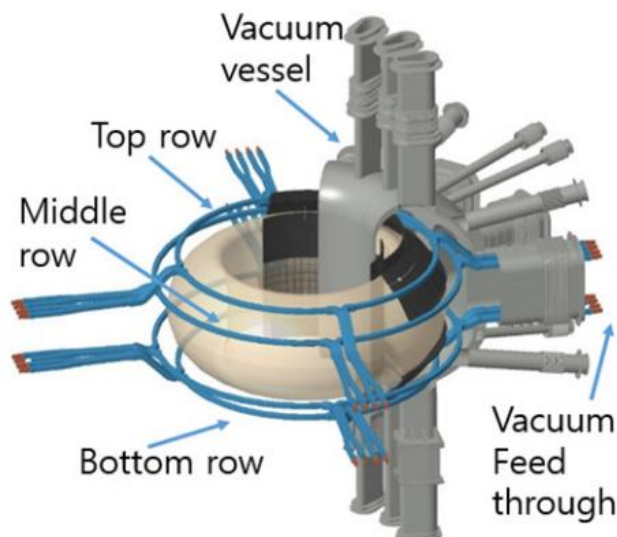


Εικόνα 16. Ο αντιδραστήρας KSTAR συναρμολογημένος (Πηγή ιστοσελίδα : <https://www.kfe.re.kr/>).

Σχεδιασμός του αντιδραστήρα

Καθώς στόχος του KSTAR είναι η σταθερή λειτουργία, εκτός από τα συνηθισμένα μέρη ενός αντιδραστήρα τόκαμακ, η συσκευή εξοπλίστηκε σταδιακά με επιπλέον αναβαθμίσεις. Κάποιες από αυτές είναι εσωτερικά μέρη του σκάφους όπως εκτροπείς, εσωτερικοί περιοριστές, παθητικοί στερεοποιητές, εσωτερικά πηνία ελέγχου του σκάφους (IVCCs), εσωτερικές κρυο-αντλίες και πολλά διαγνωστικά συστήματα για λειτουργία μακρών παλμών για μέχρι και 20 δευτερόλεπτα. Το σύστημα πηνίων IVCC που παρουσιάζεται στην Εικόνα 17 χρησιμεύει στην αξιοποίηση του ενεργού ελέγχου της θέσης του πλάσματος, στη διόρθωση

σφαλμάτων πεδίου και στην καταστολή της λειτουργίας με εντοπισμό των άκρων (ELM) και αποτελεί μια συναρμολόγηση τριών επιπέδων (χαμηλού,μεσαίου και υψηλού) με 16 πηνία και υποστηρικτικές κατασκευές (M. Kwon et al,2011).



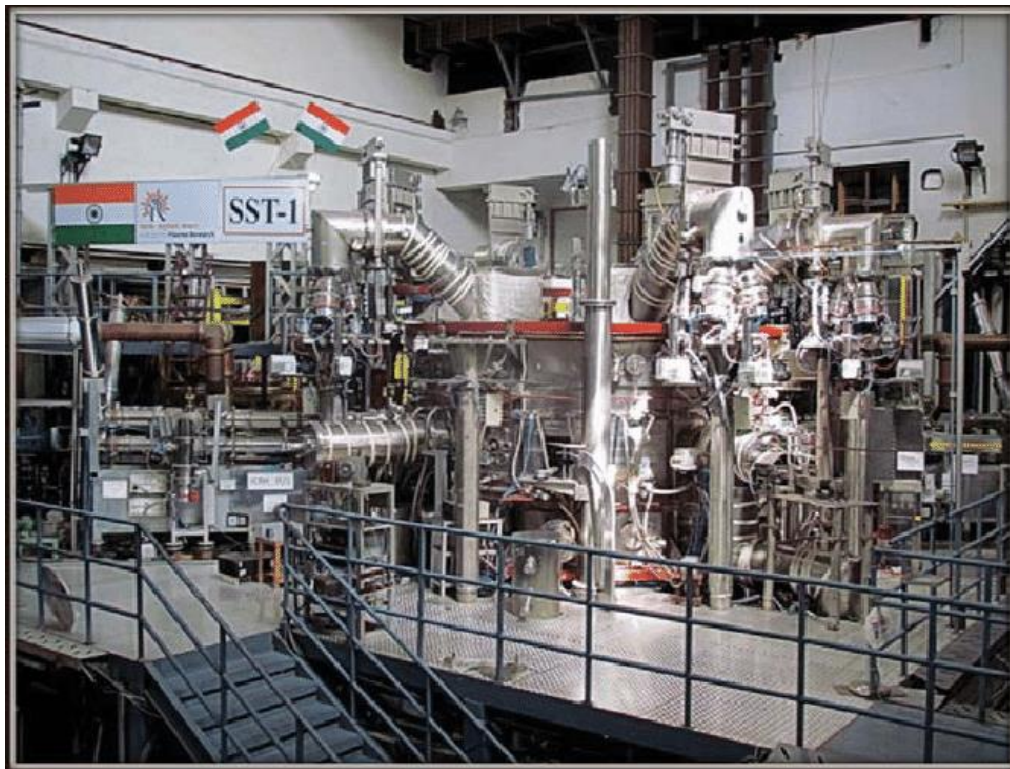
Εικόνα 17. Οι 3 σειρές των εσωτερικών πηνίων ελέγχου του σκάφους (IVCCs) (H.K. Park et al ,2019).

Στόχοι του KSTAR

Η βασική αποστολή του KSTAR είναι η επίτευξη της κατασκευής και λειτουργίας ενός υπεραγωγίμου αντιδραστήρα tokamak και η διερεύνηση της φυσικής και των τεχνολογιών γύρω από τη σταθερή λειτουργία υψηλής απόδοσης που απαιτείται για τη δυνητική αξιοποίηση των πυρηνικών αντιδραστήρων σύντηξης για παραγωγή ενέργειας στο μέλλον. Στόχος επίσης αποτελεί η συνεχής αναβάθμιση των εγκαταστάσεων έτσι ώστε να παρέχει σημαντικά πειραματικά δεδομένα που θα μπορέσουν να βοηθήσουν την πρόοδο του προγράμματος ITER, αλλά και θα αποτελέσουν τη βάση για τη μελλοντική κατασκευή του KDEMO, ενός κορεάτικου αντιδραστήρα επίδειξης πυρηνικής σύντηξης (H.K. Park et al ,2019).

2.2.9 SST-1 tokamak

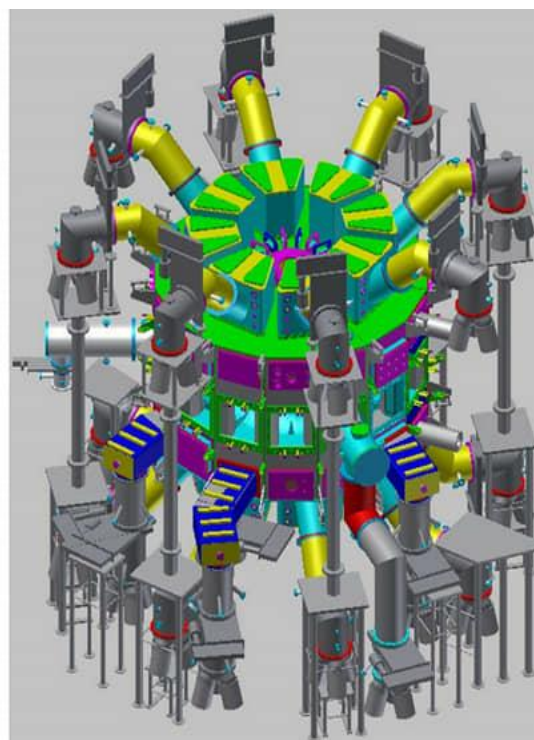
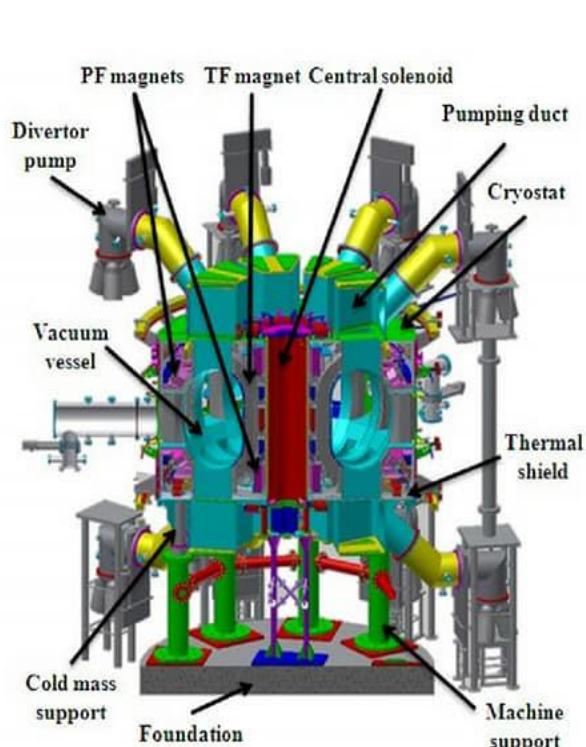
Ο SST-1 είναι ένας υπεραγώγιμος αντιδραστήρας tokamak σταθερής κατάστασης που βρίσκεται στην Ινδία και είναι σε λειτουργία από το 2013. Η μέγιστη ακτίνα του είναι $R=1.1\text{m}$, το τοροειδές μαγνητικό πεδίο του είναι $B=1.5\text{ T}$ και το ρεύμα πλάσματος φτάνει μέχρι και τα $I_p=0.22\text{MA}$. Το πλάσμα του SST-1 διαθέτει όλα τα τυπικά χαρακτηριστικά του πλάσματος tokamak των σύγχρονων συσκευών.



Εικόνα 18. Φωτογραφία του SST-1 μετά την επανασυναρμολόγησή του (Πηγή : S. Pradhan et al 2015).

Σχεδιασμός του αντιδραστήρα

Το μαγνητικό σύστημα του SST-1 αποτελείται από 16 υπεραγώγιμους μαγνήτες τοροειδούς πεδίου και 9 υπεραγώγιμους μαγνήτες πολοειδούς πεδίου μαζί με άλλα 2 πηνία αντίστασης πολοειδούς πεδίου που βρίσκονται μέσα στο δοχείο κενού. Ακόμη, διαθέτει έναν ωμικό μετασχηματιστή με πυρήνα αέρα και 3 ζεύγη πηνίων αντίστασης και ένα γυροτρόνιο που χρησιμοποιούνται για τον προ-ιονισμό, την αρχική διάσπαση και την αρχική εκκίνηση του ρεύματος. Επιπλέον, υπάρχει ένα ζεύγος μαγνητικών αντίστασης κατακόρυφου πεδίου που είναι τοποθετημένοι συμμετρικά γύρω από το μεσαίο επίπεδο του κρυοστάτη για την παροχή της αρχικής ισορροπίας. Αυτά τα εξαρτήματα παρουσιάζονται και σχηματικά στην Εικόνα 19. Γενικά, η συσκευή του SST-1 έχει περάσει πολλές αναβαθμίσεις και τροποποιήσεις, ειδικότερα στα υποσυστήματα του και έχει υποστεί πλήρη ανασυναρμολόγηση (βλ. Εικόνα 18) για να καταφέρει να είναι πλήρως λειτουργική.



Εικόνα 19. Τρισδιάστατη σχηματική απεικόνιση του SST-1 (Αριστερά φαίνονται τα μέρη της συναρμολόγησης σε τομή της συσκευής και δεξιά γραφική απεικόνιση της συσκευής) (Πηγή : S. Pradhan et al 2015).

Στόχοι του SST-1

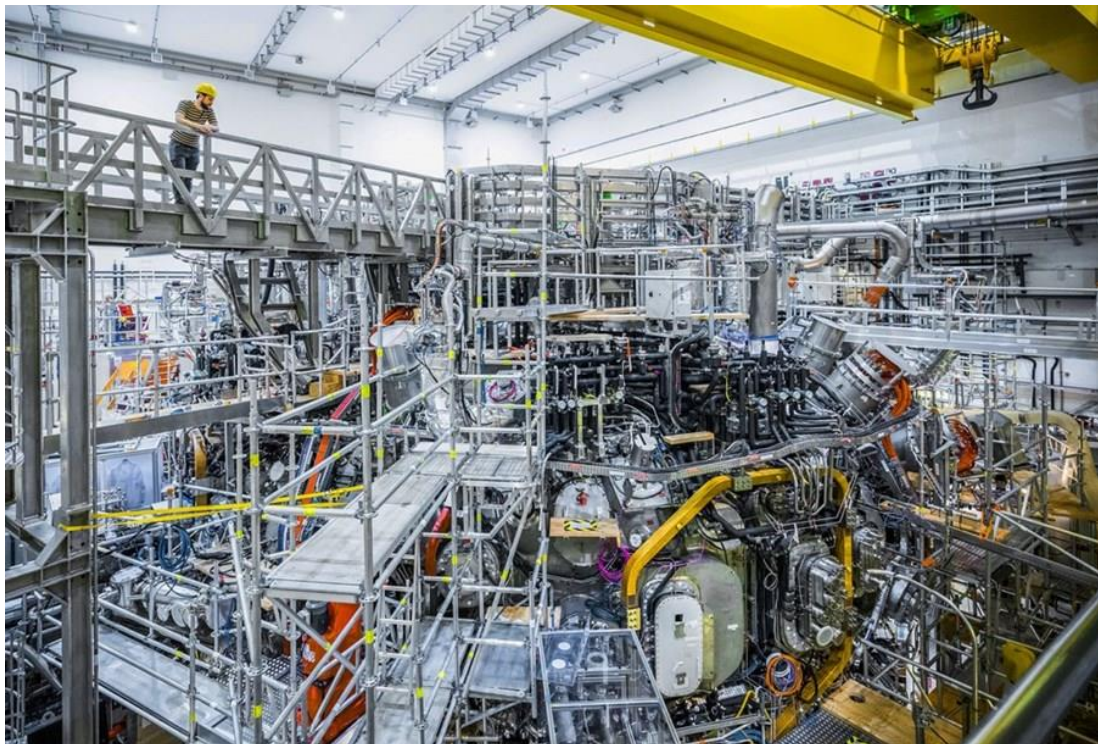
Ο SST-1 είναι μία συσκευή αφοσιωμένη στη μελέτη του περιορισμού και της σταθερότητας πλασμάτων με υψηλή αναλογία διαστάσεων στο ίδιο επίπεδο με τις σύγχρονες συσκευές. Είναι επίσης ο μοναδικός tokamak στον πλανήτη με υπεραγώγιμους μαγνήτες τοροειδούς πεδίου που για τις κρυο-σταθερές λειτουργίες του πραγματοποιεί δύο φάσεις ψύξης του ηλίου με αποτέλεσμα τη μειωμένη κατανάλωση ψυχρού ηλίου. Το SST-1 εκτελεί επίσης εκκενώσεις πλάσματος σε σταθερή κατάσταση για να διερευνήσει την αλληλεπίδραση μεταξύ του πλάσματος και του πρώτου τοιχώματος του tokamak. Οι στόχοι του είναι η μελέτη της ανατροφοδότησης και του ελέγχου, της λειτουργίας του εκτροπέα και των αλληλεπιδράσεων πλάσματος-τοιχίου σε πλάσματα σταθερής κατάστασης (S. Pradhan et al 2015).

2.3 Αντιδραστήρες stellarator

2.3.1 WENDELSTEIN 7-X STELLARATOR

Ο Wendelstein 7-X είναι η μεγαλύτερη πειραματική συσκευή τύπου stellarator παγκοσμίως, βρίσκεται στη Γερμανία και είναι σε λειτουργία από τα τέλη του 2015. Η ολοκληρωμένη του κατασκευή φαίνεται στην Εικόνα 20. Είναι σχεδιασμένος για

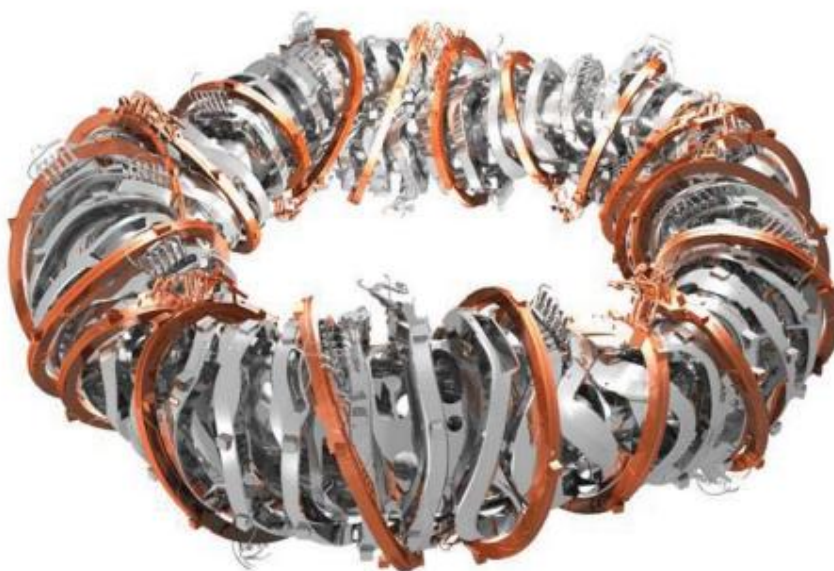
να ξεπεράσει τα κύρια μειονεκτήματα των αντιδραστήρων τύπου stellarator και να επιδείξει τα πιθανά πλεονεκτήματα του από τους αντιδραστήρες tokamak, όπως η λειτουργία πλάσματος σταθερής κατάστασης χωρίς χρήση ηλεκτρικού ρεύματος ή ελέγχου σταθερότητας. Η ελάχιστη ακτίνα του είναι $a=0.55\text{ m}$, η μέγιστη ακτίνα του είναι $R_0=5.5\text{ m}$, η μέγιστη δύναμη μαγνητικού πεδίου στον άξονα του είναι 3 T , και η συνολική μάζα της κατασκευής είναι 725 τόνοι . Το πλάσμα επετεύχθη από τον αντιδραστήρα το Δεκέμβριο του 2015 και κατά την πρώτη λειτουργική φάση του που ολοκληρώθηκε το 2016 χρησιμοποιήθηκε ενέργεια θέρμανσης 5 MW , η οποία πλέον ξεπερνάει τα 9 MW . Οι χρόνοι περιορισμού του πλάσματος από τον Wendelstein 7-X είναι από τους πιο μεγάλους ανάμεσα στους αντιδραστήρες του ίδιου τύπου (stellarator) και κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με τους χρόνους περιορισμού των αντιδραστήρων tokamak σε πλάσματα υψηλού περιορισμού (H-mode).



Εικόνα 20. Ο αντιδραστήρας stellarator Wendelstein 7-X (Πηγή ιστοσελίδα : <https://www.iter.org/>).

Σχεδιασμός του αντιδραστήρα

Το μαγνητικό πεδίο του W7-X δημιουργείται από 70 υπεραγώγιμα πηνία. Τα 50 από αυτά είναι μη επίπεδα και δημιουργούν πολοειδή και τοροειδή μέρη του μαγνητικού πεδίου, ενώ τα υπόλοιπα 20 είναι επίπεδα και ρυθμίζουν την περιστροφή και την ακτινική θέση του πλάσματος. Όλα τα παραπάνω είναι μοιρασμένα συμμετρικά σε 5 πανομοιότυπες μονάδες μαγνητικού πεδίου σχηματίζοντας ένα τοροειδές σχήμα. Στην Εικόνα 21 που είναι ένα τεχνικό σχέδιο των πηνίων μαγνητικού πεδίου που περιβάλλουν το δοχείο πλάσματος απεικονίζονται με γκρι χρώμα τα 50 μη επίπεδα πηνία και με χάλκινο χρώμα τα 20 επίπεδα πηνία. Υπάρχουν επιπλέον 10 κανονικά αγωγίμα πηνία μέσα στο δοχείο πλάσματος για σάρωση του εκτροπέα και άλλα 5 κανονικά αγωγίμα πηνία έξω από το δοχείο του κρυοστάτη.



Εικόνα 21. Τεχνικό σχέδιο των πηνίων μαγνητικού πεδίου που περιβάλλουν το δοχείο πλάσματος (Wolf et al, 2016).

Στόχοι του Wendelstein 7-X

Η βασική αποστολή του Wendelstein 7-X είναι η επίτευξη λειτουργίας σταθερής κατάστασης σε παραμέτρους πλάσματος σχετικές με τη σύντηξη. Ο αντιδραστήρας θα ερευνήσει σημαντικά ζητήματα για το αν αυτός ο σχεδιασμός μπορεί να αξιοποιηθεί για την κατασκευή μονάδας παραγωγής ενέργειας σύντηξης. Αυτά τα ερωτήματα περιλαμβάνουν την επαλήθευση κριτηρίων βελτιστοποίησης, τη βιώσιμη απόδοση του εκτροπέα ή και έλεγχο πυκνότητας. Οι 4 κύριοι στόχοι του W7-X είναι η επαλήθευση της βελτιστοποίησης του νεοκλασικού περιορισμού, ο περιορισμός γρήγορων ιόντων, ο έλεγχος πυκνότητας και προσμίξεων και η καθιέρωση ισορροπιών για λειτουργία υψηλής ενέργειας του εκτροπέα. Παράλληλα, θα ερευνήσει τις πιθανότητες επίτευξης της πυρηνικής σύντηξης σε εμπορικό επίπεδο μέσα από μια διαφορετική προσέγγιση ,δηλαδή μέσω των αντιδραστήρων stellarator αντί των αντιδραστήρων tokamak που αποτελούν μέρος του προγράμματος DEMO. (Wolf et al, 2016; Dinklage et al, 2018).

2.4 Η πρόοδος του αδρανειακού περιορισμού στις ΗΠΑ

2.4.1 NIF

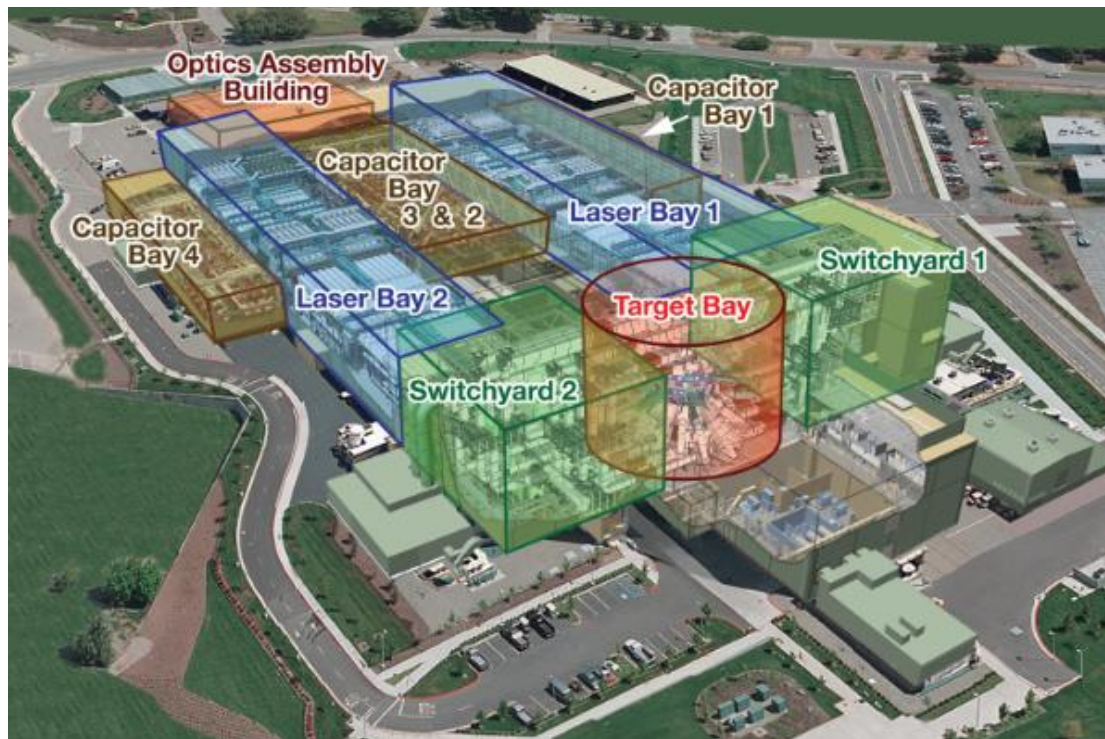
Το NIF (National Ignition Facility) βρίσκεται στο ερευνητικό κέντρο LLNL στην Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών και λειτουργεί από το Μάρτιο του 2009. Μέχρι στιγμής έχουν αναφερθεί συσκευές που μελετούν τη σύντηξη με τη μέθοδο

του μαγνητικού περιορισμού πλάσματος. Αντίθετα από αυτές, το NIF αποτελεί έδρα πολλών εγκαταστάσεων laser που χρησιμοποιούνται για πειράματα σύντηξης για τη μελέτη της φυσικής και των τεχνολογιών της μεθόδου του αδρανειακού περιορισμού πλάσματος. Παράλληλα πραγματοποιούνται θεμελιώδη επιστημονικά πειράματα, πειράματα σχετικά με θέματα εθνικής ασφάλειας και μελέτες με στόχο την διερεύνηση του αδρανειακού περιορισμού ως μελλοντική πηγή ενέργειας. Στο NIF έχει πραγματοποιηθεί το πιο επιτυχημένο πείραμα σύντηξης έως σήμερα , το Δεκέμβριο του 2022, όπου και επετεύχθη το φαινόμενο της ανάφλεξης. Στο επόμενο κεφάλαιο το συγκεκριμένο πείραμα θα επεξηγηθεί πιο αναλυτικά (Moses et al, 2016).

Σχεδιασμός του NIF laser

Το laser του NIF είναι το μεγαλύτερο και υψηλότερης ενέργειας σύστημα laser στον κόσμο και οι εγκαταστάσεις του όπως φαίνονται από ψηλά παρουσιάζονται στην Εικόνα 22. Περιλαμβάνει 192 δέσμες ακτίνων laser οι οποίες είναι χωρισμένες ισάριθμα σε 2 παράλληλες αίθουσες που στην Εικόνα 22 έχουν μπλε χρώμα . Υπάρχουν ακόμη 4 αίθουσες με πυκνωτές (σημειώνονται με καφέ χρώμα) που δημιουργούν παλμούς laser πολύ χαμηλής ενέργειας και στη συνέχεια τροφοδοτούν μεγάλους ενισχυτές που βρίσκονται κυρίως στις αίθουσες των laser. Μέσω των ενισχυτών η ενέργεια που μεταφέρουν τα laser αυξάνεται σε τεράστιο βαθμό και στη συνέχεια οι ακτίνες οδηγούνται σε 2 σταθμούς μεταγωγής (πράσινο χρώμα) όπου μέσω κατόπτρων οδηγούνται στην αίθουσα στόχου (κόκκινο χρώμα). Στην αίθουσα στόχου ,που παρουσιάζεται στην Εικόνα 23, είναι τοποθετημένες συναρμολογήσεις οπτικών που μετατρέπουν το αρχικό υπέρυθρο φως laser σε υπεριώδες και αυτό τελικά οδηγείται στο θάλαμο στόχου για την ανάφλεξη. Το σύνολο των δεσμών laser χωρίζεται σε 3 συστήματα : το σύστημα εγχυσης laser (ILS) το βασικό σύστημα laser (MLS) και τις τελικές συναρμολογήσεις οπτικών (FOAs). Όλα αυτά προστατεύονται

και υποστηρίζονται από έναν περιβάλλοντα εξωσκελετό που ονομάζεται σύστημα υποδομής του μονοπατιού των δέσμεων (BIS) (Spraeth et al, 2016).



Εικόνα 22. Η αρχιτεκτονική των εγκαταστάσεων του NIF από ψηλά. Με διαφορετικά χρώματα φαίνονται οι αίθουσες που περιγράφηκαν. (Spraeth et al, 2016)

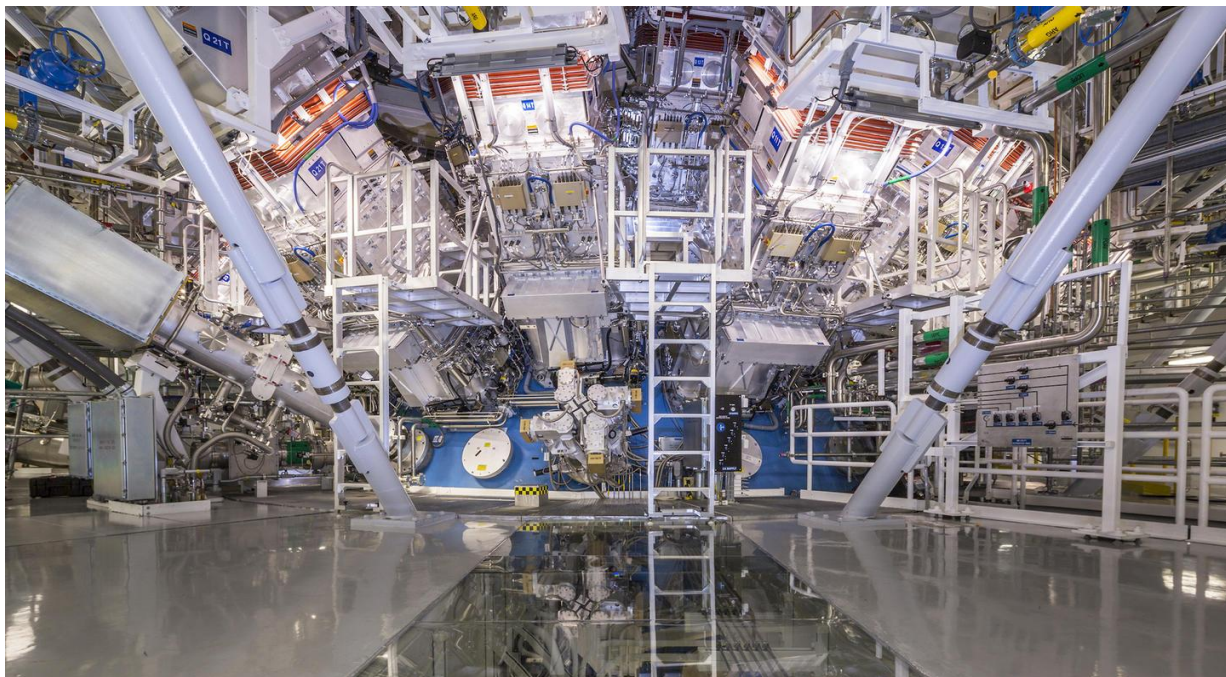
Στόχοι του NIF

Οι εγκαταστάσεις του NIF ξεκίνησαν ως μέρος της εκστρατείας των Ηνωμένων Πολιτειών για την επίτευξη ανάφλεξης, που ονομαζόταν NIC. Οι δύο βασικοί στόχοι αυτής της εκστρατείας είναι η εκτέλεση ολοκληρωμένων πειραμάτων ανάφλεξης που θα οδηγήσουν σε καύση και ανάφλεξη μέσω του αδρανειακού περιορισμού και η σταδιακή αναβάθμιση του NIF από ολοκληρωμένο πρόγραμμα σε πλήρως λειτουργική εγκατάσταση. Ακόμη στόχος του είναι να αποτελέσει μια διεθνή

εγκατάσταση που θα υποστηρίζει πλήθος πειραμάτων ,θα μελετά θεμελιώδη επιστημινικά θέματα και θα ασχολείται ενεργά με αποστολές εθνικής ασφάλειας (Moses et al, 2016).

2.4.2 Το μεγάλο επίτευγμα του NIF

Στις 13 Δεκεμβρίου 2022 ανακοινώθηκε από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ και από την Εθνική Υπηρεσία Πυρηνικής Ασφάλειας των ΗΠΑ η επίτευξη της ανάφλεξης σύντηξης στο ερευνητικό κέντρο LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory). Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις του NIF που στεγάζονται εκεί στις 5 Δεκεμβρίου 2022. Πιο συγκεκριμένα, για μία πάρα πολύ σύντομη χρονική στιγμή (100 τρισεκατομμυριοστά του δευτερολέπτου) τα 192 laser του NIF συγκεντρωμένα μαζί προσέδωσαν ενέργεια μεγέθους 2.05 MJ σε έναν πολύ μικρό χρυσό κύλινδρο (στο μέγεθος μιας γόμας μολυβιού) όπου και περιέχεται το πυρηνικό καύσιμο περικλειόμενο από διαμάντι. Αποτέλεσμα ήταν η ανατίναξη αυτής της χρυσής κοιλότητας με την ταυτόχρονη παραγωγή ενέργειας σύντηξης μεγέθους 3.15 MJ , δίνοντας ποσοστό κέρδους ενέργειας 154%. Αυτή ήταν η δεύτερη φορά που πραγματοποιήθηκε πετυχημένο πείραμα ανάφλεξης στο NIF, καθώς τον Αύγουστο του 2021 παρατηρήθηκε το πρώτο φλεγόμενο πλάσμα σε παρόμοιο πείραμα, όπου από 1.93 MJ προσπίπτουσας ενέργειας laser στο στόχο παράχθηκαν 1.35 MJ ενέργειας σύντηξης, δίνοντας ποσοστό κέρδους ενέργειας 70%. Αυτά τα αποτελέσματα όμως δεν ήταν αρκετά για τους επιστήμονες του NIF, οι οποίοι έθεσαν μεγαλύτερο στόχο τον οποίο και κατάφεραν στο πείραμα του 2022 όπου και απέδειξαν αυτό το φυσικό φαινόμενο.



Εικόνα 23. Η αίθουσα στόχου (target bay) του NIF όπου πραγματοποιήθηκε το πρώτο πείραμα ανάφλεξης σύντηξης και κέρδους ενέργειας σε εργαστηριακή κλίμακα τον Δεκέμβριο του 2022 (Πηγή ιστοσελίδα :<https://www.llnl.gov/>).

2.4.2.1 Το φαινόμενο της ανάφλεξης (ignition)

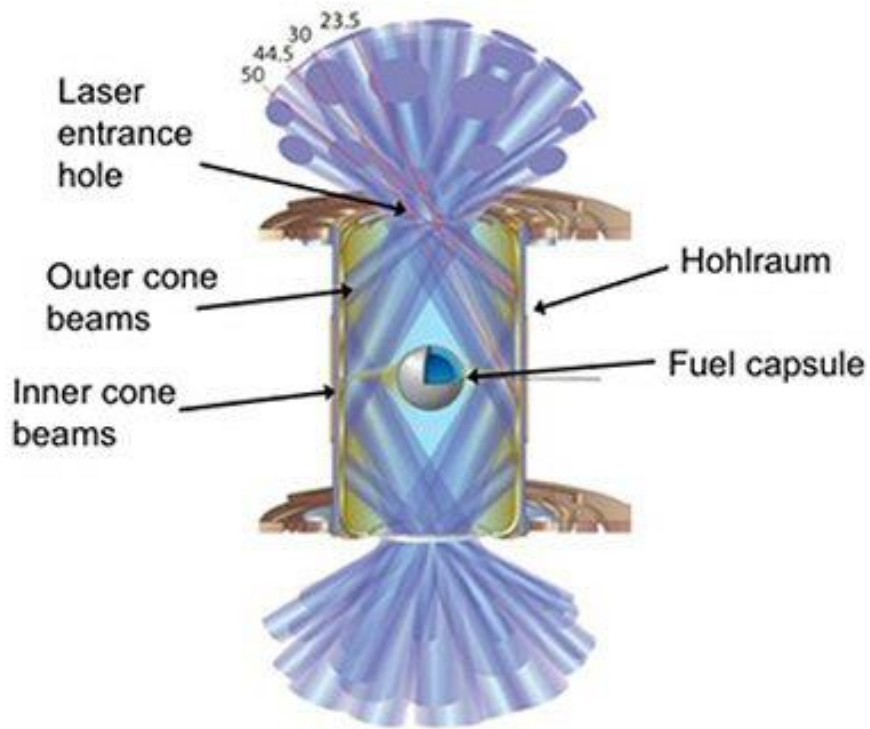
Για την καλύτερη κατανόηση του πειράματος θα πρέπει να εξηγηθεί το φαινόμενο της ανάφλεξης. Όπως έχει αναφερθεί και στο εισαγωγικό κεφάλαιο, για να πραγματοποιηθεί ανάφλεξη στο εργαστήριο πρέπει το καύσιμο να θερμανθεί σε απίστευτα υψηλές θερμοκρασίες όπου γίνεται «πλάσμα» και γίνονται ραγδαία αντιδράσεις σύντηξης, ενώ παράλληλα ελέγχονται οι απώλειες ενέργειας. Το καύσιμο το οποίο βοηθάει περισσότερο για ανάφλεξη είναι ένα μείγμα δευτέρου και τριτίου (Zylstra, A. B et al, 2022). Τέτοιες συνθήκες εμφανίζονται στο διάστημα σε εκρήξεις novae ή supernovae και πιθανά στη γη σε εκρήξεις θερμοπυρηνικών όπλων. Η ανάφλεξη είναι ένα βήμα πέρα από ένα "φλεγόμενο πλάσμα", όπου η αυτοθέρμανση

υπερβαίνει την εξωτερική εισροή ενέργειας για τη θέρμανση του πλάσματος, όπως είχε πρόσφατα επιτευχθεί. Στην προσέγγιση του αδρανειακού περιορισμού που χρησιμοποιείται για εφαρμογές καθαρού κέρδους και ενέργειας όπως στο NIF, η ανάφλεξη είναι απαραίτητη. Αντίθετα, μπορεί να μην απαιτείται για άλλες προσεγγίσεις σύντηξης, όπως για παράδειγμα στη σύντηξη με μαγνητικό περιορισμό στο πείραμα ITER (H. Abu-Shawareb et al, 2022).

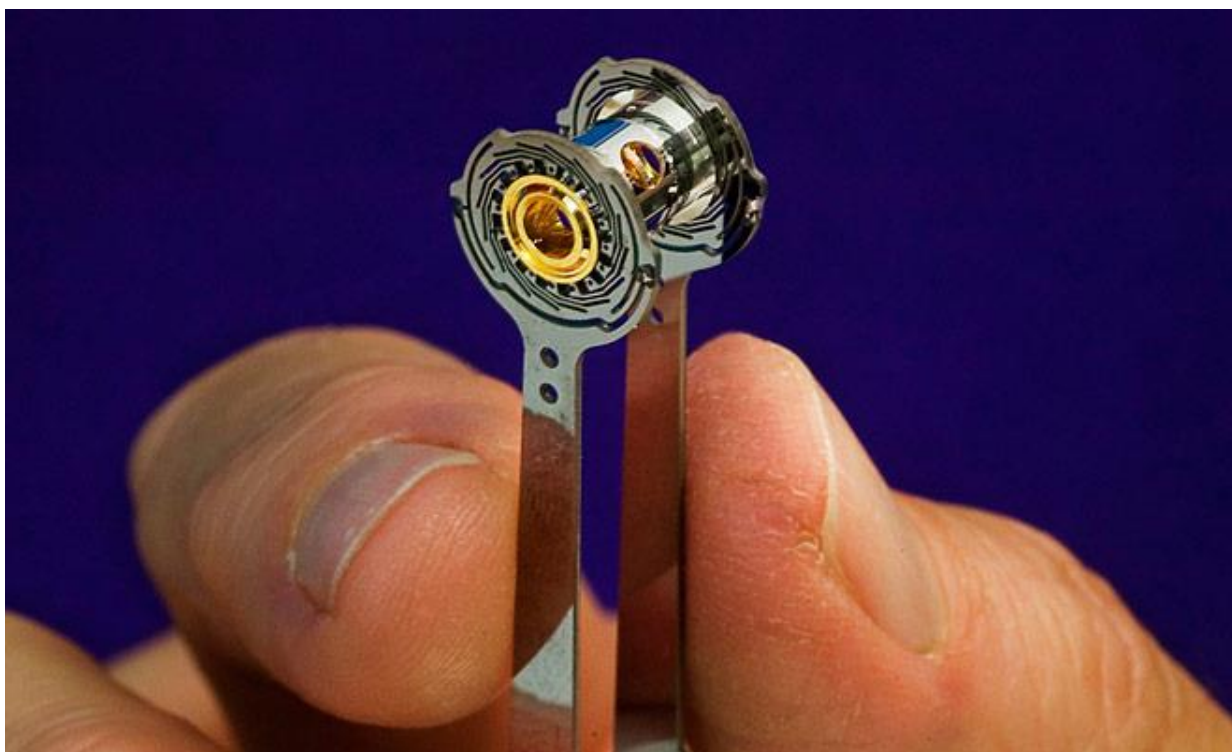
2.4.2.2 Η ανάφλεξη στο πείραμα του Δεκεμβρίου 2022

Το NIF χρησιμοποιεί την τεχνική του αδρανειακού περιορισμού με έμμεση κίνηση, που όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, μια μικροσκοπική κάψουλα από διαμάντι που περιέχει το πυρηνικό καύσιμο (μείγμα δευτέρου και τρίτιου) περικλείεται σε μια μικρή κοιλότητα κατασκευασμένη από χρυσό, το hohlraum, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 25. Στο πείραμα, τα 192 laser στοχεύουν πάνω σε αυτή την κάψουλα και εισέρχονται από το πάνω και το κάτω μέρος της παράγοντας ακτίνες x κατά την πρόσκρουση οι οποίες στη συνέχεια προκαλούν εξάτμιση και διαφυγή προς τα έξω. Η δύναμη αντίδρασης που ασκείται στο υπόλοιπο τμήμα του στόχου τον ωθεί προς τα μέσα, προκαλώντας τη συμπίεση του καυσίμου. Ταυτόχρονα, τα ωστικά κύματα που δημιουργούνται διαδίδονται προς τα μέσα μέσω του στόχου, και τα πιο ισχυρά από αυτά μπορούν να συμπίεσουν και να θερμάνουν το καύσιμο στο κέντρο του προκαλώντας σύντηξη. Οι αντιδράσεις σύντηξης απελευθερώνουν σωματίδια υψηλής ενέργειας που συγκρούονται με το καύσιμο υψηλής πυκνότητας γύρω τους και επιβραδύνονται, θερμαίνοντας το καύσιμο ακόμα περισσότερο. Αν οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας φτάσουν σε αρκετά υψηλά επίπεδα, αυτή η διαδικασία θέρμανσης μπορεί να οδηγήσει σε μια αλυσιδωτή αντίδραση που καίει από το κέντρο που ξεκίνησε το ωστικό κύμα προς τα έξω. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας θα είναι ένα μεγάλο μέρος του καυσίμου του στόχου να υποστεί σύντηξη παράγοντας σημαντικά ποσά ενέργειας. Αυτή η συνθήκη ονομάζεται και ανάφλεξη (Kavila, 2023).

Η παραπάνω διαδικασία παρουσιάζεται συνοπτικά στην Εικόνα 24, όπου φαίνεται ένα σχέδιο της κοιλότητας με το σημείο εισόδου των ακτίνων laser στο πάνω μέρος, τις κατευθύνσεις που παίρνουν οι ακτίνες μέσα στην κοιλότητα και την κάψουλα καυσίμου στο κέντρο.



Εικόνα 24. Σχέδιο της κοιλότητας που περιέχει την κάψουλα καυσίμου (hohlraum) στο NIF (Πηγή ιστοσελίδα :<https://www.llnl.gov/>).



Εικόνα 25. Φωτογραφία του hohlraum του NIF (Πηγή ιστοσελίδα :<https://www.llnl.gov/>).

2.4.2.3 Η σύνδεση του επιτεύγματος του NIF με το μέλλον της ενέργειας σύντηξης

Το πείραμα του Δεκέμβρη του 2022 σηματοδοτεί την πρώτη φορά παγκοσμίως που παράγεται σε εργαστήριο περισσότερη ενέργεια αντιδράσεων σύντηξης από την απαιτούμενη ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε για την έναρξη της διαδικασίας, καθιστώντας το ένα από τα μεγαλύτερα επιστημονικά επιτεύγματα του 21^{ου} αιώνα. Εκτός από την επιστημονική σημασία του όμως, προκάλεσε μεγάλο ενθουσιασμό στην κοινότητα σύντηξης και κίνησε το ενδιαφέρον μεγάλων ιδιωτικών φορέων να επενδύσουν στην πυρηνική σύντηξη, που μέχρι πρόσφατα ήταν σκεπτικοί ή και αμφισβητούσαν την οικονομική βιωσιμότητα της. Στο άμεσο μέλλον προβλέπεται να ιδρυθούν αρκετές startup εταιρείες, ενώ μέχρι πρόσφατα σχεδόν ολόκληρη η έρευνα

πυρηνικής σύντηξης στηριζόταν σε μακροχρόνια στήριξη από δημόσιες επενδύσεις (Kramer,2023).

Ωστόσο, παρά την επιτυχία του πειράματος, υπάρχει ακόμα πολύς δρόμος για να μπορέσουμε να πούμε ότι έχουμε πραγματικό κέρδος ενέργειας καθώς στο ποσοστό κέρδους ενέργειας του πειράματος δεν υπολογίζεται το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που τροφοδοτεί τα laser για να λειτουργήσουν. Πιο συγκεκριμένα, η ενέργεια που χρησιμοποιήσαν τα 192 laser ήταν 300 MJ για αντίστοιχη παραγωγή 2.05 MJ ενέργειας laser και 3.15 MJ ενέργειας σύντηξης, δηλαδή η ενεργειακή απόδοση σύντηξης ήταν μικρότερη του 1%. Επιπλέον, για την επίτευξη των στόχων της πυρηνικής σύντηξης θα πρέπει ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας να πραγματοποιεί 10 βολές laser ανά δευτερόλεπτο και κατά συνέπεια να κατασκευάζονται και να χρησιμοποιούνται 1 εκατομμύριο κάψουλες με καύσιμο σύντηξης την ημέρα ενώ στο NIF μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο μία βολή την ημέρα. Τέλος, υπάρχουν και κάποιοι επιστήμονες που υποστηρίζουν τη προσέγγιση του αδρανειακού περιορισμού με άμεση κίνηση αντί για έμμεση που χρησιμοποιείται στο NIF που μπορεί να μεταφέρει λίγο μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας από τα laser στην κάψουλα καυσίμου.

Όπως και να 'χει , η πρόοδος που πραγματοποιείται στο NIF είναι ένα πολύ σημαντικό βήμα για την έρευνα πυρηνικής σύντηξης με αδρανειακό περιορισμό και παρουσιάζει αρκετές προοπτικές για τη δυνητική εμπορική αξιοποίηση της ενέργειας σύντηξης αλλά και δίνει ελπίδα στην επιστημονική κοινότητα για μεγάλες επενδύσεις που πολύ χρειάζεται αυτός ο τομέας για να εξελιχθεί. Άλλωστε, τα εμπόδια για την επίτευξη του στόχου είναι ακόμα πολλά και χρειάζεται να πραγματοποιηθούν πολλές ακόμα μηχανικές υπερβάσεις για να είναι το πρότυπο του NIF απόλυτα επιτυχημένο (Clery, 2022).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΤΕΧΝΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΗΜΕΡΙΝΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΣΥΝΤΗΞΗΣ ΚΑΙ ΟΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ

3.1 Περιγραφή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μία σύγκριση των τεχνικών χαρακτηριστικών των προγραμμάτων πυρηνικής σύντηξης που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Κατόπιν θα σχολιαστεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και τα οικονομικά κόστη των αντιδραστήρων πυρηνικής σύντηξης στο άμεσο μέλλον.

Αρχικά , θα συγκριθούν μεταξύ τους οι πειραματικοί αντιδραστήρες σύντηξης tokamak που συμβάλλουν στις έρευνες του προγράμματος ITER και ακολουθούν το μονοπάτι επίτευξης σύντηξης μαγνητικού περιορισμού από μεγάλες συσκευές.

Έπειτα θα γίνει μία σύντομη αναφορά στον αντιδραστήρα stellarator Wendelstein 7-X και σύγκριση του με τους αντιδραστήρες τύπου tokamak που αναφέρθηκαν.

Στη συνέχεια θα συγκριθούν οι πιο εξελιγμένοι αντιδραστήρες που βρίσκονται είτε σε φάση κατασκευής είτε σε εννοιολογική φάση, δηλαδή το πρόγραμμα ITER με τα εννοιολογικά σχέδια αντιδραστήρων που προορίζονται για εμπορική αξιοποίηση της πυρηνικής σύντηξης και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή με τους αντιδραστήρες EU DEMO και CFETR.

Τέλος θα γίνει μια σύντομη οικονομική ανάλυση και θα σχολιαστούν οι δυνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις μιας μονάδας παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιεί αντιδραστήρα πυρηνικής σύντηξης.

3.2 Σύγκριση αντιδραστήρων tokamak παρόμοιων με τον ITER

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν υπεραγώγιμοι αντιδραστήρες σύντηξης μικρότερου μεγέθους από τον ITER, αλλά παρόμοιας διάταξης tokamak, επομένως η σύγκρισή τους είναι εύκολη. Όλοι οι αντιδραστήρες αυτοί είναι πειραματικοί και λειτουργούν σε κράτη τα οποία είναι μέλη του προγράμματος ITER, επομένως παρέχουν σημαντικά δεδομένα για την αναβάθμιση του, τεστάροντας καινούριες τεχνολογίες και μελετώντας μηχανικές και επιστημονικές δυσκολίες. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, αυτοί είναι οι : JET (Ηνωμένο Βασίλειο), JT-60SA (Ιαπωνία), T-15MD (Ρωσία), EAST (Κίνα), KSTAR (Νότια Κορέα) και SST-1 (Ινδία). Από τη σύγκριση θα παραλειφθεί ο JET, παρά το μέγεθος και την ιστορικότητά του, καθώς δε βρίσκεται πια σε λειτουργία, ενώ στη σύγκριση θα προστεθεί και ο ITER καθώς αποτελεί το πρότυπο όλων των παραπάνω. Επιπλέον, δε θα γίνει κάποιο σχόλιο για τον ITER, καθώς παρότι είναι πρώτος σε όλες τις κατηγορίες, η κατασκευή του δεν έχει ολοκληρωθεί και δε βρίσκεται ακόμα σε λειτουργία (Meschini et al, 2023).

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκεντρωτικά τα 3 βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά για κάθε αντιδραστήρα, δηλαδή η μέγιστη ακτίνα R σε μέτρα (m), το ρεύμα πλάσματος I_p μετρημένο σε μιλιαμπέρ (MA) και το τοροειδές μαγνητικό πεδίο B μετρημένο σε Τέσλα (T). Στην αριστερή στήλη φαίνονται οι αντιδραστήρες. Με κόκκινο χρώμα ο ITER, καθώς δε βρίσκεται ακόμη σε λειτουργία.

Πίνακας 1: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αντιδραστήρων παρόμοιων με τον ITER.

	Μέγιστη Ακτίνα R (m)	Ρεύμα πλάσματος I_p (MA)	Τοροειδές μαγνητικό πεδίο B (T)
ITER	6.2	15	11.8
JT60-SA	3	5.5	2.25
T-15MD	1.48	2	2
EAST	1.85	1	3.5
KSTAR	1.8	2	3.5
SST-1	1.1	0.22	1.5

Παρατηρούμε στον Πίνακα 1 ότι τη μεγαλύτερη μέγιστη ακτίνα έχει ο JT-60SA ($R=3\text{m}$), κάτι που είναι λογικό, διότι είναι ο μεγαλύτερος εν ενεργεία αντιδραστήρας πυρηνικής σύντηξης στον κόσμο μετά από την απόσυρση του JET. Επιπλέον έχει με διαφορά το μεγαλύτερο ρεύμα πλάσματος ($I_p=5.5\text{ MA}$) καθώς η βασική ιδιότητά με την οποία έχει κατασκευαστεί είναι η ευελιξία διαμόρφωσης πλάσματος σε μεγάλο εύρος ισορροπιών μέσω της υψηλής ενέργειας θέρμανσης του πλάσματος (41 MW για 100s) με ουδέτερες ακτίνες και κύματα συχνότητας ECRF. Χάρη στη συχνότητα ECRF παρουσιάζει και αρκετά υψηλό τοροειδές μαγνητικό πεδίο ($B=2.25\text{ T}$), τρίτο μεγαλύτερο μεταξύ των εν ενεργεία αντιδραστήρων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4 (Kamada et al, 2022).

Στη συνέχεια παρατηρείται ότι ο αντιδραστήρας EAST έχει τη δεύτερη μεγαλύτερη μέγιστη ακτίνα ($R=1.85\text{ m}$) και το μεγαλύτερο τοροειδές μαγνητικό πεδίο μαζί με τον KSTAR ($B=3.5\text{ T}$). Άλλο κοινό χαρακτηριστικό που μοιράζονται ο EAST με τον KSTAR είναι οι μέγιστες ακτίνες τους καθώς είναι σχεδόν ίδιες όπως φαίνεται στον Πίνακα 2 ($R=1.85\text{m}$ για τον EAST και $R=1.8\text{ m}$ για τον KSTAR). Ωστόσο ο KSTAR υπερτερεί του EAST στο ρεύμα πλάσματος, καθώς έχει $I_p=2\text{ MA}$, ενώ ο EAST λειτουργεί με $I_p=1\text{MA}$. Γενικά, αυτοί οι δύο αντιδραστήρες έχουν αρκετά παρόμοια τεχνικά χαρακτηριστικά, καθώς και οι δύο αποτελούν πολύ εξελιγμένες συσκευές που

αναβαθμίζονται συνεχώς και αποτελούν την ερευνητική βάση για τη δυνητική κατασκευή αντιδραστήρων πυρηνικής σύντηξης εμπορικής κλίμακας στις χώρες τους (ο EAST προβλέπεται να είναι προκάτοχος του αντιδραστήρα επείδειξης CFETR στην Κίνα και ο KSTAR προβλέπεται να είναι προκάτοχος του K-DEMO στη Νότια Κορέα αντίστοιχα) (H.K. Park et al 2019; X. Gao et al, 2020).

Τέταρτος στη σύγκριση έρχεται ο Ρωσικός αντιδραστήρας T-15MD που παρουσιάζει τη δεύτερη μικρότερη μέγιστη ακτίνα ($R=1.48$ m) και το δεύτερο μικρότερο μαγνητικό πεδίο ($B=2$ T). Ωστόσο λειτουργεί με αρκετά δυνατό ρεύμα πλάσματος, ίσο με αυτό του KSTAR ($I_p=2$ MA), όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3, καθώς αποτελεί μια αρκετά πρωτοποριακή εγκατάσταση που δίνει έμφαση στα συστήματα θέρμανσης του πλάσματος που χρησιμοποιεί (P. P. Khvostenko et. al, 2020).

Τελευταίος σε όλες τις κατηγορίες έρχεται ο Ινδικός αντιδραστήρας SST-1, με μέγιστη ακτίνα $R=1.1$ m, ρεύμα πλάσματος $I_p=0.22$ MA και τοροειδές μαγνητικό πεδίο $B=1.5$ T. Οι χαμηλές αυτές τιμές οφείλονται στο μικρό του μέγεθος που υποδηλώνεται και από τη μέγιστη ακτίνα του. Παρόλα αυτά, είναι ο μοναδικός tokamak στον πλανήτη με υπεραγώγιμους μαγνήτες τοροειδούς πεδίου που για τις κρυο-σταθερές λειτουργίες του πραγματοποιεί δύο φάσεις ψύξης του ηλίου με αποτέλεσμα τη μειωμένη κατανάλωση ψυχρού ηλίου (S. Pradhan et al 2015).

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζεται για καλύτερη κατανόηση η κατάταξη των αντιδραστήρων για καθένα από τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά ξεχωριστά, όπως αναλύθηκε παραπάνω. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζεται ο ITER, καθώς δε βρίσκεται ακόμη σε λειτουργία.

Πίνακας 2: Κατάταξη των αντιδραστήρων παρόμοιων με τον ITER με βάση τη μέγιστη ακτίνα τους.

Μέγιστη Ακτίνα R (m)	
ITER	6.2
JT60-SA	3
EAST	1.85
KSTAR	1.8
T-15MD	1.48
SST-1	1.1

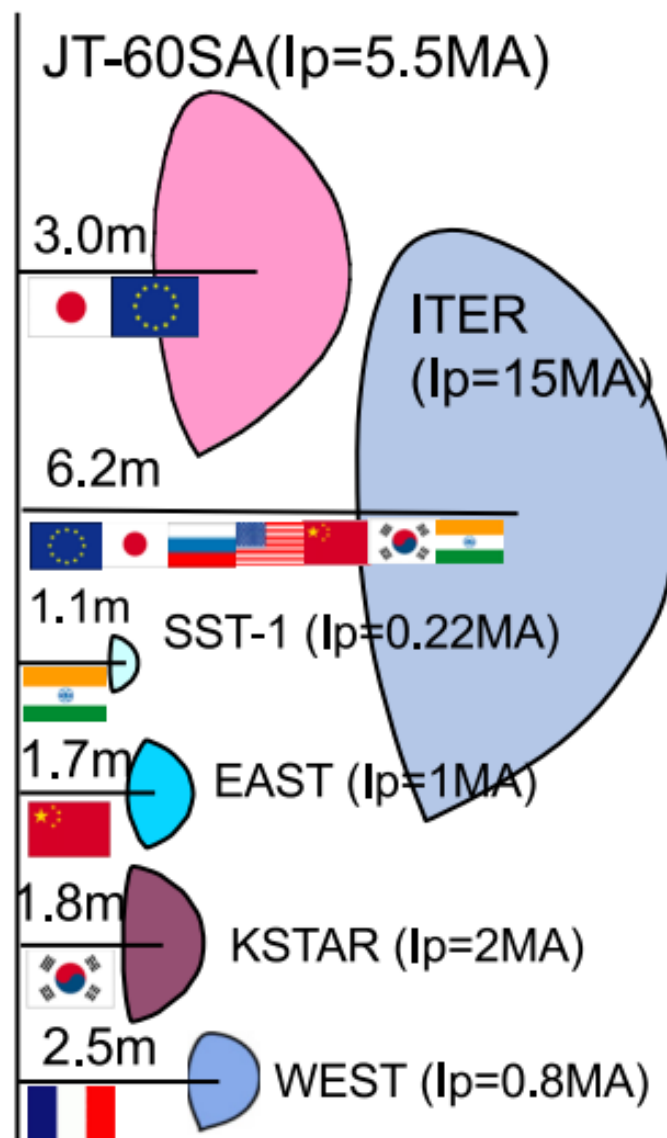
Πίνακας 3 : Κατάταξη των αντιδραστήρων παρόμοιων με τον ITER με βάση το ρεύμα πλάσματός τους

Ρεύμα πλάσματος I_p (MA)	
ITER	15
JT60-SA	5.5
T-15MD	2
KSTAR	2
EAST	1
SST-1	0.22

Πίνακας 4 : Κατάταξη των αντιδραστήρων παρόμοιων με τον ITER με βάση το τοροειδές μαγνητικό πεδίο τους.

Τοροειδές μαγνητικό πεδίο B (T)	
ITER	11.8
EAST	3.5
KSTAR	3.5
JT60-SA	2.25
T-15MD	2
SST-1	1.5

Μπορούμε να δούμε τις τιμές ρεύματος , τις μέγιστες ακτίνες και τις διατομές πλάσματος για κάθε αντιδραστήρα στην Εικόνα 26. Οι διατομές πλάσματος παρουσιάζονται με διαφορετικό χρώμα για τον αντιδραστήρα ITER και τους υπεραγώγιμους αντιδραστήρες tokamak που βρίσκονται σε λειτουργία σε διάφορες χώρες. Βλέπουμε σε παρένθεση τις τιμές μέγιστου ρεύματος πλάσματος που λειτουργεί ο κάθε αντιδραστήρας, τη σημαία της χώρας στην οποία λειτουργεί και πάνω από κάθε οριζόντια γραμμή την τιμή της μέγιστης ακτίνας για τον καθένα (Kamada et al, 2022).



Εικόνα 26. Ο αντιδραστήρας ITER και οι υπεραγώγιμοι αντιδραστήρες tokamak που βρίσκονται σε λειτουργία σε διάφορες χώρες. (Kamada et al, 2022).

Μετά τη σύγκριση και την παρουσίαση των παραπάνω πινάκων μπορούμε να καταλήξουμε εύκολα στο συμπέρασμα ότι ο JT60-SA είναι αυτή τη στιγμή ο πιο προηγμένος υπεραγώγιμος αντιδραστήρας σύντηξης παγκοσμίως. Όπως αναφέρθηκε

και στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελεί μία μεγάλη επένδυση της Ιαπωνίας σε συνεργασία με την Ευρωπαϊκή Ένωση που υπολογίζεται να φτάσει τα 560 εκατομμύρια ευρώ και θα λειτουργεί ως ο μεγαλύτερος αντιδραστήρας σύντηξης παγκοσμίως μέχρι την έναρξη της λειτουργίας του ITER (Kamada et al, 2022).

3.3 Τεχνική Σύγκριση του stellarator Wendelstein 7-X με τους tokamaks

Ο αντιδραστήρας Wendelstein 7-X που βρίσκεται στη Γερμανία ανήκει σε μια διαφορετική κατηγορία αντιδραστήρων από τους προηγούμενους, τους stellarators. Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκε μόνο ο W7-X, διότι είναι με διαφορά ο πιο εξελιγμένος stellarator παγκοσμίως. Επομένως, αντί να γίνει σύγκριση με κάποιον άλλο αντιδραστήρα ίδιου τύπου, θα γίνει μια σύντομη σύγκριση με τους tokamaks. Άλλωστε, στόχος του W7-X είναι η διερεύνηση πιθανών πλεονεκτημάτων απέναντι στους αντιδραστήρες τύπου tokamak.

Σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του, ο W7-X έχει μέγιστη ακτίνα $R=5.5$ m και το τοροειδές μαγνητικό του πεδίο ισούται με $B=3$ T. Αν συγκρίνουμε την ακτίνα του με αυτές των αντιδραστήρων tokamak, παρατηρούμε ότι ο W7-X έχει τη μεγαλύτερη ακτίνα από όλους τους tokamak που βρίσκονται αυτή τη στιγμή σε λειτουργία. Επιπλέον, το μαγνητικό του πεδίο είναι αρκετά ισχυρό, μεγαλύτερο και από αυτό του JT60-SA, και βρίσκεται πίσω μόνο από τα μαγνητικά πεδία των KSTAR και EAST, που η τιμή τους είναι $B=3.5$ T. Αυτό φαίνεται και από τον πολύ μεγάλο αριθμό πηνίων που χρησιμοποιεί, που είναι σύνολο 70 υπεραγωγίμα και άλλα 15 κανονικά πηνία, δηλαδή πολύ περισσότερα από αυτά που χρησιμοποιούν οι σημερινοί αντιδραστήρες tokamak.

Όσο για το ρεύμα πλάσματος, δεν υπάρχει καν στα χαρακτηριστικά του, αφού οι αντιδραστήρες stellarator πραγματοποιούν μαγνητικό περιορισμό χωρίς τη χρήση τοροειδούς ρεύματος πλάσματος. Αυτή είναι και η βασική διαφορά μεταξύ των

αντιδραστήρων tokamak και stellarator. Η απουσία ρεύματος πλάσματος στον W7-X οδηγεί στην αποφυγή ασταθειών και διαταραχών που εμφανίζονται σε αντιδραστήρες tokamak και επομένως σε λειτουργία χωρίς την απαίτηση λεπτομερή ελέγχου σταθερότητας.

Από την άλλη μεριά, η γεωμετρία του W7-X είναι διαφορετική ως stellarator από τους αντιδραστήρες tokamak. Η διαταξη των πηνίων είναι πιο περίπλοκη και ασύμμετρη και δεν υπάρχει κεντρικός σωληνοειδής όπως στους tokamak. Αποτέλεσμα είναι να μην επιτυγχάνεται αυτόματα επαρκής περιορισμός του θερμικού πλάσματος, σε αντίθεση με τους αντιδραστήρες tokamak που είναι καλύτεροι στο να διατηρούν το πλάσμα σε υψηλές θερμοκρασίες

Όπως και να'χει, έχει αναπτυχθεί μια ιδέα δημιουργίας σταθμού παραγωγής ενέργειας βασισμένη στον Wendelstein 7-X και παρά τη σημερινή επικράτηση των tokamaks, δεν αποκλείεται στο μέλλον οι stellarators να αποτελέσουν προτιμότερη εναλλακτική για ένα μελλοντικό εργοστάσιο πηρυνικής ενέργειας σύντηξης (Wolf et al, 2016; Dinklage et al, 2018).

3.4 Τεχνική Σύγκριση των πιο εξελιγμένων αντιδραστήρων

Σε αυτή την κατηγορία ανήκει ο αντιδραστήρας ITER στη Γαλλία ο οποίος είναι υπό κατασκευή που προβλέπεται να ολοκληρωθεί το 2025, ο αντιδραστήρας CFETR στην Κίνα, του οποίου η κατασκευή δεν έχει ξεκινήσει ακόμα και προβλέπεται να ολοκληρωθεί τη δεκαετία του 2030 και οι αντιδραστήρες επίδειξης ή αλλιώς DEMO, οι οποίοι αποτελούν το επόμενο βήμα και υποθετικά θα μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από την ενέργεια σύντηξης. Από αυτούς πιο πολύ έχει γίνει αναφορά στον Ευρωπαϊκό αντιδραστήρα EU DEMO, οπότε θα χρησιμοποιηθεί αυτός για τη σύγκριση. Σε αυτή την κατηγορία, εκτός από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των

αντιδραστήρων μπορεί να συγκριθεί και η παραγόμενη ενέργεια σύντηξης που υπολογίζεται ότι θα έχει ο καθένας (Yuntao Song et al, 2022).

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των τριών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5 : Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των πιο εξελιγμένων αντιδραστήρων

	Μέγιστη Ακτίνα R(m)	Ρεύμα πλάσματος I_p (MA)	Τοροειδές μαγνητικό πεδίο B (T)
ITER	6.2	15	11.8
CFETR	7.2	13	6.5
EU DEMO	9.47	20	6.5

Παρατηρούμε στον Πίνακα 5 ότι ο ITER έχει τη μικρότερη ακτίνα $R=6.2\text{m}$ καθώς θα είναι ο μικρότερος σε μέγεθος από τους 3 αντιδραστήρες και ακολουθεί ο CFETR με λίγο μεγαλύτερη ακτίνα στα $R=7.2\text{ m}$. Οι δύο τους αυτοί αντιδραστήρες έχουν και πολύ παρόμοιο ρεύμα πλάσματος με τον ITER να υπερέχει για 2MA. Τη μεγαλύτερη ακτίνα φαίνεται να έχει ο EU DEMO ο οποίος θα κατασκευαστεί με προδιαγραφές σταθμού παραγωγής ενέργειας για αυτό θα έχει και το πιο ισχυρό ρεύμα πλάσματος από τους τρεις με $I_p=20\text{ MA}$. Σχετικά με το τοροειδές μαγνητικό πεδίο, ο ITER φαίνεται να έχει το μεγαλύτερο με $B=11.8\text{ T}$ καθώς είναι σχεδιασμένος να διαθέτει περισσότερα πηνία από τους άλλους δύο αντιδραστήρες που θα παρουσιάζουν ίσα μαγνητικά πεδία των $B=6.5\text{ T}$. Ωστόσο η μέγιστη τιμή αυτών των μαγνητικών πεδίων ενδέχεται να είναι μεγαλύτερη όταν μπουν σε λειτουργία οι αντιδραστήρες αυτοί (Πηγή ιστοσελίδα : <https://www.iter.org/>).

Γενικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ITER και CFETR μοιάζουν αρκετά και αυτό είναι λογικό, καθώς και οι δύο έχουν το κοινό ότι είναι πειραματικοί αντιδραστήρες

και θα λειτουργήσουν σε χρονοδιάγραμμα δύο φάσεων. Ο CFETR βέβαια θα είναι πιο εξελιγμένος και θα πραγματοποιήσει τα απαραίτητα πειράματα και έρευνες για τη μετάβαση από τον ITER στον EU DEMO, εστιάζοντας στον έλεγχο σταθερότητας πλάσματος που βρίσκεται σε θέρμανση, στην αναπαραγωγή και αυτοσυντήρηση τριτίου και στη συνεχή παραγωγή ενέργειας σύντηξης.

Η πιο βασική διαφορά που θα παρουσιάζουν οι CFETR και EU DEMO από τον ITER είναι ότι σχεδιάζονται να διαθέτουν ένα επιπλέον μέλος στον αντιδραστήρα τους, την κουβέρτα αναπαραγωγής τριτίου, η οποία αποτελεί το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό για την εξέλιξη των αντιδραστήρων πυρηνικής σύντηξης και τη μετάβαση από το πειραματικό στο επιτυχημένο στάδιο παραγωγής ενέργειας.

Μεταξύ των CFETR και EU DEMO υπάρχουν επίσης σημαντικές διαφορές. Ο πρώτος θα παραμένει πειραματικός αντιδραστήρας με στόχο τη βελτίωση εξαρτημάτων και λειτουργιών του ITER, ενώ EU DEMO θα είναι ένας ολοκληρωμένος σταθμός παραγωγής ενέργειας, βελτιωμένος και από τους δύο προηγούμενους σε όλους τους τομείς.

Σχετικά με την παραγωγή ενέργειας από τους τρεις αντιδραστήρες, μπορούν αρχικά να συγκριθούν ο ITER με τον CFETR που και οι δύο αποτελούνται από δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση του ITER στόχος είναι η επίτευξη ενεργειακού κέρδους $Q=10$ σε υβριδικό πλάσμα και η διατήρησή του για 400 δευτερόλεπτα με παραγωγή 500 MW ενέργειας σύντηξης, ενώ στην πρώτη φάση του CFETR στόχος είναι η επίτευξη ενεργειακού κέρδους $Q=1-5$ σε πλάσμα σταθερής κατάστασης με παραγωγή 50-200 MW ενέργειας σύντηξης. Στη δεύτερη φάση του ITER στόχος είναι η διατήρηση ενεργειακού κέρδους $Q=5$ για 3000 δευτερόλεπτα με παραγωγή 350 MW ενέργειας σύντηξης και καύση πλάσματος σταθερής κατάστασης, ενώ στη δεύτερη φάση του CFETR η συσκευή θα είναι μεγαλύτερου μεγέθους και θα έχει στόχο την επικύρωση του σχεδίου κατασκευής ενός αντιδραστήρα επίδειξης παράγοντας ενέργεια σύντηξης $P_{\text{fusion}} > 1 \text{ GW}$ και κέρδος ενέργειας σύντηξης $Q > 10$. Αυτά τα δεδομένα

παρουσιάζονται καλύτερα στην παρακάτω εικόνα. Στην Εικόνα 27 βλέπουμε το χρονοδιάγραμμα της πυρηνικής σύντηξης μαγνητικού περιορισμού στην Κίνα. Φαίνεται η πορεία από μικρότερους αντιδραστήρες από τους οποίους έχει γίνει αναφορά στον EAST, προς την κατασκευή ενός σταθμού παραγωγής ενέργειας. Δίπλα από τους αντιδραστήρες ITER και CFETR παρουσιάζονται και οι φάσεις που εξηγήθηκαν παραπάνω.

Από την άλλη μεριά, ο EU DEMO έχει στόχο την παραγωγή 2 GW ενέργειας σύντηξης που θα αντιστοιχούν περίπου σε 500 MW ηλεκτρικής ενέργειας με συντελεστή κέρδους ενέργειας σύντηξης για το δίκτυο $Q=10$ με αναπαραγωγή των απαιτούμενων ποσοτήτων τριτίου και το χτίσιμο εγκαταστάσεων και συστημάτων συντήρησης ικανά να στηρίζουν την εμπορική βιωσιμότητα του (Horvath-Rachlew, 2016; Yuanxi Wan et al, 2017; G. Federici et al 2019; Siccino et al, 2022).



Εικόνα 27 . Το χρονοδιάγραμμα της πυρηνικής σύντηξης μαγνητικού περιορισμού στην Κίνα. (Yuanxi Wan et al ,2017).

3.5 Οικονομική ανάλυση

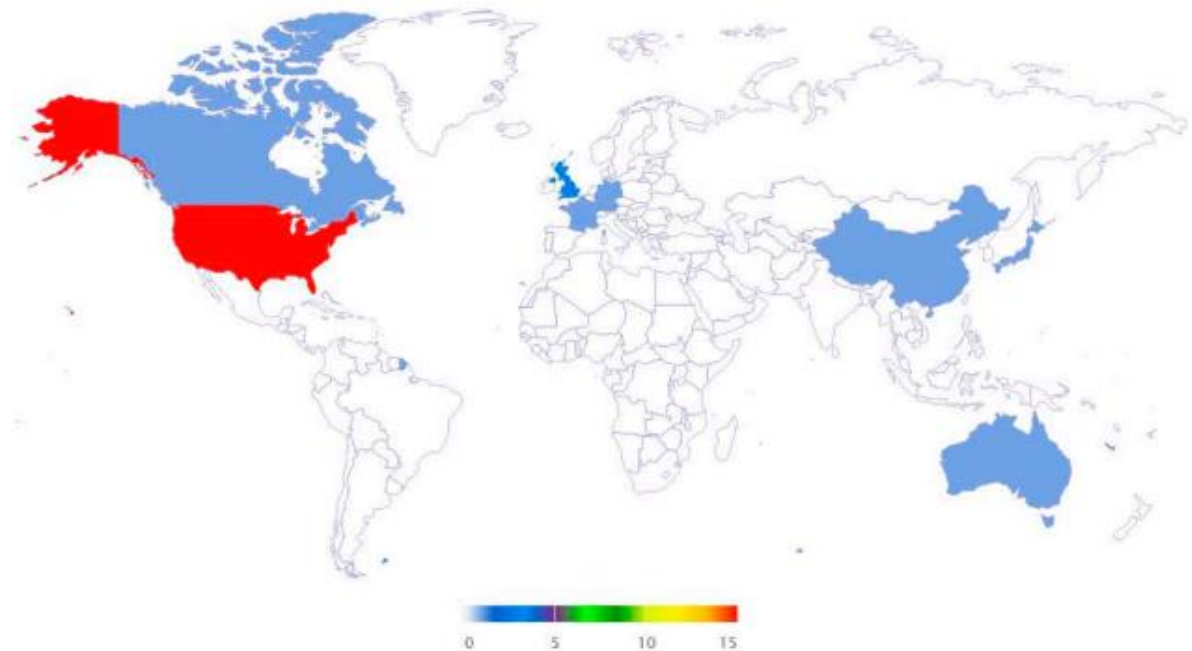
3.5.1 Οικονομικό κόστος μελλοντικών αντιδραστήρων σύντηξης

Ο υπολογισμός του κόστους των μελλοντικών αντιδραστήρων πυρηνικής σύντηξης είναι ένα δύσκολο έργο τόσο για τους αναλυτές όσο και για τις εταιρείες. Ωστόσο, δεν υπάρχει αμφιβολία ότι οι πειραματικοί αντιδραστήρες σύντηξης και οι σταθμοί

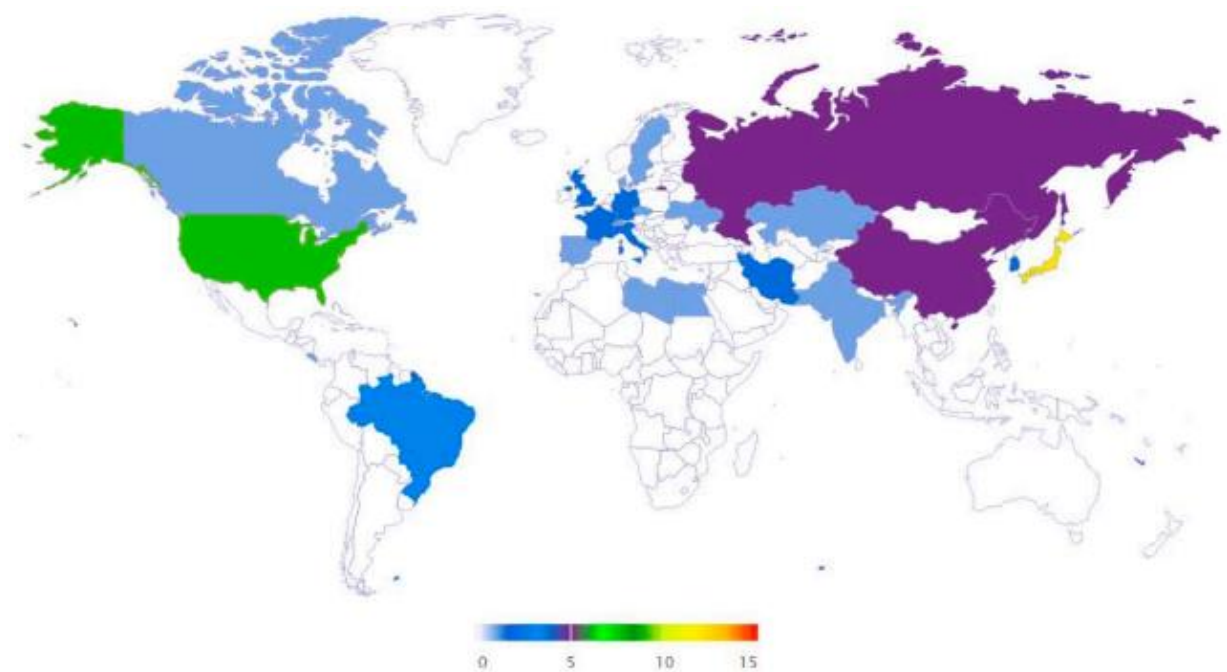
παραγωγής ενέργειας από σύντηξη θα απαιτήσουν τεράστιες επενδύσεις. Στον ιδιωτικό τομέα, τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει επενδύσεις ύψους 4.7 δισεκατομμυρίων δολλαρίων (Meschini et al, 2023). Οι περισσότερες από αυτές τις ιδιωτικές επενδύσεις λαμβάνουν χώρα στις Η.Π.Α και γενικότερα σε δυτικές χώρες (Εικόνα 28). Επί του παρόντος, η πλειονότητα των παγκόσμιων κρατικών προσπαθειών σύντηξης εργάζεται προς την πραγματοποίηση του προγράμματος ITER, που υπολογίζεται να κοστίσει συνολικά περίπου 22 δισεκατομμύρια δολάρια (Kramer, 2018). Οι κρατικές επενδύσεις είναι ακόμη πιο διαδεδομένες και υψηλότερες από τις ιδιωτικές στον παγκόσμιο χάρτη (Εικόνα 29). Όμως το κόστος του ITER δεν είναι αντιπροσωπευτικό ενός μελλοντικού εμπορικού αντιδραστήρα σύντηξης, καθώς παραμένει ένας πειραματικός αντιδραστήρας χωρίς κουβέρτα αναπαραγωγής τρίτου, η οποία φαίνεται πως είναι απαραίτητο μέλος ενός αντιδραστήρα σύντηξης με στόχο την παραγωγή ενέργειας για το δίκτυο.

Το κόστος ενός πυρηνικού αντιδραστήρα μπορεί να είναι είτε εσωτερικό, δηλαδή το κόστος κατασκευής, λειτουργίας, συντήρησης, κόστος καυσίμων που επηρεάζει την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είτε εξωτερικό, δηλαδή το κόστος που δεν αποτυπώνεται στις πληρωμές των καταναλωτών και σχετίζεται με την υγεία και το περιβάλλον. Η πυρηνική σύντηξη μέχρι σήμερα φαίνεται πως αποτελεί μια μορφή ενέργειας με μικρές επιπτώσεις για το περιβάλλον, επομένως η μεγάλη πλειοψηφία των εξόδων προβλέπεται να είναι για τα εσωτερικά κόστη. Από τα εσωτερικά κόστη, το μεγαλύτερο είναι το κόστος κατασκευής, ενώ λιγότερα κεφάλαια απαιτούνται για τις φάσεις λειτουργίας και συντήρησης. Γενικά, οι μονάδες σύντηξης είναι οικονομικά παρόμοιες με τις μονάδες σχάσης. Απαιτούνται μεγάλες κεφαλαιουχικές δαπάνες που προκύπτουν από τα εξαρτήματα των αντιδραστήρων, τα πρότυπα ασφαλείας, την πυρηνική αδειοδότηση, τον παροπλισμό και τη διαχείριση πυρηνικών αποβλήτων. Ακόμη προκύπτουν συνεχώς κόστη συντήρησης, λειτουργίας, αναβάθμισης εξοπλισμού, αποπληρωμές τόκων και το σχετικά χαμηλό κόστος καυσίμων. Η σύντηξη με μαγνητικό περιορισμό απαιτεί επίσης ειδικά μεγάλους και

ακριβούς μαγνήτες. Αυτές οι μεγάλες κεφαλαιουχικές δαπάνες που θα παρουσιάσουν οι αντιδραστήρες πρώτης γενιάς, αλλά και το υψηλό οικονομικό ρίσκο σχετικά με την αρχική τους απόδοση θα οδηγήσουν σε υψηλά επιτόκια που θα επιβαρύνουν τους χρηματοδότες. Τα κρατικά περιουσιακά στοιχεία έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να αναλάβουν αυτούς τους κινδύνους περισσότερο ελεύθερα, καθώς οι αυξήσεις του κόστους αυτού του τύπου είναι λιγότερο σοβαρές γι' αυτά από ό,τι για τις ιδιωτικές επιχειρήσεις. Ωστόσο, με το σημερινό παράδειγμα που μετατοπίζεται προς τις ιδιωτικές επιχειρήσεις στην ανάπτυξη της σύντηξης, αυτό είναι ένα σημαντική λεπτομέρεια που πρέπει να αξιολογηθεί.



Εικόνα 28. Γεωγραφία ιδιωτικών εταιρειών που ασχολούνται με προγράμματα σύντηξης (Meschini et al, 2023).



Εικόνα 29. Γεωγραφία δημόσιων ιδρυμάτων που επενδύουν στην έρευνα πυρηνικής σύντηξης (Meschini et al, 2023).

Επιπλέον, υπάρχουν κι άλλα εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν πριν γίνει οικονομική αποτίμηση εμπορικών αντιδραστήρων σύντηξης. Καταρχάς, υπάρχει ακόμη αβεβαιότητα για το αν μπορεί να επιτευχθεί εμπορικά η σύντηξη και αυτή τη στιγμή γίνονται υποθέσεις χωρίς συνοδευτικά εμπειρικά στοιχεία. Αυτό που είναι σαφές από αυτά τα μοντέλα είναι ότι η περιφερειακή ανάδυση της σύντηξης θα εξαρτάται κυρίως από την κυβέρνηση, και όπου κυριαρχούν αντιπυρηνικές πολιτικές, η εμπορική αξιοποίηση της σύντηξης μπορεί να υποφέρει. Ακόμη, οι επιστήμονες δεν έχουν καταλήξει ακόμα ποια μέθοδος περιορισμού είναι η πιο αποτελεσματική για την επίτευξη εμπορικής σύντηξης και απαιτούνται περαιτέρω έρευνες και πειράματα για αυτή τη διαπίστωση, καθώς ο τύπος της συσκευής πλάσματος (tokamak ή laser)

θα επηρεάσει και το κόστος της. Θα πρέπει επίσης να διεξαχθεί συμπληρωματική ανάλυση κόστους τόσο για τον κύκλο καυσίμων σύντηξης όσο και για τον απομακρυσμένο χειρισμό σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας από σύντηξη, είτε κατά τη λειτουργία είτε κατά τον ανεφοδιασμό, καθώς αυτό μπορεί να αποτελέσει σημαντικό πρόσθετο και μη εξεταζόμενο κόστος. Απαιτείται επίσης βαθύτερη κατανόηση της ταξινόμησης των αποβλήτων που δημιουργούνται από τη σύντηξη, αλλά και μια αναθεώρηση των υφιστάμενων ταξινομήσεων με βάση τους κινδύνους και τους τύπους αποβλήτων σύντηξης.

Συμπερασματικά, ο υπολογισμός του οικονομικού κόστους των μελλοντικών αντιδραστήρων πυρηνικής σύντηξης είναι ένα σύνθετο εγχείρημα και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι : η επιστημονική απόδειξη της σύντηξης και της δημιουργίας ενός αντιδραστήρα επείδειξης, η ταχύτητα με την οποία μπορεί να αναπτυχθεί η νέα τεχνολογία και η χρονολογία εισαγωγής της στην παγκόσμια αγορά και η υπέρβαση του δύσκολου αρχικού σταδίου κατασκευής ενός σταθμού παραγωγής ενέργειας όπου οι απαιτούμενες επενδύσεις είναι ανεπαρκείς λόγω του υψηλού ρίσκου των επενδύτων (Cardozo, 2019; Nicholas et al, 2021; Thomas Griffiths et al, 2022).

3.5.2 Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας σύντηξης

Μέχρι στιγμής έχει γίνει αναφορά στο κόστος κατασκευής των αντιδραστήρων και στο κόστος παραγωγής ενέργειας, αλλά εξίσου σημαντικό είναι το μελλοντικό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που θα παράγεται μέσω της πυρηνικής σύντηξης για εμπορική χρήση. Ένας σημαντικός παράγοντας που θα επηρεάσει αυτό το κόστος είναι η μελλοντική αγορά της ενέργειας. Όλα δείχνουν ότι στο άμεσο μέλλον πρέπει να ακολουθηθεί μια παγκόσμια ενεργειακή πολιτική με στόχο τη μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές για την καταπολέμηση της περιβαλλοντικής κρίσης. Αυτή τη στιγμή στον πλανήτη πολλές μεγάλες δυνάμεις όπως οι ΗΠΑ, η ΕΕ, Καναδάς,

Ιαπωνία και άλλες, βλέποντας την εμπορική συνεργατιδιά τους Κίνα να αυξάνει συνεχώς το εμπορικό πλεόνασμά της, έχουν στραφεί σε νέες οικονομικές στρατηγικές, τριπλασιάζοντας το 2023 τις βιομηχανικές τους πολιτικές σε σχέση με τέσσερα χρόνια πριν. Βασικοί λόγοι πίσω από αυτή την κίνηση είναι η ανθεκτικότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας, οι ανησυχίες για την εθνική ασφάλεια και ο μετριασμός της κλιματικής αλλαγής. Αυτές οι πολιτικές, παρότι είναι αμφιλεγόμενες και κρύβουν γεωπολιτικές στρατηγικές πίσω τους, αν σχεδιαστούν ορθά μπορούν να ευνοήσουν την ανάπτυξη πράσινων τεχνολογιών μεταξύ αυτών και την πυρηνική σύντηξη (Πηγή ιστοσελίδα:<https://www.liberal.gr/oikonomia/nees-oikonomikes-sheseis-me-tin-kina>).

Η πυρηνική σύντηξη έχει τις προοπτικές να είναι προτιμότερη από τις σημερινές πηγές ανανεώσιμης ενέργειας, καθώς αν επιτευχθεί θα παράγει πολύ μεγαλύτερα ποσά ενέργειας από την ηλιακή, την αιολική και τον υδροηλεκτρισμό. Επιπλέον, θα έχει προβάδισμα έναντι της πυρηνικής σχάσης καθώς παρουσιάζει πολύ μικρότερο περιβαλλοντικό κίνδυνο ραδιενέργειας, κάνοντας τη κοινωνικά και πολιτικά πιο αποδεκτή. Έτσι, η πυρηνική σύντηξη μπορεί, χάρη στα ανεξάντλητα καύσιμα που χρησιμοποιεί, να στοχεύσει στην παραγωγή ηλεκτρισμού σε χαμηλό κόστος και χαμηλών εκπομπών άνθρακα και, ως εκ τούτου, να αποτελέσει βασικό μέρος του μείγματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μετά το 2040. Όπως και να 'χει, για να είναι η σύντηξη ανταγωνιστική μετά το 2040 με το κόστος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, το κόστος παραγωγής θα πρέπει να είναι το πολύ \$80-100/MWh. (Lindley et al, 2023).

Αυτό το ενδεχόμενο φαντάζει πιθανό αν λάβουμε υπόψη μας και τους μακροχρόνιους οικονομικούς μεγάλους κύκλους διάρκειας 56 ετών. Αυτοί αποτελούνται αρχικά σε έναν οικονομικό κύκλο διάρκειας 28 ετών στασιμότητας ή και ύφεσης όπου εμφανίζονται νέες τεχνολογίες που επιφέρουν δραστικές μεταβολές στην οικονομία και την κοινωνία αυξάνοντας την παραγωγικότητα. Η διάδοση και καθιέρωση των νέων τεχνολογιών οδηγεί σε έναν νέο οικονομικό κύκλο ανάπτυξης και ευημερίας διάρκειας 28 ετών. Το 2024 ξεκίνησε ένας τέτοιος μακροχρόνιος οικονομικός

μεγακύκλος που θα ολοκληρωθεί το 2080. Τα επόμενα χρόνια θα αναπτυχθεί ακόμα περισσότερο η τεχνολογία της σύντηξης μεταξύ άλλων και μετά τη δεκαετία του 2040 θα ξεκινήσουν οι προσπάθειες εμπορευματοποίησής της (Πηγή ιστοσελίδα:<https://www.liberal.gr/oikonomia/problepontos-ton-epomeno-oikonomiko-megakyklo>) .

3.6 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα

3.6.1 Περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα της σύντηξης

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, αποτελεί κοινή αποδοχή ότι η ανθρωπότητα χρειάζεται να μειώσει σημαντικά την εξάρτησή της από τα ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή ενέργειας, λόγω της περιορισμένης διάθεσής τους, αλλά και των εκπομπών τους σε διοξείδιο του άνθρακα που αποτελεί την κύρια αιτία της κλιματικής αλλαγής και του φαινομένου του θερμοκηπίου. Σε αυτό το πλαίσιο πολλές κυβερνήσεις στρέφονται προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, χωρίς να φτάνουν όμως στο επιθυμητό αποτέλεσμα παραγόμενης ενέργειας. Για αυτό το λόγο, νέες τεχνολογίες όπως η πυρηνική σύντηξη, φαίνονται πολλά υποσχόμενες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο κοντινό μέλλον χωρίς την εξάρτηση από ορυκτούς πόρους (Donné AJH ,2019).

Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Χάρτη Πορείας προς τη Σύντηξη που δημοσιεύτηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση το 2012, η σύντηξη παρουσιάζει πλεονεκτήματα που εξασφαλίζουν τη βιωσιμότητα και την ασφάλεια εφοδιασμού : τα καύσιμα της είναι ευρέως διαθέσιμα και πρακτικά ανεξάντλητα, αποφεύγεται η παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου και είναι πολύ ασφαλέστερη από την πυρηνική σχάση καθώς δεν πραγματοποιείται αλυσιδωτή αντίδραση. Επιπλέον είναι και περιβαλλοντικά υπεύθυνη, καθώς με την προϋπόθεση ότι γίνει η κατάλληλη επιλογή υλικών για την αντίδραση στο θάλαμο, η ραδιενέργεια διασπάται σε μερικές δεκάδες χρόνια και σε

περίπου 100 χρόνια μετά το κλείσιμο του αντιδραστήρα όλα τα υλικά μπορούν να ανακυκλωθούν σε έναν νέο αντιδραστήρα (Romanelli et al, 2012).

3.6.2 Διαχείριση των αποβλήτων των αντιδραστήρων σύντηξης

Όσο περνάνε τα χρόνια και αναπτύσσεται η τεχνολογία της πυρηνικής σύντηξης με όλο και πιο σημαντικά πειραματικά επιτεύγματα, ερχόμαστε πιο κοντά στην πραγματοποίηση ενός αντιδραστήρα επίδειξης (DEMO) και των επακόλουθων εργοστασίων παραγωγής ενέργειας σύντηξης. Για την εγκατάσταση τέτοιων μονάδων θα πρέπει να γίνει αδειοδότηση, άρα οι αντιδραστήρες σύντηξης πρέπει να ακολουθούν κάποια επίσημα πρότυπα. Καθώς η πυρηνική σύντηξη βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο υπάρχει έλλειψη αναγνωρισμένων προτύπων και κατευθυντήριων γραμμών. Για αυτό το λόγο το 2019 ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (IAEA) πραγματοποίησε ένα συνέδριο όπου τέθηκαν σε συζήτηση τα πιο σημαντικά θέματα για έναν σταθμό παραγωγής ενέργειας τέτοιου είδους, όπως είναι η τρέχουσα κατάσταση της διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων (RWM) από συσκευές σύντηξης, βασικές προκλήσεις που υποστηρίζονται από τεχνικά στοιχεία και πρακτικά μέσα για την επίλυση του προβλήματος των ραδιοαποβλήτων σύντηξης.

3.6.2.1 Είδη αποβλήτων σύντηξης

Όπως και στα εργοστάσια πυρηνικής σχάσης, έτσι και η σύντηξη μπορεί να δημιουργηθούν ραδιενεργά απόβλητα, διαφορετικής όμως μορφής. Η ποσότητα των ραδιενεργών αποβλήτων από ένα σταθμό ενέργειας σύντηξης είναι μεγαλύτερη από αυτή της σχάσης, ωστόσο αποτελείται κατά το πλείστον από απόβλητα χαμηλής και μέσης ραδιενέργειας και αποφεύγεται η παραγωγή αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας που απαιτούν ενεργή ψύξη. Ένα από τα σημαντικότερα ισότοπα που εντοπίζονται ραδιενεργά απόβλητα των συσκευών σύντηξης είναι το τρίτιο. Η περιεκτικότητα σε

τρίτιο στο εσωτερικό των διαφόρων τύπων αποβλήτων αποτελεί βασική παράμετρο για την επιλογή της διαδικασίας επεξεργασίας των αποβλήτων. Υπολογίζεται ότι θα γίνει προσπάθεια ανάκτησης ποσοτήτων του από τα απόβλητα για την επαναχρησιμοποίησή του και την αποφυγή περιβαλλοντικών εκπομπών κατά την αποθήκευσή του. Άλλα ραδιενεργά ισότοπα που μπορούν να βρεθούν στα απόβλητα προέρχονται από στοιχεία σαν το νιόβιο, το μολυβδαίνιο, το νικέλιο, τον άνθρακα, το άζωτο, το χαλκός και το αλουμίνιο και επίσης από ανεξέλεγκτες προσμίξεις τους. Επιπλέον, μεγάλο μέρος των αποβλήτων σύντηξης αποτελείται από δομικά υλικά, κυρίως διάφορους τύπους χάλυβα, από τους οποίους κατασκευάζονται οι περισσότεροι αντιδραστήρες σύντηξης στην Ευρώπη. Για την κατασκευή των αντιδραστήρων σύντηξης μετά τον ITER θα χρειαστούν χιλιάδες τόνοι χάλυβα γι' αυτό είναι πολύ σημαντικό να αναπτυχθεί μια στρατηγική παροπλισμού για αυτά τα υλικά. Ακόμη, πλαστικά απόβλητα θα παράγονται συνεχώς κατά τις φάσεις λειτουργίας και συντήρησης των εγκαταστάσεων.

3.6.3 Επιλογές διαχείρισης των ραδιενεργών αποβλήτων σύντηξης

Το ζήτημα της επεξεργασίας και της διαχείρισης των ραδιενεργών αποβλήτων τίθεται συχνά για τις εγκαταστάσεις σύντηξης. Οι τρεις βασικές επιλογές που μπορούν να εφαρμοστούν για τη μείωση του όγκου των ραδιενεργών αποβλήτων που θα καταλήξουν στο έδαφος είναι η απόρριψη, η ανακύκλωση και η εκκαθάριση.

3.6.3.1 Απόρριψη ραδιενεργών αποβλήτων σύντηξης

Η απόρριψη ραδιενεργών αποβλήτων σύντηξης στο περιβάλλον μετά την επεξεργασία και την αποθήκευσή τους περιλαμβάνει κινδύνους λόγω της αρχικής υψηλής δραστηριότητας των υλικών και των μεγάλων ποσοτήτων τρίτιου. Το τρίτιο έχει την τάση να διαχέεται σε όλα τα υλικά από τα οποία είναι χτισμένη μια

εγκατάσταση απόρριψης ραδιενεργών αποβλήτων κάνοντας εξαιρετικά δύσκολη τη διαχείρισή του. Για αυτό θα πρέπει να γίνει προσεκτική μελέτη πριν την κατασκευή τέτοιων εγκαταστάσεων και τα απόβλητα τρίτου να αντιμετωπίζονται ως απόβλητα μεσαίας ραδιενέργειας. Πάντως η απόρριψη φαντάζει ως η λιγότερο καλή επιλογή διαχείρισης λόγω υψηλού κόστους, πολιτικών δυσκολιών στη δημιουργία ορίων χωρητικότητας, φόβος για πιθανά ατυχήματα στις αποθήκες αλλά και λόγω ηθικών λόγων όπως είναι η επιβάρυνση μελλοντικών γενεών με ραδιενεργά απόβλητα.

3.6.3.2 Ανακύκλωση ραδιενεργών αποβλήτων σύντηξης

Η διαδικασία ανακύκλωσης περιλαμβάνει την αποθήκευση σε συνεχώς παρακολουθούμενες εγκαταστάσεις, το διαχωρισμό των διαφόρων υλικών, τη θραύση, την τήξη και την επανακατασκευή. Τα ιδιαίτερα ραδιενεργά συστατικά απαιτούν ειδική θωράκιση κατά το χειρισμό και τη μεταφορά και κάποια από αυτά χρειάζονται ψύξη για αρκετές ημέρες ή εβδομάδες για την απομάκρυνση της θερμότητας διάσπασης. Η ανακύκλωση χρησιμοποιείται ήδη σε κάποιες χώρες για τη διαχείριση αποβλήτων χαμηλής ραδιενέργειας από εγκαταστάσεις πυρηνικής σχάσης και παρόλο που δε σχετίζεται άμεσα με τη σύντηξη, υπάρχει αισιοδοξία ότι θα μπορέσει να βοηθήσει πολύ στην πολύ γρήγορη εξέλιξη συστημάτων ανακύκλωσης των εγκαταστάσεων σύντηξης. Κάποια εμπόδια σε αυτή την επιλογή είναι ο διαχωρισμός ραδιενεργών στοιχείων από σύνθετα υλικά που μπορεί να προκύψει, η διαχείριση υλικών που περιέχουν τρίτο, οι ενεργειακές ανάγκες ανακύκλωσης, το κόστος των ανακυκλωμένων προϊόντων και η κοινωνικοπολιτική αποδοχή της χρήσης ανακυκλωμένων ραδιενεργών υλικών.

3.6.3.3 Εκκαθάριση ραδιενεργών αποβλήτων σύντηξης

Σύμφωνα με το Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας εκκαθάριση ορίζεται ως η απομάκρυνση ραδιενεργών υλικών ή ραδιενεργών αντικειμένων στο πλαίσιο εγκεκριμένων πρακτικών από κάθε περαιτέρω ρυθμιστικό έλεγχο από το ρυθμιστικό φορέα. Μόλις πληρούνται τα κριτήρια εκκαθάρισης που έχει θέσει η αρμόδια αρχή, τα εν λόγω υλικά δε θεωρούνται πλέον ραδιενεργά. Από το σημείο αυτό και μετά, τα υλικά αυτά δεν απαιτούν περαιτέρω παρακολούθηση της ακτινοπροστασίας. Η εφαρμογή μιας πολιτικής εκκαθάρισης απαιτεί επίσημα όρια εκκαθάρισης που εκδίδονται από τις νομικές αρχές, ακριβείς μετρήσεις και μείωση των ακαθαρσιών που αποτρέπουν την απομάκρυνση των εξαρτημάτων εντός του δοχείου και εγκατάσταση προσωρινής αποθήκευσης μεγάλης χωρητικότητας και χαμηλού κόστους (Sehila M. Gonzalez de Vicente et al 2022).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω θα μπορούσαμε να πούμε ότι η πυρηνική σύντηξη είναι μια πολλά υποσχόμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με ανεξάντλητους πόρους , η οποία παρουσιάζει σημαντικές προοπτικές να ενταχθεί σταδιακά στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα μετά το 2050. Είναι ακόμη ασφαλέστερη από την πυρηνική σχάση και έχει τη δυνατότητα να αποφύγει την παραγωγή αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας. Ωστόσο οι όγκοι αποβλήτων χαμηλής και μεσαίας ραδιενέργειας που προκαλεί είναι μεγάλοι και για αυτό πρέπει να αναπτυχθεί μια στρατηγική διαχείρισης τους, ώστε η πυρηνική σύντηξη να μπορέσει να αξιοποιηθεί ως μια βιώσιμη και καθαρή εναλλακτική πηγή ενέργειας. Για αυτό το λόγο οι απαιτήσεις του αντιδραστήρα επίδειξης και των μελλοντικών σταθμών παραγωγής ενέργειας σύντηξης πρέπει να περιλαμβάνουν :

- προσεκτική επιλογή υλικών για την παραγωγή, με όσο το δυνατόν λιγότερα λειτουργικά και αποσυναρμολογούμενα ραδιενεργά απόβλητα
- τμηματοποίηση του σχεδιασμού των εξαρτημάτων για την παράταση της διάρκειας ζωής τους, πιθανή αποσυναρμολόγηση των στοιχειωδών εξαρτημάτων για το διαχωρισμό τους ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε ραδιενέργεια
- μεγιστοποίηση της ανακύκλωσης και της εκκαθάρισης αποβλήτων
- ελαχιστοποίηση της απόρριψης αποβλήτων
- ελαχιστοποίηση του αποθέματος τριτίου σε δομές και εξαρτήματα
- σχεδιασμός νέου και αναβάθμιση υπάρχοντος εξοπλισμού επεξεργασίας αποβλήτων για την άμεση χρήση του στα πρώτα στάδια λειτουργίας των μονάδων παραγωγής ενέργειας σύντηξης
- καθιέρωση μιας κοινής μεθοδολογίας παγκοσμίως για τον υπολογισμό του όγκου των ραδιενεργών αποβλήτων από τις εγκαταστάσεις σύντηξης

Όσον αφορά την οικονομική πλευρά, το κόστος κατασκευής των αντιδραστήρων πυρηνικής σύντηξης αυτή τη στιγμή φαντάζει υψηλό και είναι δύσκολο να υπολογιστεί με τις σημερινές γνώσεις μας. Ωστόσο, η ραγδαία ανάπτυξη νέων τεχνολογιών σε συνδυασμό με τις σύγχρονες πολιτικές που στρέφονται προς την πράσινη ενέργεια, κινούν το ενδιαφέρον τόσο των κρατών, αλλά και πολλών ιδιωτών επενδυτών να χρηματοδοτήσουν την έρευνα πυρηνικής σύντηξης για παραγωγή ενέργειας, ώστε να γίνει οικονομικά βιώσιμη. Το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής σε συνδυασμό με τη συνεχή μείωση των ορυκτών πόρων καθιστούν απαραίτητη τη στροφή σε καθαρή και φθηνή ενέργεια , κάτι που φαντάζει μονόδρομος για την οικονομική ανάπτυξη και την επιβίωση των πολιτών και επιχειρήσεων. Παράλληλα, σημαντικό είναι να σχεδιαστούν ορθά οι βιομηχανικές πολιτικές των κρατών στο μέλλον, για την επίτευξη οικονομικής ανθεκτικότητας και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Για αυτούς τους λόγους, οι τεχνολογίες σύντηξης παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη προοπτική συμμετοχής στο παγκόσμιο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και αν επιτευχθούν, μπορούν να συμβάλλουν στην επίτευξη ενός σχεδόν πλήρως απαλλαγμένου από τις ανθρακούχες εκπομπές παγκόσμιο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Ως εκ τούτου, η διατήρηση των τεχνολογιών σύντηξης ανταγωνιστικών από πλευράς κόστους φαίνεται να είναι η κύρια στρατηγική ώστε η πυρηνική σύντηξη να εισέλθει στο παγκόσμιο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μακροπρόθεσμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abu-Shawareb, H., Acree, R., Adams, P., Adams, J., Addis, B., Aden, R., ... & Burmark, J. (2022). Lawson criterion for ignition exceeded in an inertial fusion experiment. *Physical review letters*, 129(7), 075001.
- ASG Superconductors index ,JT-60SA project: <https://www.asgsuperconductors.com> (Accessed January 2024).
- Barabaschi, P., Kamada, Y., Shirai, H., & JT-60SA Integrated Project Team. (2019). Progress of the JT-60SA project. *Nuclear Fusion*, 59(11), 112005.
- Barbarino, M. (2020). A brief history of nuclear fusion. *Nature Physics*, 16(9), 890-893.
- Bethe, H. A. (1939). Energy production in stars. *Physical Review*, 55(5), 434.
- Bigot, B. (2021). ITER assembly phase: Progress toward first plasma. *Fusion Engineering and Design*, 164, 112207.
- Boozer, A. H. (2021). Stellarators as a fast path to fusion. *Nuclear Fusion*, 61(9), 096024.
- Calabrò, G., Xiao, B. J., Chen, S. L., Duan, Y. M., Guo, Y., Li, J. G., ... & EAST Team. (2015). EAST alternative magnetic configurations: modelling and first experiments. *Nuclear Fusion*, 55(8), 083005.
- Cardozo, N. L. (2019). Economic aspects of the deployment of fusion energy: the valley of death and the innovation cycle. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 377(2141), 20170444.
- Clery, D. (2021). Laser-powered fusion effort nears ‘ignition’. *Science*.

- Clery, D. (2022). Explosion marks laser fusion breakthrough. *Science*, 378(6625), 1154.
- Danson, C. N., & Gizzi, L. A. (2023). Inertial confinement fusion ignition achieved at the National Ignition Facility—an editorial. *High Power Laser Science and Engineering*, 11, e40.
- De Vicente, S. M. G., Smith, N. A., El-Guebaly, L., Ciattaglia, S., Di Pace, L., Gilbert, M., ... & Torcy, D. (2022). Overview on the management of radioactive waste from fusion facilities: ITER, demonstration machines and power plants. *Nuclear Fusion*, 62(8), 085001.
- D'E. ATKINSON, R., & Houtermans, F. G. (1929). Transmutation of the lighter elements in stars. *Nature*, 123(3102), 567-568.
- Dinklage, A., Beidler, C. D., Helander, P., Fuchert, G., Maaßberg, H., Rahbarnia, K., ... & Zhang, D. (2018). Magnetic configuration effects on the Wendelstein 7-X stellarator. *Nature Physics*, 14(8), 855-860.
- Donné, A. J. H. (2019). The European roadmap towards fusion electricity. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 377(2141), 20170432
- Dubus, G. D. (2014). From plain visualisation to vibration sensing: using a camera to control the flexibilities in the ITER remote handling equipment.
- Energy Institute Statistical Review of World Energy : <https://www.energyinst.org> (Accessed June 2024).
- EUROfusion, Devices : <https://www.euro-fusion.org> (Accessed February 2024).
- Federici, G., Bachmann, C., Barucca, L., Baylard, C., Biel, W., Boccaccini, L. V., ... & You, J. H. (2019). Overview of the DEMO staged design approach in Europe. *Nuclear fusion*, 59(6), 066013.
- Furth, H. P. (1975). Tokamak research. *Nuclear Fusion*, 15(3), 487.

Fusion for Energy – Bringing the power of the sun to Earth, JT-60SA: <https://fusionforenergy.europa.eu> (Accessed January 2024).

Gao, X., Zeng, L., Wu, M. Q., Zhang, T., Yang, Y., Ming, T. F., ... & Wan, Y. X. (2020). Experimental progress of hybrid operational scenario on EAST tokamak. *Nuclear Fusion*, 60(10), 102001.

Geng, S. (2022, December). An Overview of the ITER Project. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2386, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.

Griffiths, T., Pearson, R., Bluck, M., & Takeda, S. (2022). The commercialisation of fusion for the energy market: a review of socio-economic studies. *Progress in Energy*, 4(4), 042008.

Hayat, S., Safi, A., Wahab, S., Shahzad, K., & Chen, Y. (2023). Renewable energy R&D and natural resources: A success story of environmentally friendly financing in OECD economies. *Resources Policy*, 83, 103655.

Horvath, A., & Rachlew, E. (2016). Nuclear power in the 21st century: Challenges and possibilities. *Ambio*, 45, 38-49

ITER - the way to new energy : <https://www.iter.org> (Accessed January 2024)

Jones, C. R., Yardley, S., & Medley, S. (2019). The social acceptance of fusion: Critically examining public perceptions of uranium-based fuel storage for nuclear fusion in Europe. *Energy Research & Social Science*, 52, 192-203.

JT-60SA ,Device : <https://www.jt60sa.org/wp> (Accessed January 2024).

Kamada, Y., Di Pietro, E., Hanada, M., Barabaschi, P., Ide, S., Davis, S., ... & JT-60SA Integrated Project Team. (2022). Completion of JT-60SA construction and contribution to ITER. *Nuclear Fusion*, 62(4), 042002.

Kavila, I. (2023). Nuclear Fusion: Breakthrough in Inertial Confinement. *Resonance*, 28(1), 167-170.

Khvostenko, P. P., Anashkin, I. O., Bondarchuk, E. N., Chudnovsky, A. N., Kavin, A. A., Khvostenko, A. P., ... & Sushkov, A. V. (2021). Current status of tokamak T-15MD. *Fusion Engineering and Design*, 164, 112211.

Khvostenko, P. P., Anashkin, I. O., Bondarchuk, E. N., Injutin, N. V., Krylov, V. A., Levin, I. V., ... & Sokolov, M. M. (2020). Experimental thermonuclear installation tokamak T-15MD. *Physics of Atomic Nuclei*, 83, 1037-1057.

Kikuchi, M. (2002). *Fusion physics*. International Atomic Energy.

Korean Institute of Fusion Energy (KFE) : <https://www.kfe.re.kr/eng> (Accessed January 2024).

Kovari, M., Coleman, M., Cristescu, I., & Smith, R. (2018). Tritium resources available for fusion reactors. *Nucl. Fusion*, 58(026010), 10pp

Kramer, D. (2018). ITER disputes DOE's cost estimate of fusion project.

Kramer, D. (2023). ITER appears unstoppable despite recent setbacks. *Physics Today*, 76(8), 18-22.

Kramer, D. (2023). ITER appears unstoppable despite recent setbacks. *Physics Today*, 76(8), 18-22.

Kramer, D. (2023). NIF success gives laser fusion energy a shot in the arm. *Physics Today*, 76(3), 25-27.

Kwon, M., Oh, Y. K., Yang, H. L., Na, H. K., Kim, Y. S., Kwak, J. G., ... & KSTAR team. (2011). Overview of KSTAR initial operation. *Nuclear Fusion*, 51(9), 094006.

Lawrence Livermore National Laboratory <https://www.llnl.gov> (Accessed March 2024).

Lindley, B., Roulstone, T., Locatelli, G., & Rooney, M. (2023). Can fusion energy be cost-competitive and commercially viable? An analysis of magnetically confined reactors. *Energy Policy*, 177, 113511.

Max Planck Institute for Plasma Physics (IPP) : <https://www.ipp.mpg.de> (Accessed February 2024).

Meschini, S., Laviano, F., Ledda, F., Pettinari, D., Testoni, R., Torsello, D., & Panella, B. (2023). Review of commercial nuclear fusion projects. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1157394.

Moses, E. I., Lindl, J. D., Spaeth, M. L., Patterson, R. W., Sawicki, R. H., Atherton, L. J., ... & Wegner, P. J. (2016). Overview: Development of the national ignition facility and the transition to a user facility for the ignition campaign and high energy density scientific research. *Fusion Science and Technology*, 69(1), 1-24.

Nicholas, T. E. G., Davis, T. P., Federici, F., Leland, J., Patel, B. S., Vincent, C., & Ward, S. H. (2021). Re-examining the role of nuclear fusion in a renewables-based energy mix. *Energy Policy*, 149, 112043.

Oliphant, M. L. E., Harteck, P., & Rutherford, E. (1934). Transmutation effects observed with heavy hydrogen. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 144(853), 692-703.

Ongena, J., Koch, R., Wolf, R., & Zohm, H. (2016). Magnetic-confinement fusion. *Nature Physics*, 12(5), 398-410.

Park, H. K., Choi, M. J., Hong, S. H., In, Y., Jeon, Y. M., Ko, J. S., ... & KSTAR team. (2019). Overview of KSTAR research progress and future plans toward ITER and K-DEMO. *Nuclear Fusion*, 59(11), 112020.

Pradhan, S., Khan, Z., Tanna, V. L., Sharma, A. N., Doshi, K. J., Prasad, U., ... & Bora, D. (2015). The first experiments in SST-1. *Nuclear fusion*, 55(10), 104009.

- Prager, S. C. (2019). Nuclear fusion power—an overview of history, present and future. *International Journal of Advanced Network, Monitoring and Controls*, 4(4), 1-10.
- Rebut, P. H. (2018). The joint european torus (jet). *The European Physical Journal H*, 43(4), 459-497.
- Romanelli, F., Barabaschi, P., Borba, D., Federici, G., Horton, L., Neu, R., ... & Zohm, H. (2012). Fusion Electricity: A roadmap to the realization of fusion energy.
- Sánchez, J. (2014). Nuclear fusion as a massive, clean, and inexhaustible energy source for the second half of the century: brief history, status, and perspective. *Energy Science & Engineering*, 2(4), 165-176.
- Siccinio, M., Graves, J. P., Kembleton, R., Lux, H., Maviglia, F., Morris, A. W., ... & Zohm, H. (2022). Development of the plasma scenario for EU-DEMO: Status and plans. *Fusion Engineering and Design*, 176, 113047.
- Song, Y. T., Li, J. G., Wan, Y. X., Wan, B. N., Fu, P., Gao, X., ... & Wang, S. K. (2014). The accomplishments and next-step plan of EAST in support of fusion. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 42(3), 415-420.
- Song, Y., Li, J., Wan, Y., Liu, Y., Wang, X., Wan, B., ... & Chen, G. (2022). Engineering design of the CFETR machine. *Fusion Engineering and Design*, 183, 113247.
- Song, Y., Zou, X., Gong, X., Becoulet, A., Buttery, R., Bonoli, P., ... & EAST Team. (2023). Realization of thousand-second improved confinement plasma with Super I-mode in Tokamak EAST. *Science Advances*, 9(1), eabq5273.
- Spaeth, M. L., Manes, K. R., Kalantar, D. H., Miller, P. E., Heebner, J. E., Bliss, E. S., ... & Zacharias, R. (2016). Description of the NIF laser. *Fusion Science and Technology*, 69(1), 25-145.

- Trainer, T. (2017). Some problems in storing renewable energy. *Energy Policy*, 110, 386-393.
- Wan, B. N., Liang, Y. F., Gong, X. Z., Li, J. G., Xiang, N., Xu, G. S., ... & Xia, T. Y. (2017). Overview of EAST experiments on the development of high-performance steady-state scenario. *Nuclear Fusion*, 57(10), 102019.
- Wan, Y., Li, J., Liu, Y., Wang, X., Chan, V., Chen, C., ... & Li, Q. (2017). Overview of the present progress and activities on the CFETR. *Nuclear Fusion*, 57(10), 102009.
- Wolf, R. C., Beidler, C. D., Dinklage, A., Helander, P., Laqua, H. P., Schauer, F., ... & Warmer, F. (2016). Wendelstein 7-X program—Demonstration of a stellarator option for fusion energy. *IEEE Transactions on plasma science*, 44(9), 1466-1471.
- Zylstra, A. B., Hurricane, O. A., Callahan, D. A., Kritcher, A. L., Ralph, J. E., Robey, H. F., ... & Wilde, C. H. (2022). Burning plasma achieved in inertial fusion. *Nature*, 601(7894), 542-548.
- Ατσαλάκης Γ. (2024). Νέες οικονομικές σχέσεις με την Κίνα. Ανάκτηση Ιούνιος 2024 από : <https://www.liberal.gr>
- Ατσαλάκης Γ. (2024). Ενεργειακός Σχεδιασμός και Αθέμιτος Ανταγωνισμός. Ανάκτηση Μάρτιος 2024 από : <https://www.energia.gr>
- Ατσαλάκης Γ. (2024). Προβλέποντας τον επόμενο οικονομικό μέγακυκλο. Ανάκτηση Ιούνιος 2024 από : <https://www.liberal.gr>