



ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ – ΑΚΤΙΝΟΦΥΣΙΚΗ»

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ



Ακτινοπροστασία προσωπικού σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής πυρηνικής σύντηξης

ΛΟΥΚΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ

Ίων-Ευάγγελος Σταματελάτος , Διευθυντής Ερευνών, Ε.ΚΕ.Φ.Ε. «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

Ευάγγελος Παντελής, Αναπληρωτής Καθηγητής, ΕΚΠΑ, ΕΚΠΑ

Θεοδώρα Βασιλοπούλου, Ερευνήτρια Γ, Ε.ΚΕ.Φ.Ε. «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

Αθήνα

2024

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας σηματοδοτεί το τέλος μιας περιόδου. Επαναφέρει αναμνήσεις από την διάρκεια των σπουδών, όπου με την ολοκλήρωσή τους και με τα εφόδια που έλαβα από αξιόλογους ανθρώπους, δεν αναπολώ μόνο ευχάριστα το παρελθόν αλλά ατενίζω και με αισιοδοξία το μέλλον. Θα ήθελα να ευχαριστήσω εκ βαθέων τον Δρ. Ι.Ε. Σταματελάτο και τα μέλη της ερευνητικής ομάδας του Ε.ΚΕ.Φ.Ε «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ» για την ευκαιρία συνεργασίας που μου δόθηκε, με σκοπό την μελέτη ενός εξαιρετικά ενδιαφέροντος θέματος που άπτεται των ερευνητικών ενδιαφερόντων μου. Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, ήταν ιδιαίτερα σημαντική η έμπρακτη υποστήριξη και συμπαράσταση, τόσο του Δρ. Σταματελάτου, όσο και των Δρ. Καλαμαρά Αντιγόνης και Δρ. Βασιλοπούλου Θεοδώρας. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ε. Παντελή για τις γνώσεις που μου πρόσφερε σε όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την αμέριστη αγάπη και εκτίμησή μου προς την οικογένειά μου, η οποία παραμένει αρωγός κάθε προσπάθειάς μου, με σκοπό την πραγμάτωση όλων των ονείρων και των στόχων μου.

Περίληψη

Ο πυρηνικός σταθμός DEMO στοχεύει στην ανάπτυξη των απαραίτητων τεχνολογιών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από σύντηξη σε μεγάλη κλίμακα για εμπορική εκμετάλλευση. Επομένως, οι προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης είναι υψίστης σημασίας για τη λειτουργία του DEMO με ασφάλεια, συνέπεια και αξιοπιστία. Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η προκαταρκτική εκτίμηση της συλλογικής δόσης που θα λάβουν οι εργαζόμενοι κατά τη διάρκεια των προγραμματισμένων δραστηριοτήτων συντήρησης του DEMO. Μετά τη διακοπή λειτουργίας του σταθμού, οι ραδιολογικοί κίνδυνοι για τους εργαζόμενους προέρχονται από εξωτερική έκθεση σε ακτινοβολία γάμμα, λόγω νετρονικής ενεργοποίησης των υλικών, και εσωτερική έκθεση, κυρίως λόγω του τριτίου που χρησιμοποιείται ως καύσιμο. Πραγματοποιήθηκαν εκτιμήσεις επιχειρησιακής ραδιολογικής έκθεσης (operational radiation exposure) στην ακτινοβολία προκειμένου να υπολογισθεί ο δείκτης της συλλογικής δόσης (collective dose) κατά τη διάρκεια διαφορετικών σεναρίων προγραμματισμένης συντήρησης. Οι τιμές συλλογικής δόσης που υπολογίστηκαν συγκρίθηκαν με το επιχειρησιακό όριο συλλογικής δόσης των $700 \text{ p}\cdot\text{mSv/y}$ που χρησιμοποιείται σε άλλες πυρηνικές εγκαταστάσεις. Η εκτέλεση του συνόλου των προγραμματισμένων δραστηριοτήτων συντήρησης στο κτίριο tokamak με φυσική παρουσία οδήγησε σε τιμές συλλογικής δόσης σημαντικά υψηλότερες από το καθορισμένο όριο. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας έδειξαν ότι η συλλογική δόση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εξωτερική δόση που λαμβάνει το προσωπικό σε δύο συγκεκριμένους θαλάμους του DEMO, τον θάλαμο βαλβίδας υπερχειλίσης (11-L2-PC) και τον θάλαμο Lithium Lead Expansion Tank Room (11-B4-LL). Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι εργασίες συντήρησης, στο ισημερινό επίπεδο του tokamak, σχεδιάζονται να εκτελούνται χρησιμοποιώντας πλήρως αυτοματοποιημένες διαδικασίες τηλεχειρισμού για βελτιστοποίηση της ακτινοπροστασίας, η συλλογική δόση στο προσωπικό θα μειωθεί σημαντικά. Η παρούσα εργασία προσφέρει δεδομένα συμβάλλοντας στην προσπάθεια για βελτιστοποίηση της ακτινοπροστασίας του προσωπικού στο μελλοντικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής DEMO.

Abstract

The DEMO fusion plant aims to demonstrate the necessary technologies for producing electricity from fusion on a large scale. Therefore, schedule maintenance activities are of outmost importance for safe, consistent and reliable DEMO operation. Scope of this work is a preliminary estimation of the collective dose received by workers during scheduled maintenance activities in DEMO. After shut-down for maintenance, the radiological risks for workers originate from external exposure to gamma radiation due to material activation and internal exposure, mainly due to tritium used as fuel. Operational Radiation Exposure (ORE) estimates were performed in order to get an index of the collective dose during different scheduled maintenance scenarios. The calculated collective dose values were compared against Collective Dose target value of 700 p•mSv/y taken from other nuclear facilities. Manual performance of scheduled maintenance activities in the tokamak building resulted in Collective Dose values significantly higher than the set target. However, the results showed that collective dose strongly depends on the external dose received by personnel in specific DEMO rooms such as the Rupture Disk Port Cell (11-L2-PC) room and the Lithium Lead Expansion Tank Room (11-B4-LL). Excluding these rooms the Collective Dose Index will be reduced. Moreover, it is expected thew the Colective Dose to the personel will be further reduced since all maintenance activities, at the equatorial port level, are planned to be performed using fully automated remote handling procedures for optimization of radiation protection,. This work contributes data in support to the effort to optimize occupational radiation protection at DEMO.

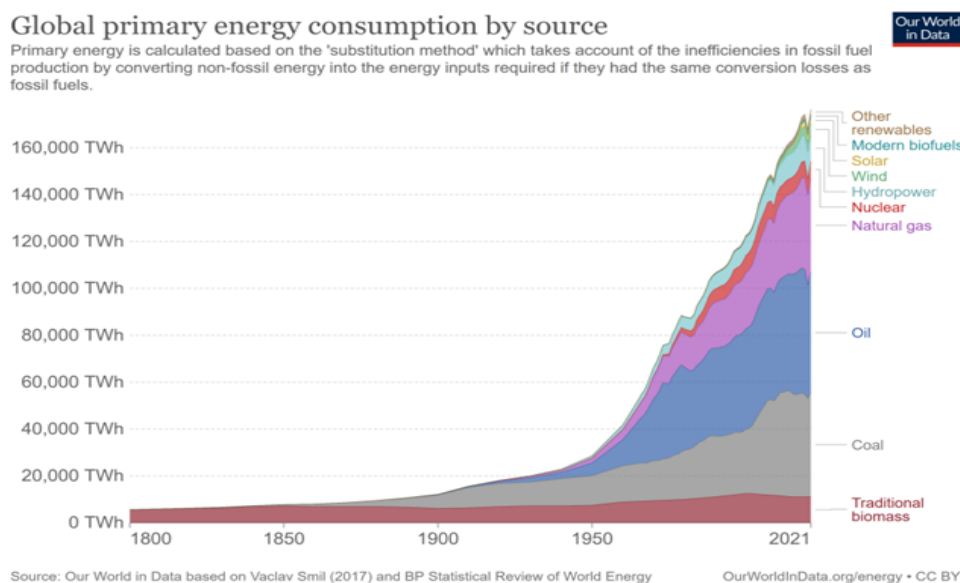
Περιεχόμενα

Περίληψη.....	<i>Error! Bookmark not defined.</i>
Abstract	3
1.Εισαγωγή.....	5
1.1 Γενικά.....	5
1.2 Ευρωπαϊκή Κοινοπραξία για την Ανάπτυξη της Ενέργειας Σύντηξης.....	6
1.3 Σκοπός και οργάνωση της εργασίας.....	7
2. Παραγωγή ενέργειας μέσω σύντηξης	9
2.1 Πυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης.....	9
2.2 Tokamak.....	12
3.Επισκόπηση της εγκατάστασης DEMO.....	15
3.1 Γενικά στοιχεία.....	15
3.2 Αρχιτεκτονική δομή του DEMO.....	18
4. Εργασίες συντήρησης στην εγκατάσταση DEMO.....	21
4.1 Εργασίες συντήρησης και ασφάλεια	21
4.2 Τύποι εργασιών συντήρησης.....	21
4.3 Στοιχεία και μονάδες.....	21
4.4 Συχνότητα εργασιών συντήρησης.....	21
4.5 Αριθμός εργαζομένων.....	22
4.6 Χρόνος έκθεσης.....	22
5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΥΛΛΟΓΙΚΗΣ ΔΟΣΗΣ.....	24
5.1 Ραδιολογικοί κίνδυνοι στο DEMO κατά τη φάση συντήρησης.....	24
5.2 Όρια έκθεσης.....	26
5.3 Ζώνες ακτινοβολίας	26
5.4 Κατηγοριοποίηση χώρων ως προς τον κίνδυνο εσωτερικής έκθεσης.....	27
5.5 Μέτρα προστασία από εσωτερική έκθεση.....	27
5.6 Μεθοδολογία υπολογισμού συλλογικής επαγγελματικής έκθεσης.....	29
6. Αποτελέσματα.....	31
6.1 Ενδεικτικά αποτελέσματα.....	31
6.2 Παραδοχές και περιορισμοί.....	36
6.3 Θάλαμοι 11-B4-LI , 11-L2-PC	36
6.4 Αξιοποίηση αυτοματοποιημένων συστημάτων τηλεχειρισμού.....	38
7. Γενική συζήτηση - Συμπεράσματα	40
Βιβλιογραφία.....	43

1.Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Με τον όρο πυρηνική σύντηξη χαρακτηρίζεται η πυρηνική αντίδραση συνένωσης ελαφρών πυρήνων (π.χ. υδρογόνο, δευτέριο, τρίτιο, ήλιο) προς σχηματισμό ενός ενιαίου βαρύτερου ενώ απελευθερώνονται μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Οι αντιδράσεις σύντηξης λαμβάνουν χώρα σε μια κατάσταση ύλης που ονομάζεται πλάσμα, ένα υπέρθερμο φορτισμένο αέριο που αποτελείται από θετικά ιόντα και ελεύθερα κινούμενα ηλεκτρόνια, με μοναδικές ιδιότητες, διαφορετικές από τα στερεά, υγρά ή αέρια. Η σύντηξη είναι η κύρια πηγή ενέργειας στον Ήλιο και τα αστέρια, ενώ θεωρείται ως ένας από τους μηχανισμούς που είναι υπεύθυνοι για τη σύνθεση των διαφόρων στοιχείων κατά την αστρική πυρηνοσύνθεση. Η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη σύντηξη οφείλεται στο ότι η συνολική μάζα του ενιαίου πυρήνα που προκύπτει είναι μικρότερη από το άθροισμα των μαζών των δύο αρχικών πυρήνων. Η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την πυρηνική σύντηξη αξιοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1952, δυστυχώς με τη μορφή του πρώτου θερμοπυρηνικού όπλου, δηλαδή της βόμβας υδρογόνου. Η πυρηνική σύντηξη αποτελεί σήμερα μια υποσχόμενη λύση για την παραγωγή άφθονης και καθαρής ενέργειας.



Σχήμα 1. Παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση τους τελευταίους δυο αιώνες [1].

Η συνεχής αύξηση της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας που παρατηρείται στο Σχήμα 1 έχει προκαλέσει σημαντικές ανησυχίες λόγω του ότι η καύση των ορυκτών καυσίμων όπως το πετρέλαιο, ο άνθρακας, το φυσικό αέριο, που αποτελούν σήμερα την κύρια πηγή ενέργειας, έχει σαν αποτέλεσμα την έκλυση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και άλλων ρύπων στην ατμόσφαιρα και κατά συνέπεια την υπερθέρμανση του πλανήτη (φαινόμενο θερμοκηπίου) και την κλιματική αλλαγή. Σε αυτό το πλαίσιο, η Συμφωνία των Παρισίων για την κλιματική αλλαγή που υπογράφηκε στις 22 Απριλίου 2016 [2] στοχεύει στη μακροπρόθεσμη σταθεροποίηση της ανόδου της

παγκόσμιας θερμοκρασίας σε επίπεδα κάτω των 1.5 °C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα, ενώ παράλληλα οι χώρες της ΕΕ συμφώνησαν ότι η ΕΕ θα γίνει η πρώτη κλιματικά ουδέτερη οικονομία και κοινωνία, έως το 2050 [3, 4].

Σε αυτό το πλαίσιο, γίνεται σημαντική προσπάθεια παγκοσμίως για την καλύτερη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (αιολικής, ηλιακής, υδροηλεκτρικής, κλπ) και για τη μείωση της χρήσης των ορυκτών καυσίμων. Ωστόσο, το μειονέκτημα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συνίσταται στο ότι η ενεργειακή τους απόδοση εξαρτάται από εποχιακές, κλιματικές και γεωγραφικές παραμέτρους. Για τους παραπάνω λόγους, προς το παρόν, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πλήρη κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών και βιομηχανικών κέντρων [5] και αξιοποιούνται μόνο ως συμπληρωματικές πηγές ενέργειας. Η παραγωγή ενέργειας με συμβατικούς πυρηνικούς αντιδραστήρες σχάσης δεν μπορεί επίσης να λύσει το πρόβλημα λόγω του υψηλού κόστους διαχείρισης των ραδιενεργών αποβλήτων που παράγονται και του κινδύνου για πυρηνικά ατυχήματα όπως, για παράδειγμα, η Φουκουσίμα και το Τσερνόμπιλ [6].

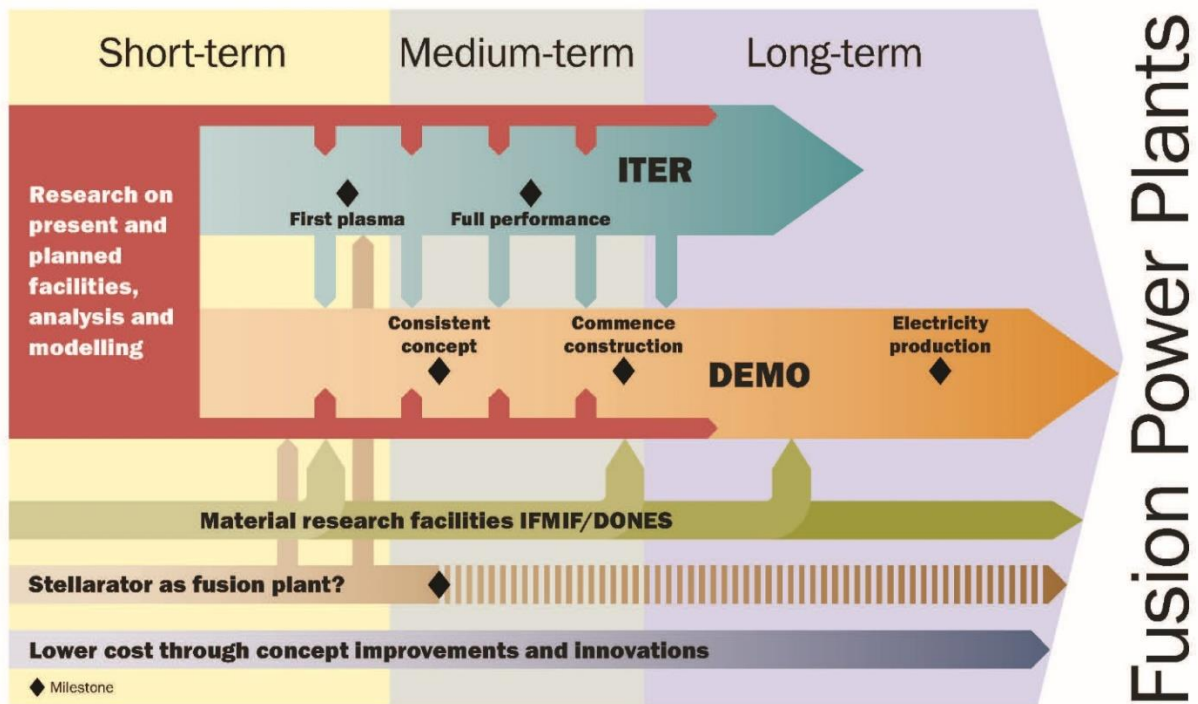
Η ανάπτυξη σταθμών ηλεκτροπαραγωγής πυρηνικής σύντηξης, ο οποίοι θα παράγουν ενέργεια στη γη με τον ίδιο τρόπο που παράγεται η ενέργεια σε ένα αστέρι, σαν τον ήλιο μας, ενώ δεν θα συνεισφέρουν στην έκλυση ρύπων του θερμοκηπίου, δεν θα παράγουν ραδιενεργά απόβλητα και δεν θα έχουν τους εγγενείς κινδύνους της αλυσιδωτής αντίδρασης πυρηνικής σχάσης, αποτελεί μια υποσχόμενη λύση για την επίλυση του ενεργειακού προβλήματος.

1.2 Ευρωπαϊκή Κοινοπραξία για την Ανάπτυξη της Ενέργειας Σύντηξης

Η Ευρωπαϊκή Ένωση αναγνωρίζοντας την ενέργεια σύντηξης σαν τη δυνητική μακροπρόθεσμη λύση στο παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα την έχει ιεραρχήσει ιδιαίτερα υψηλά στην προσπάθεια ανάπτυξης καθαρών μορφών ενέργειας [7]. Στις 9 Οκτωβρίου 2014, τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης και η Ελβετία υπέγραψαν συμφωνία για την ίδρυση της Ευρωπαϊκής Κοινοπραξίας για την Ανάπτυξη της Ενέργειας Σύντηξης (EUROfusion). Σκοπός της κοινοπραξίας είναι η ενίσχυση της ευρωπαϊκής συνεργασίας στην έρευνα σύντηξης με τελικό σκοπό την ανάπτυξη του πρώτου σταθμού ηλεκτροπαραγωγής. Το ευρωπαϊκό πρόγραμμα σύντηξης εστιάζει στην χρήση μαγνητικών πεδίων για την συγκράτηση του πλάσματος σε θερμοκρασίες άνω των 10⁹ °C για χρονικό διάστημα επαρκές για εμπορική εκμετάλλευση.

Παρότι βέβαια σε συνθήκες εργαστήριου έχει επιτευχθεί η παραγωγή και συγκράτηση υπέρθερμου πλάσματος σε αυτές τις θερμοκρασίες από μαγνητικά πεδία, η πρόκληση της διατήρησής του για ικανό χρονικό διάστημα ώστε να αξιοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας αποτελεί μια ανοικτή τεχνολογική πρόκληση. Σημαντική πρόοδος έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια στο Joint European Torus (JET), το μεγαλύτερο σε λειτουργία tokamak στον κόσμο, που βρίσκεται στην Οξφόρδη του Ηνωμένου Βασιλείου. Τον Οκτώβριο του 2023 στο JET επετεύχθη η παραγωγή 69.26 MJ ενέργειας κατά τη διάρκεια ενός παλμού διάρκειας 6 s από μόνο 0.21 mg καυσίμου D-T [8]. Κριτήριο απόδοσης της λειτουργίας των αντιδραστήρων σύντηξης είναι ο λόγος Q της παραγόμενης ισχύος από αντιδράσεις σύντηξης προς την ισχύ που απαιτείται για την θέρμανση του πλάσματος. Στο JET, κατά το συγκεκριμένο πείραμα επετεύχθη $Q = 0.7$ που είναι η υψηλότερη τιμή Q που έχει επιτευχθεί σε tokamak παγκοσμίως. Ωστόσο, η εμπορική εκμετάλλευση σταθμού ηλεκτροπαραγωγής σύντηξης προϋποθέτει την επίτευξη υψηλότερης τιμής $Q=25-30$.

Ο ευρωπαϊκός οδικός χάρτης για την σύντηξη [9] περιγράφει τα κύρια βήματα που απαιτούνται στην έρευνα και ανάπτυξη για την κατασκευή ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σύντηξης (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Οδικός χάρτης ευρωπαϊκού προγράμματος σύντηξης [9].

Ο ευρωπαϊκός χάρτης για την ηλεκτροπαραγωγή μέσω σύντηξης βασίζεται σε τρία κύρια ορόσημα:

- Το ITER που θα αναδείξει την επιστημονική και τεχνολογική σκοπιμότητα της σύντηξης ως εναλλακτικής πηγής ενέργειας. Στόχος του ITER είναι η παραγωγή ισχύος σύντηξης δέκα φορές μεγαλύτερης από ό,τι η ισχύς που προσφέρεται για τη λειτουργία του ($Q = 10$) [10].
- Την πηγή νετρονίων IFMIF-DONES για την ανάπτυξη και μελέτη νέων υλικών τα οποία θα είναι σε θέση να διατηρήσουν τις ιδιότητές τους κάτω από τις ακραίες συνθήκες που συναντώνται σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα σύντηξης.
- Το σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω σύντηξης DEMO, που θα αποδείξει τη σκοπιμότητα απόδοσης εκατοντάδων MW ηλεκτρικής ισχύος στο δίκτυο, θα λειτουργεί με κλειστό κύκλο καυσίμου και στοχεύει σε $Q=25$.

1.3 Σκοπός και οργάνωση της εργασίας

Η παρούσα εργασία εντάσσεται στο γενικό πλαίσιο της προετοιμασίας του εννοιολογικού σχεδιασμού του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σύντηξης DEMO. Σε αυτό το στάδιο σχεδιασμού του DEMO δίδεται έμφαση στις τεχνολογικές προκλήσεις της εγκατάστασης, αλλά ταυτόχρονα και στη δημιουργία των προϋποθέσεων για την ασφάλεια των εργαζομένων, του πληθυσμού και του περιβάλλοντος κατά την κανονική λειτουργία του, αλλά και στα πιθανά σενάρια ατυχημάτων. Στο παρόν στάδιο του εννοιολογικού σχεδιασμού, προτείνονται αρχικά σχέδια για τη δομή του DEMO με σκοπό την επιλογή του σχεδίου που θα κριθεί ότι προσφέρει τις

περισσότερες πιθανότητες επιτυχίας σε αυτό το ιδιαίτερα σύνθετο εγχείρημα, δηλαδή της ανάπτυξης ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής μέσω της πυρηνικής σύντηξης.

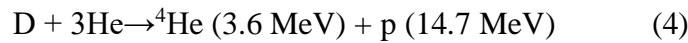
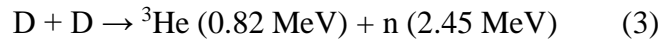
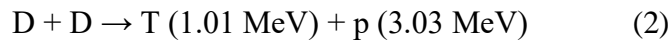
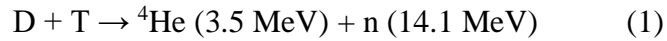
Ειδικότερα, η παρούσα εργασία εντάσσεται στην προσπάθεια εκπόνησης ενός αρχικού επιχειρησιακού σχεδίου ακτινοπροστασίας για το προσωπικό του σταθμού DEMO κατά την διάρκεια εργασιών προγραμματισμένης συντήρησης. Συγκεκριμένα, θα διερευνηθούν οι κύριοι ραδιολογικοί κίνδυνοι για τους εργαζόμενους, θα γίνει κατάτμηση των χώρων της εγκατάστασης με βάση την επικινδυνότητα εσωτερικής και εξωτερικής έκθεσης για τους εργαζομένους και θα προταθούν μέτρα ή μέθοδοι για την ατομική και συλλογική προστασία τους. Τέλος, θα γίνει υπολογισμός της συλλογικής δόσης των εργαζομένων για τις εργασίες προγραμματισμένης συντήρησης της εγκατάστασης και θα συγκριθεί το αποτέλεσμα με το επιχειρησιακό όριο συλλογικής έκθεσης του DEMO που έχει τεθεί στα 700 mSv·p/y [11].

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των αντιδράσεων σύντηξης, των πλεονεκτημάτων της παραγωγής ενέργειας από αντιδραστήρες σύντηξης και της τεχνολογικής προόδου που έχει σημειωθεί σε αυτόν τον τομέα. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το προτεινόμενο αρχιτεκτονικό σχέδιο της εγκατάστασης DEMO εστιάζοντας στην δομή και τα τμήματα του κτηρίου του tokamak. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται οι κύριοι ραδιολογικοί κίνδυνοι για τους εργαζόμενους στην εγκατάσταση και οι βασικοί παράγοντες που συνεισφέρουν στην συλλογική δόση. Στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζονται οι εργασίες συντήρησης στο DEMO. Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης που αφορούν στον υπολογισμό της συλλογικής δόσης κατά τις εργασίες προγραμματισμένης συντήρησης στην εγκατάσταση. Τέλος στο έβδομο κεφάλαιο εξάγονται συμπεράσματα για τους ραδιολογικούς κινδύνους στην εγκατάσταση και τις παραμέτρους που τους επηρεάζουν.

2. Παραγωγή ενέργειας μέσω σύντηξης

2.1 Πυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης

Οι κυριότερες αντιδράσεις πυρηνικής σύντηξης που έχουν εξεταστεί με σκοπό την παραγωγή ενέργειας είναι οι ακόλουθες:



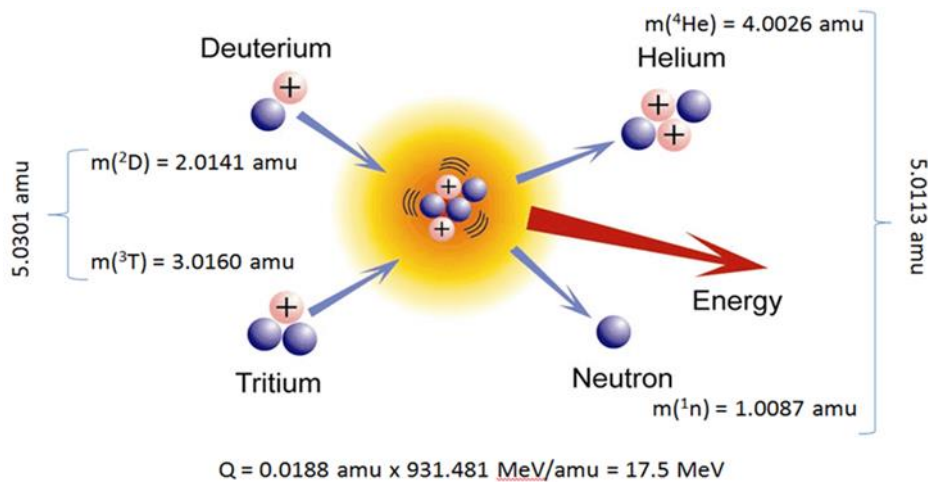
Η προσπάθεια παραγωγής ενέργειας από τη σύντηξη στη γη, εστιάζεται στην πυρηνική αντίδραση σύντηξης δευτερίου – τριτίου (D-T).

A. Εκλυόμενη ενέργεια

Η ενέργεια που εκλύεται σε μια πυρηνική αντίδραση, υπολογίζεται από την σχέση (5).

$$Q = (\sum m_i - \sum m_f) * c^2 \quad (5)$$

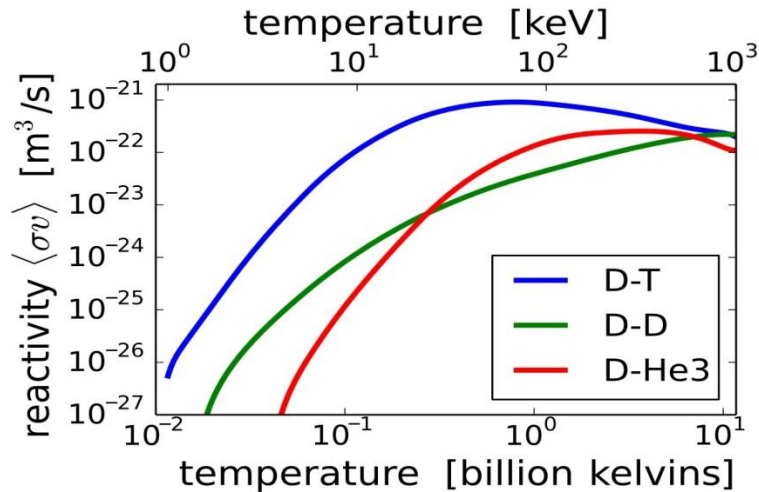
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, η αντίδραση D-T απελευθερώνει ποσότητα ενέργειας $Q=17.5 \text{ MeV}$.



Σχήμα 3. Σχηματική αναπαράσταση της πυρηνικής αντίδρασης D-T.

B. Ενεργός διατομή πυρηνικής αντίδρασης

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η αντιδραστικότητα ($\langle\sigma v\rangle$), όπου σ η ενεργός διατομή της πυρηνικής αντίδρασης και v η ταχύτητα των αντιδρώντων, των κυριότερων πυρηνικών αντιδράσεων σύντηξης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του πλάσματος και την ενέργεια. Όπως φαίνεται στο Σχήμα, η αντίδραση D-T παρουσιάζει σημαντικά υψηλότερη τιμή αντιδραστικότητας (reactivity) έναντι των αντιδράσεων D-D και D-He ιδιαιτέρως στις χαμηλότερες θερμοκρασίες ($<10^7$ °K).



Σχήμα 4. Αντιδραστικότητα ως προς τη θερμοκρασία για αντιδράσεις σύντηξης [12].

Γ. Κριτήριο Lawson

Ως κριτήριο για την βέλτιστη επίτευξη της σύντηξης χρησιμοποιείται το λεγόμενο τριπλό γινόμενο ή δείκτης Lawson, το οποίο αποτελεί ένα δείκτη αξίας για την απόδοση του πλάσματος σύντηξης. Ο δείκτης Lawson είναι το γινόμενο τριών παραμέτρων του πλάσματος, της πυκνότητας των ιόντων (n), της θερμοκρασίας (T) και του χρόνου περιορισμού (τE). Το τριπλό γινόμενο παρέχει την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή για την ανάφλεξη του πλάσματος και επομένως την παραγωγή ενέργειας.

Η σχέση Lawson [13] δίνεται ως

$$n * T * \tau E \geq \frac{12}{E} * \frac{T^2}{\langle\sigma v\rangle} \quad (6)$$

όπου,

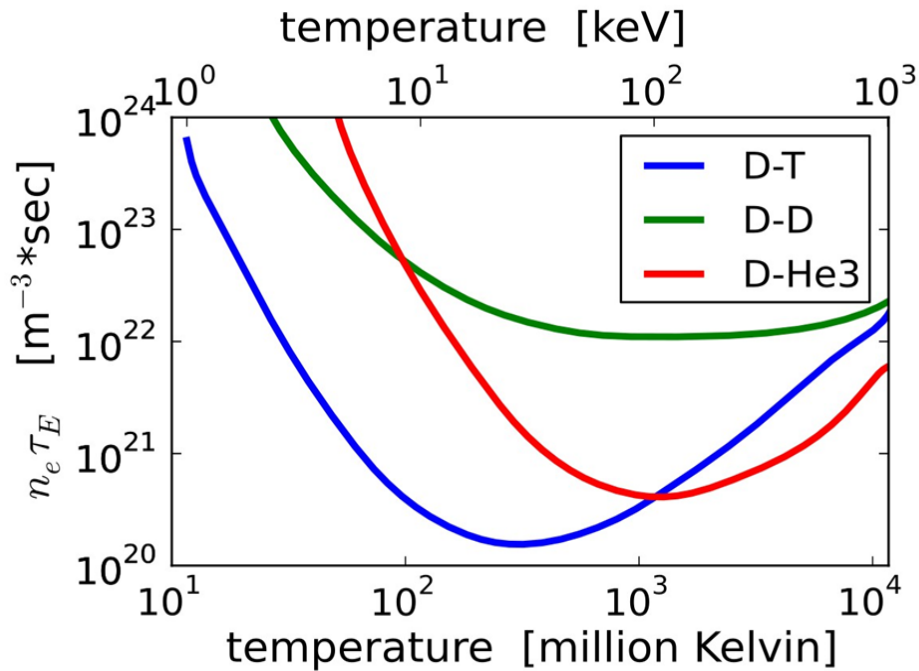
n , η πυκνότητα του πλάσματος,

T , η θερμοκρασία,

τE , ο χρόνος περιορισμού,

$T^2/\langle\sigma v\rangle$, ποσότητα που εξαρτάται από την θερμοκρασία T και

E η ενέργεια των φορτισμένων προϊόντων της αντίδρασης.



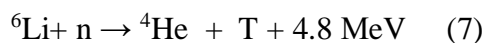
Σχήμα 5. Το τριπλό γινόμενο Lawson, που απαιτείται για την ανάφλεξη του πλάσματος, για τις τρεις βασικές αντιδράσεις σύντηξης [12].

Στο σχήμα 5, παρουσιάζεται η τιμή του δείκτη Lawson για τις τρεις βασικές αντιδράσεις σύντηξης, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Παρατηρούμε ότι για την αντίδραση D-T, το τριπλό γινόμενο ελαχιστοποιείται στην χαμηλότερη θερμοκρασία των περίπου $300 \cdot 10^6$ °K σε σχέση με τις άλλες αντιδράσεις, που αποτελεί την ελάχιστη θερμοκρασία που απαιτείται για την έναρξη της αντίδρασης.

Δ. Κύκλος καυσίμου

Άλλο πλεονέκτημα της D-T αντίδρασης είναι ότι το δευτέριο που απαιτείται για την αντίδραση μπορεί να παραχθεί εύκολα και με σχετικά χαμηλό κόστος από το νερό με φυσικοχημικές μεθόδους. Σε κάθε κυβικό μέτρο νερού υπάρχουν κατά μέσο όρο 35 g δευτερίου.

Μοναδικό μειονέκτημα για την χρήση της αντίδρασης D-T είναι ότι το τρίτιο είναι ραδιενεργό με χρόνο ημιζωής 12.3 y και επομένως δεν υπάρχει στη φύση σε μεγάλες ποσότητες. Ωστόσο, το τρίτιο παράγεται τεχνητά από το λίθιο μέσω της αντίδρασης,



Η αναπαραγωγή του τρίτιου στους αντιδραστήρες σύντηξης επιτυγχάνεται με την κάλυψη του θαλάμου του πλάσματος (Vacuum Vessel), όπου πραγματοποιούνται οι πυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης, με ένα στρώμα λιθίου (Li). Τα παραγόμενα νετρόνια από την αντίδραση D-T

αλληλεπιδρούν με το ${}^6\text{Li}$ και σαν προϊόν της αντίδρασης (7) παράγεται τρίτιο το οποίο συλλέγεται και χρησιμοποιείται ως καύσιμο.

Ε. Άλλα πλεονεκτήματα

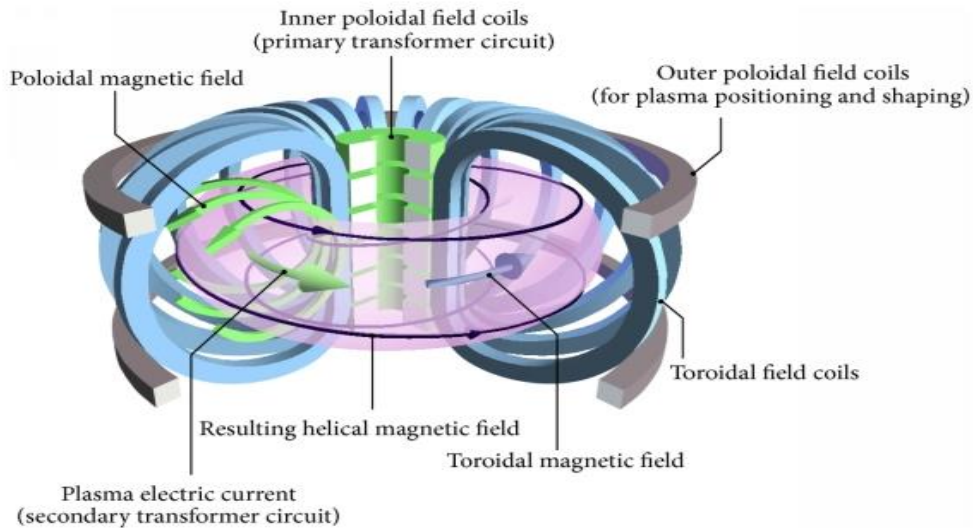
Σημαντικό πλεονέκτημα της παραγωγής ενέργειας μέσω της σύντηξης είναι ότι οι πυρηνικές αντιδράσεις δεν παράγουν κανέναν προϊόν αερίων ρύπων. Το ήλιο, που είναι το κύριο προϊόν της αντίδρασης, είναι εντελώς ακίνδυνο αδρανές αέριο και παράλληλα η πλειονότητα των παραγομένων νετρονίων αλληλεπιδρούν και απορροφώνται μέσα στη βιολογική θωράκιση του αντιδραστήρα. Επομένως η παραγωγή ενέργειας σύντηξης συνιστά μια οικολογική επιλογή που δεν επιβαρύνει το περιβάλλον [14].

Το τρίτιο, που χρησιμοποιείται σαν καύσιμο, εκπέμπει χαμηλής ενέργειας ακτινοβολία β ($E_{\max}=18.6\text{ keV}$) και έχει σχετικά μικρό χρόνο ημιζωής (12.3 y). Η διαφυγή τριτίου αποτελεί κίνδυνο ακτινοβολίας και επομένως απαιτείται η σχεδίαση και η εγκατάσταση στον πυρηνικό αντιδραστήρα διάφορων φραγμάτων ασφαλείας για την προστασία του προσωπικού του σταθμού, του πληθυσμού και του περιβάλλοντος από την έκλυση τριτίου.

2.2 Tokamak

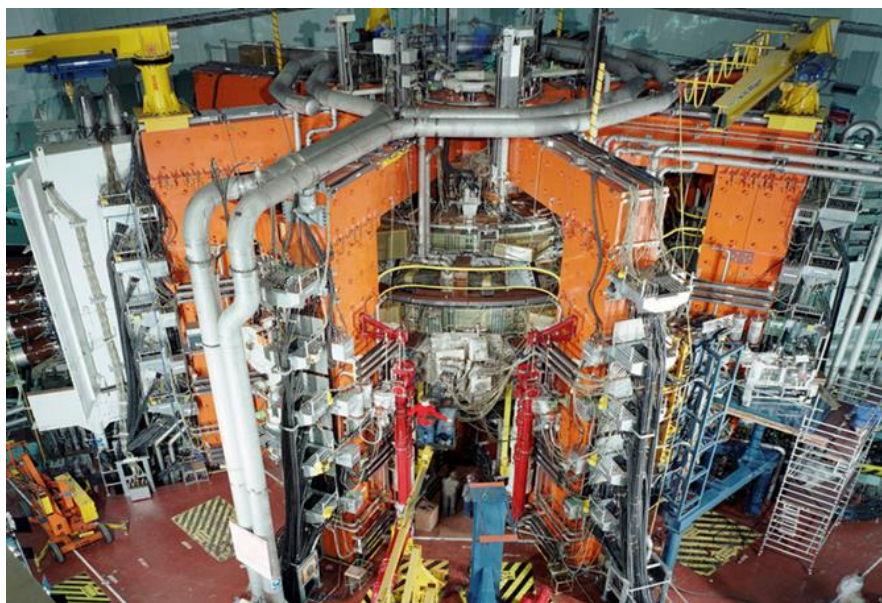
Ο όρος tokamak είναι αρκτικόλεξο από τη ρωσική ονομασία του «δακτυλιοειδούς θαλάμου με μαγνητικά πεδία» και αναφερόταν στον πρώτο αντιδραστήρα σύντηξης που κατασκευάστηκε το 1958 στην Σοβιετική Ένωση. Το tokamak επινοήθηκε τη δεκαετία του 1950 από τους σοβιετικούς φυσικούς Igor Tamm και Andrei Sakharov, εμπνευσμένους από μια ιδέα του Oleg Lavrentiev [15].

Στα tokamak μια μικρή ποσότητα δευτερίου θερμαίνεται σε πολύ υψηλή θερμοκρασία, στην οποία τα ηλεκτρόνια αποσπώνται από τα άτομα. Αυτό το μίγμα φορτισμένων σωματιδίων ονομάζεται «πλάσμα». Το πλάσμα αποτελείται από πυρήνες υδρογόνου, μερικοί από τους οποίους συγχωνεύονται μεταξύ τους σχηματίζοντας ήλιο, απελευθερώνοντας ένα μεγάλο ποσό ενέργειας κατά τη διαδικασία. Τα σωματίδια του πλάσματος θερμαίνονται σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες, της τάξης των εκατομμυρίων βαθμών Κέλβιν. Προκειμένου λοιπόν τα φορτισμένα σωματίδια του πλάσματος να συγκρατηθούν μέσα στον θάλαμο κενού του tokamak, χωρίς να έρχονται σε επαφή με τα τοιχώματά του, χρησιμοποιείται η μέθοδος του μαγνητικού περιορισμού του πλάσματος. Έτσι στο tokamak συνυπάρχουν δύο μαγνητικά πεδία, ένα τοροειδές που περιβάλλει και συγκρατεί το πλάσμα, κι ένα πολοειδές στο εσωτερικό του (Σχήμα 6). Γύρω από το θάλαμο κενού βρίσκεται το περίβλημα, που θωρακίζει την κατασκευή και τους μαγνήτες από τη θερμότητα και την ακτινοβολία νετρονίων υψηλής ενέργειας.



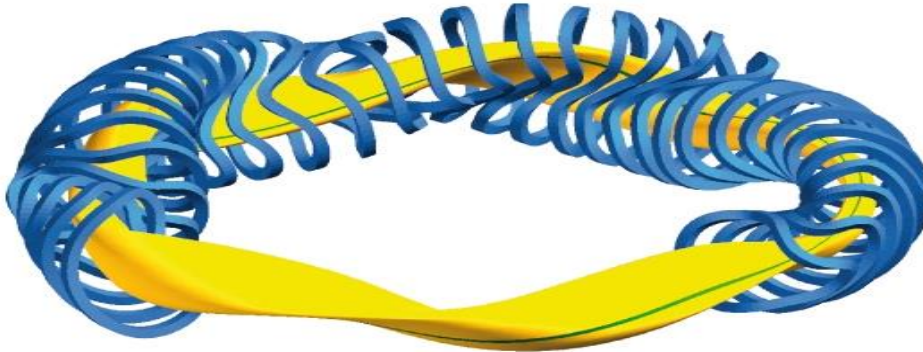
Σχήμα 6. Τα μαγνητικά πεδία που εφαρμόζονται στο tokamak για τη διατήρηση του πλάσματος [16].

Τα σημαντικότερα tokamak σε λειτουργία είναι το TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) στις ΗΠΑ, το JET (Joint European Torus) στο Ηνωμένο Βασίλειο (Σχήμα 7), το JT60 (Japan Torus) στην Ιαπωνία και το EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) στην Κίνα [17]. Στη Γαλλία κατασκευάζεται το ITER που πρόκειται να αποδείξει την δυνατότητα επίτευξης θετικού ισοζυγίου ενέργειας ($Q>1$) σε αντιδραστήρα σύντηξης [10]. Ο αντιδραστήρας SPARC που κατασκευάζεται στη Μασαχουσέτη των ΗΠΑ θα διαθέτει τα ισχυρότερα μαγνητικά πεδία που έχουν εφαρμοστεί σε tokamak [18]. Παράλληλα πολλοί μικρότεροι αντιδραστήρες βρίσκονται υποκατασκευή ή σε προχωρημένο στάδιο σχεδιασμού σε διάφορες χώρες, μεταξύ αυτών και η Ιταλία με το Frascati Tokamak Upgrade [19].



Σχήμα 7. Το Joint European Torus στο Cullham (U.K.) [10].

Σημειώνεται ότι άλλη σχεδίαση/διάταξη αντιδραστήρα σύντηξης που χρησιμοποιεί τη μέθοδο μαγνητικού περιορισμού του πλάσματος είναι οι stellarators που χρησιμοποιούν πολύπλοκα πηνία (Σχήμα 8) για τη δημιουργία ισχυρών μαγνητικών πεδίων. Πλεονέκτημα των stellarators είναι ότι δεν είναι ευάλωτοι σε μαγνητικές παρεμβολές και έτσι μπορούν να επιτύχουν καλύτερο έλεγχο του πλάσματος για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, μειονεκτήματά τους συνιστούν το υψηλό κόστος και η πολυπλοκότητα κατασκευής τους. Η σημαντικότερη διάταξη stellarator είναι το Wendelstein 7-X που κατασκευάστηκε στο Max Planck Institute for Plasma Physics [20].

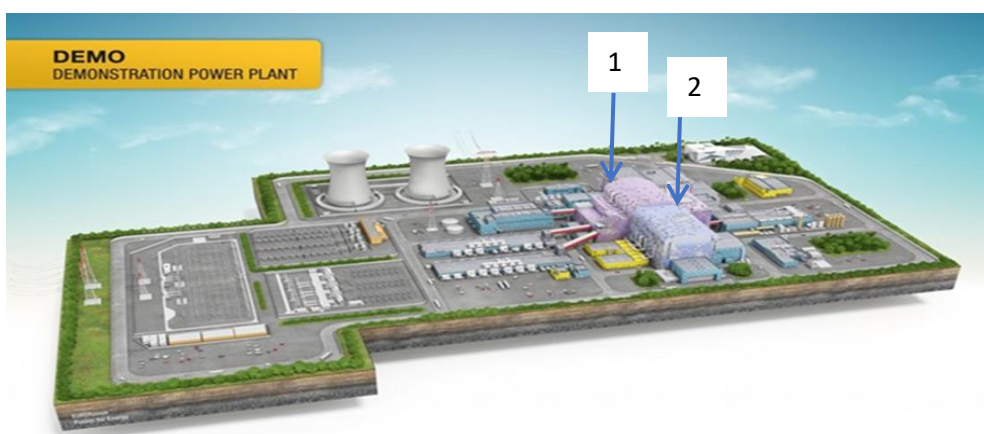


Σχήμα 8. Αναπαράσταση του συστήματος πηνίου (μπλε) και πλάσματος (κίτρινο) στο stellarator Wendelstein 7-X. Η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου είναι επισημασμένη με πράσινο χρώμα [20].

3.Επισκόπηση της εγκατάστασης DEMO

3.1 Γενικά στοιχεία

Στο Σχήμα 9 δίδεται ένα αρχικό σχέδιο του συγκροτήματος του DEMO [21]. Στο κτήριο 1 με το θόλο θα στεγαστεί το tokamak και αυτό το κτήριο θα αποτελέσει το κύριο αντικείμενο μελέτης αυτού του κεφαλαίου. Στο κτήριο 2 θα γίνεται η μετατροπή της θερμικής ισχύος που παράγεται από τον αντιδραστήρα σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω στροβίλων.



Σχήμα 9. Άποψη της εγκατάστασης DEMO. Το κτήριο 1 με το θόλο θα στεγάζει το tokamak και σε αυτό εστιάζεται η παρούσα μελέτη. Στο κτήριο 2 θα γίνεται η μετατροπή της θερμικής ισχύος που παράγεται από τον αντιδραστήρα σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω στροβίλων [21].

Στην παρούσα φάση του εννοιολογικού σχεδιασμού, το κτήριο του tokamak (κτήριο 1 στο Σχήμα 9) αποτελείται από τρία επιμέρους κτήρια, το κυρίως κτήριο του tokamak, το κτήριο των συστημάτων τριτίου και το κτήριο των διαγνωστικών συστημάτων παρακολούθησης της λειτουργίας του σταθμού. Οι τομές των επιμέρους τμημάτων του κτηρίου του DEMO απεικονίζονται στα Σχήματα 10 και 11.

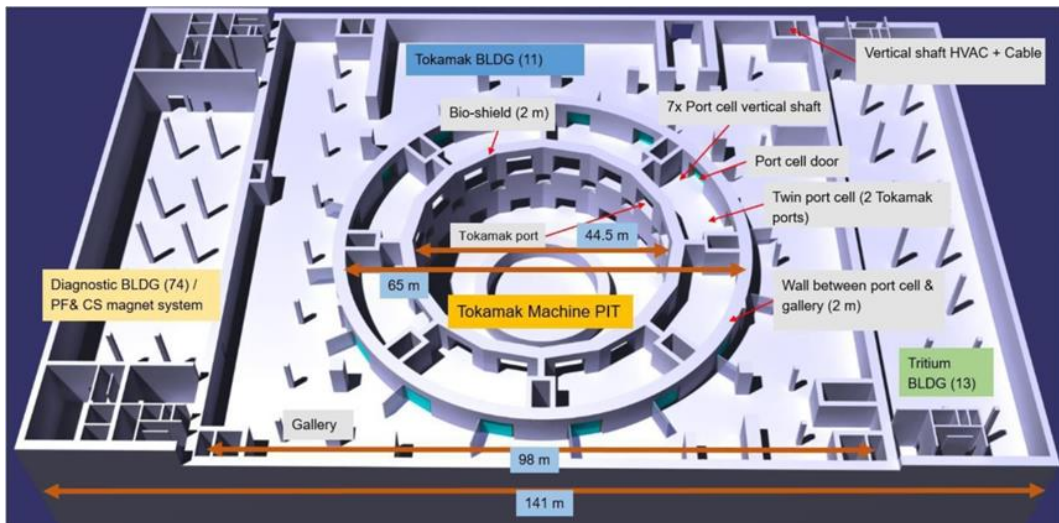
Το κτήριο συστημάτων τριτίου στεγάζει τον εξοπλισμό και τα συστήματα αποθήκευσης και τροφοδοσίας τριτίου και βρίσκεται δίπλα στο κτήριο του tokamak για να ελαχιστοποιηθεί το μήκος των γραμμών κενού και μεταφοράς.

Το κτήριο των διαγνωστικών συστημάτων στεγάζει τον εξοπλισμό μετρήσεων και παρακολούθησης της κατάστασης του πλάσματος, της παροχής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα πηνίων που παράγουν τα μαγνητικά πεδία, καθώς και θαλάμους όπου είναι εγκατεστημένα τα επιμέρους συστήματα ελέγχου του αντιδραστήρα.

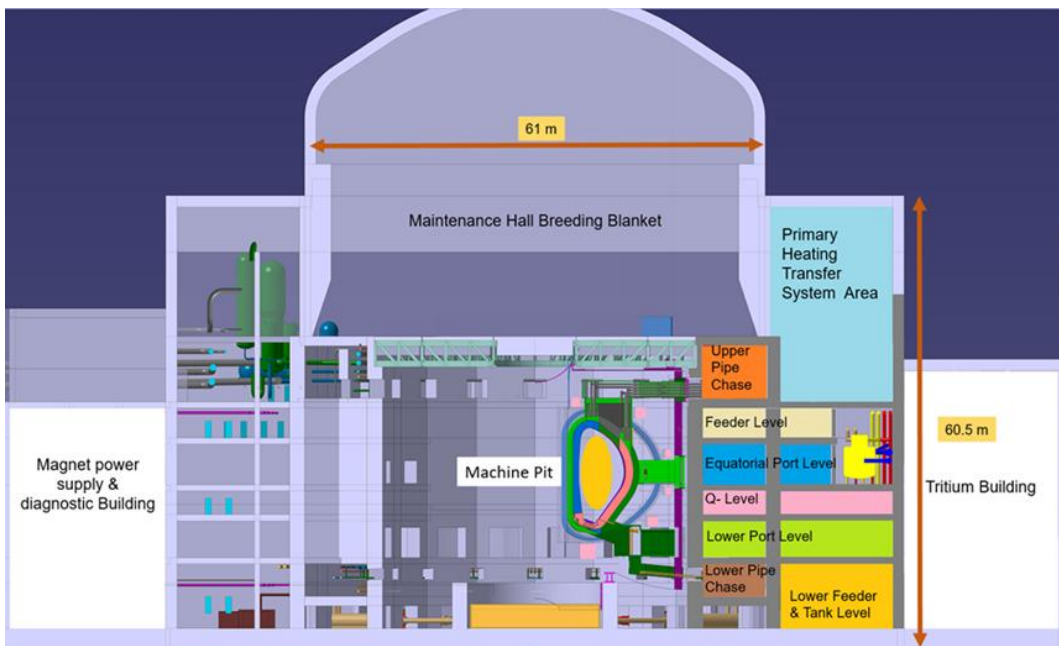
Το κυρίως κτήριο στεγάζει το tokamak (machine pit) και τα πολυάριθμα συστήματα που είναι υπεύθυνα για την παραγωγή και τον έλεγχο του πλάσματος, καθώς και την αναπαραγωγή τριτίου.

Η δομή του κτηρίου περιλαμβάνει κυλινδρική θωράκιση από ενισχυμένο σκυρόδεμα. Σε διαφορετικά επίπεδα γύρω από το tokamak ενσωματώνονται συστήματα μετρήσεων, βοηθητικού εξοπλισμού και τα διάφορα συστήματα αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης.

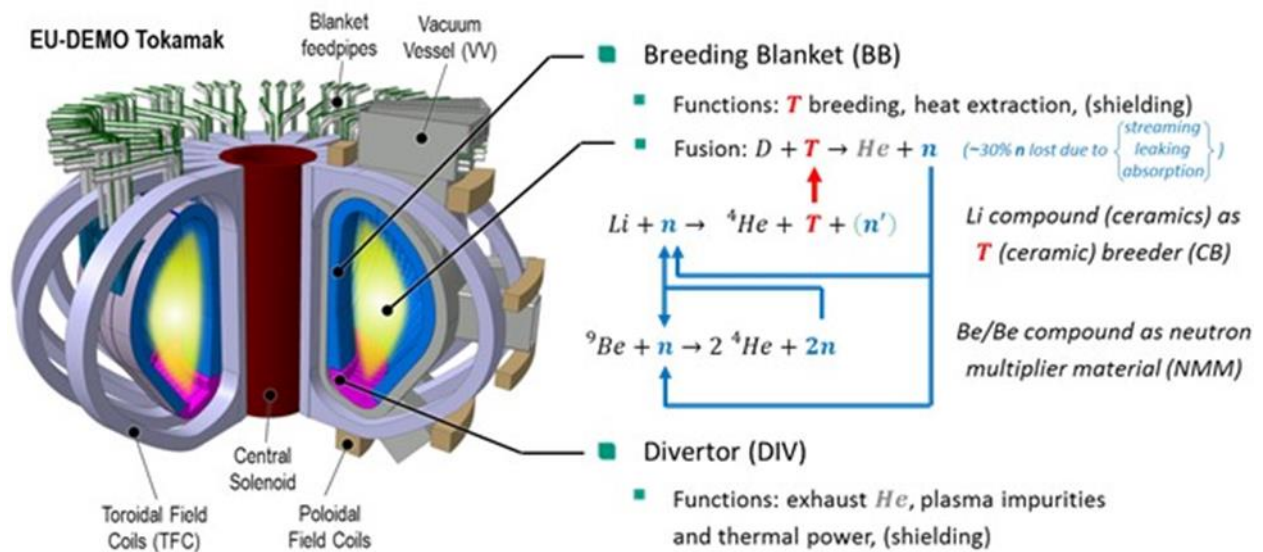
Τονίζεται ότι το κτήριο είναι σχεδιασμένο σύμφωνα με τις προδιαγραφές πυρηνικής ασφάλειας και αποτελεί το τελικό φράγμα για την έκλυση ραδιενεργών υλικών προς το περιβάλλον σε περίπτωση ατυχήματος. Βασικό χαρακτηριστικό της εσωτερικής δομής του είναι η διαμερισματοποίηση σε επιμέρους τμήματα (θάλαμοι) για τον περιορισμό της διασποράς ραδιενεργών υλικών σε ενδεχόμενα ατυχημάτων που θα έχουν σαν αποτέλεσμα την έκλυση ραδιενεργών ρύπων [11].



Σχήμα 10. Κάτοψη του κτηρίου 1 της εγκατάστασης DEMO [22].



Σχήμα 11. Εγκάρσια τομή του κτηρίου 1 της εγκατάστασης DEMO [22].



Σχήμα 12. Αναπαράσταση του tokamak του DEMO [22].

Στο σχήμα 12 δίνεται η αρχή λειτουργίας του DEMO. Οι αντιδράσεις σύντηξης συντελούνται εντός του τοροειδούς θαλάμου κενού (vacuum vessel). Στο θάλαμο κενού εισάγονται τα καύσιμα, δευτέριο και τρίτιο. Στην συνέχεια το αέριο θερμαίνεται μέσω διαφόρων συστημάτων θέρμανσης, έτσι ώστε να φτάσει στην απαιτούμενη θερμοκρασία που το δευτέριο και το τρίτιο θα συντηχθούν μέσω της πυρηνικής αντίδρασης D-T, που αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 1.2. Τα νετρόνια που παράγονται από την αντίδραση D-T είναι ενέργειας 14.1 MeV και απορροφούνται από το τοίχωμα βηρυλλίου του θαλάμου κενού και το στρώμα λιθίου, στα οποία μεταφέρεται η κινητική τους ενέργεια με αποτέλεσμα τη θέρμανσή τους. Παράλληλα, η αλληλεπίδραση των νετρονίων με το 6Li έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή τρίτιου, μέσω των πυρηνικών αντιδράσεων που φαίνονται στο σχήμα 12. Η παραγόμενη θερμότητα μεταφέρεται μέσω του πρωτεύοντος κυκλώματος ψύξης, με τελικό στόχο την θέρμανση νερού και την παραγωγή ατμού. Ο παραγόμενος ατμός προκαλεί την κίνηση των γεννητριών και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μεταφέρεται στο δίκτυο. Εξετάζονται διάφορες δυνατότητες ψυκτικού μέσου στο πρωτεύον κύκλωμα με επικρατέστερη τη χρήση ηλίου(He).

Έχουν οριστεί τέσσερα στάδια λειτουργίας του αντιδραστήρα.

- Το στάδιο 0, που αντιπροσωπεύει την κανονική λειτουργία του αντιδραστήρα, κατά την οποία υπέρθερμο πλάσμα συγκρατείται εντός του tokamak από το μαγνητικό πεδίο και παράγονται πεδία νετρονίων. Σε αυτό το στάδιο, λόγω των υψηλών πεδίων ακτινοβολίας, δεν είναι δυνατή η πρόσβαση εντός του κτηρίου tokamak. Η πρόσβαση σε χώρους στο εσωτερικό της βιολογικής θωράκισης μετά την έναρξη λειτουργίας είναι δυνατή μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.
- Το στάδιο 1, κατά το οποίο το tokamak είναι εκτός λειτουργίας και πραγματοποιούνται εργασίες συντήρησης των συστημάτων του. Στους χώρους εκτός του θαλάμου κενού, η πρόσβαση των μελών του προσωπικού περιορίζεται σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση των επιμέρους τμημάτων της εγκατάστασης σε διαφορετικές «ζώνες». Τονίζεται ότι τα επίπεδα

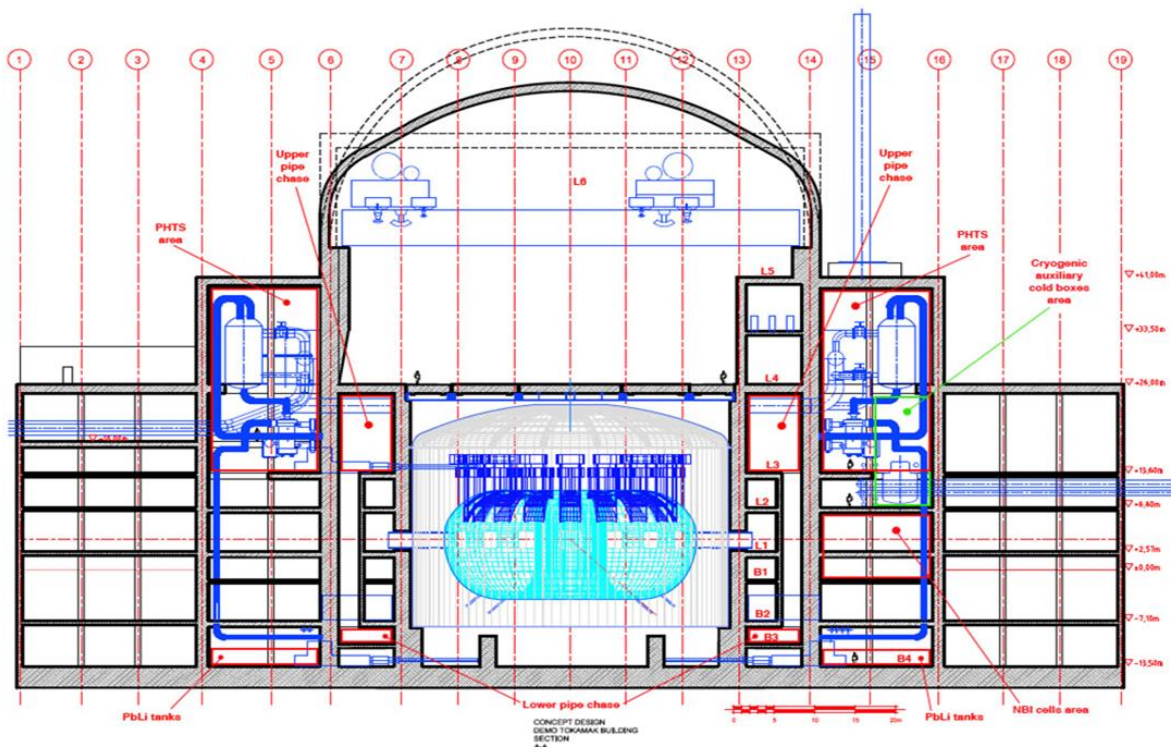
ακτινοβολίας εντός του θαλάμου κενού (Vacuum Vessel) δεν επιτρέπουν την είσοδο μελών του προσωπικού στο χώρο.

- Το στάδιο 2, που το tokamak είναι εκτός λειτουργίας και πραγματοποιούνται μεταφορές συστημάτων και εξοπλισμού εντός του κτηρίου κάνοντας χρήση των γερανών που βρίσκονται στο θόλο για την τοποθέτησή τους.
- Το στάδιο 3, που το tokamak είναι εκτός λειτουργίας και διεξάγονται διαγνωστικοί έλεγχοι των επιμέρους συστημάτων.

Η παρούσα εργασία αναφέρεται αποκλειστικά στο στάδιο λειτουργίας 1, δηλαδή κατά τις εργασίες συντήρησης των συστημάτων του DEMO. Ο ραδιολογικός κίνδυνος στο στάδιο 1 προέρχεται από νετρονική ενεργοποίηση υλικών που εκτίθενται στο πεδίο νετρονίων και από το τρίτιο.

3.2 Αρχιτεκτονική δομή του DEMO

Βάσει των υφιστάμενων σχεδίων του εννοιολογικού σχεδιασμού του DEMO (Σχήμα 13), οι θάλαμοι του κτηρίου του tokamak περιγράφονται στον Πίνακα 1. Ο κατάλογος των θαλάμων εξήχθη από την τεχνική έκθεση DEMO Room Book [23]. Το DEMO Room Book παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες ασφάλειας που πρέπει να πληρούνται στον κάθε θάλαμο της εγκατάστασης. Οι πληροφορίες συμπεριλαμβάνουν τις διαστάσεις του θαλάμου, τα μαγνητικά πεδία, την πίεση, τη θερμοκρασία, την υγρασία, το ρυθμό δόσης, τη συγκέντρωση τριτίου στον αέρα, τον χαρακτηρισμό του θαλάμου σε ζώνη ακτινοβολίας, τις απαιτήσεις εξαερισμού, τον χαρακτηρισμό του θαλάμου σε ζώνη πυρασφάλειας, τον κίνδυνο πρόκλησης έκρηξης και άλλες παραμέτρους που αφορούν στην υγιεινή και ασφάλεια των εργαζομένων.



Σχήμα 13. Διάταξη της εγκατάστασης tokamak DEMO [24].

Πίνακας 1. Κατάλογος των θαλάμων του DEMO [24].

No.	Room	Description
1	11-L3-PHTS	Primary heat transfer system (L3)
2	11-L4-PHTS	Primary heat transfer system (L4)
3	11-L3-LP	Upper pipe chase (L3)
4	11-L2-CRY	Cryogenic auxiliaries cold box (L2)
5	11-NBI	Neutral Beam Injection cell (L1)
6	11-B2-PC	Port cell (B2)
7	11-L1-PC	Port cell (L1)
8	11-B3-LP	Lower pipe chase (B3)
9	11-B4-Drain tank	Coolant expansion volume drain tanks (B4)
10	11-B4-LL	PbLi central cylindrical drain tank (B4)
11	11-B2-PS	8 port cell vertical shafts (B2 to L2)
12	11-B1-V	2 cryo-distribution vertical shafts (B1 to B3)
13	11-B4-H	4 HVAC vertical shafts (B4 to L4)
14	11-B4-S	4 vertical corner shafts for services (B4 to L4)
15	11-B4-GA	Gallery at magnet feeder basement level (B4)
16	11-B3-GA	Gallery at lower pipe chase basement level (B3)
17	11-B2-GA	Gallery at basement lower port divertor level (B2)
18	11-B1-GA	Gallery at divertor Q level (B1)
19	11-L1-GA	Gallery at equatorial port level (L1)
20	11-L2-GA	Gallery at magnet feeder upper port level (L2)
21	11-L3-GA	Gallery at upper pipe chase level (L3)
22	11-L4-L5-GA	Gallery at maintenance hall level (L4 & L5)
23	11-L6-GA	Gallery at dome level (L6)
24	11-L3-CU01	Cubicle room #1 at upper level (L3)
25	11-L3-CU02	Cubicle room #2 at upper level (L3)
26	11-L3-LL01	Auxiliaries of LiPb loop (pump, heat exchanger, heaters, purification, etc) (L3)
27	11-L3-LL02	Auxiliaries of LiPb loop (pump, heat exchanger, heaters,

No.	Room	Description
		<i>purification, etc) (L3)</i>
28	<i>11-L4-Dome</i>	<i>Upper part of the building with cranes for positioning of components (L4)</i>
29	<i>11-L2-PC</i>	<i>Rupture disks port cell (L2)</i>
30	<i>11-B3-VA01</i>	<i>Vacuum pumping room (B3)</i>
31	<i>11-B3-VA02</i>	<i>Vacuum pumping room (B3)</i>
32	<i>11-B3-VA03</i>	<i>Vacuum pumping room (B3)</i>
33	<i>11-B3-VA04</i>	<i>Vacuum pumping room (B3)</i>
34	<i>11-B3-VA05</i>	<i>Vacuum pumping room (B3)</i>
35	<i>11-B3-VA06</i>	<i>Vacuum pumping room (B3)</i>
36	<i>11-B3-VA07</i>	<i>Vacuum pumping room (B3)</i>
37	<i>11-B3-VA08</i>	<i>Vacuum pumping room (B3)</i>
38	<i>11-B3-VA09</i>	<i>Vacuum pumping room (B3)</i>
39	<i>11-B3-VA10</i>	<i>Vacuum pumping room (B3)</i>

4. Εργασίες συντήρησης στην εγκατάσταση DEMO

4.1 Εργασίες συντήρησης και ασφάλεια

Η συντήρηση των οργάνων και συστημάτων της εγκατάστασης DEMO προϋποθέτει την πρόσβαση σε κάθε τμήμα της, ακόμα και σε περιοχές με υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας. Η εμπειρία από εγκαταστάσεις σύντηξης, όπως το JET, έχει δείξει ότι οι δραστηριότητες συντήρησης έχουν την μεγαλύτερη συνεισφορά στην ραδιολογική έκθεση των εργαζόμενων. Για αυτό το λόγο, οι εργασίες συντήρησης πρέπει να πραγματοποιούνται σύμφωνα με τη θεμελιώδη απαίτηση βελτιστοποίησης της ασφάλειας (As Low As Reasonably Achievable, ALARA), την τήρηση των ορίων δόσεων εκτιθέμενων εργαζόμενων και την αποφυγή διασποράς ενδεχόμενης ραδιενεργού ρύπανσης. Οι εργασίες συντήρησης πραγματοποιούνται ανάλογα με τα επίπεδα κινδύνου, είτε με φυσική παρουσία (manually) από εξειδικευμένο προσωπικό, είτε εξ αποστάσεως (remote handling) με ειδικά εργαλεία ή αυτοματοποιημένα συστήματα. Η επιλογή εξαρτάται από παράγοντες όπως οι περιβαλλοντικές συνθήκες στο χώρο εργασίας (μαγνητικά πεδία, θερμοκρασία, ραδιενεργός ρύπανση και ρυθμός εξωτερικής δόσης ακτινοβολίας), η πολυπλοκότητα των εργασιών, η συχνότητα και ο απαιτούμενος χρόνος για την εκτέλεση της εργασίας. Η επιλογή της μεθόδου εργασιών συντήρησης, της συχνότητάς της, του αναγκαίου ανθρώπινου δυναμικού, του εξοπλισμού, των μέσων προστασίας και του απαιτούμενου χρόνου είναι απαραίτητα στοιχεία για τον υπολογισμό της επαγγελματικής έκθεσης σε ακτινοβολία κατά την εκτέλεση των εργασιών συντήρησης.

4.2 Τύποι εργασιών συντήρησης

Οι προγραμματισμένες δραστηριότητες συντήρησης περιλαμβάνουν την επιθεώρηση φυσικών, μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων για τον προσδιορισμό της κατάστασης λειτουργίας των στοιχείων ή εξαρτημάτων, τη βαθμονόμηση για την ανίχνευση και ρύθμιση αποκλίσεων από τα καθορισμένα όρια λειτουργίας, τη δοκιμή και προσαρμογή καθορισμένων λειτουργικών παραμέτρων για βελτιστοποίηση της απόδοσης των εξαρτημάτων. Στον Πίνακα 2 παρατίθενται οι κυριότεροι τύποι εργασιών συντήρησης στην εγκατάσταση του DEMO [25].

4.3 Στοιχεία και μονάδες

Ο αριθμός των στοιχείων ανά μονάδα που πρέπει να συντηρηθούν παρέχει πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό εξαρτημάτων/εξοπλισμού που χρειάζονται τον ίδιο τύπο πρακτικών δραστηριοτήτων, ενώ ο αριθμός των λειτουργικών μονάδων στο σύστημα (NU) παρέχει πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό μονάδων που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την αξιολόγηση.

4.4 Συχνότητα εργασιών συντήρησης

Έχει οριστεί ένα σύνολο συχνότητων για να είναι δυνατή η εκτίμηση του αριθμού των δραστηριοτήτων συντήρησης που πρέπει να εκτελεστούν κατά τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης. Η απόδοση συγκεκριμένων τιμών συχνότητας στις εργασίες συντήρησης κάθε τμήματος της

εγκατάστασης γίνεται με τεχνικά κριτήρια και με βάση την εμπειρία που έχει αποκτηθεί στην πυρηνική βιομηχανία και στο JET ενώ θα ενσωματωθεί/συνυπολογιστεί και αυτή που θα αποκτηθεί από το ITER. Για παράδειγμα, στις προγραμματισμένες δραστηριότητες συντήρησης που εκτελούνται κάθε έξι μήνες ορίζεται τιμή συχνότητας $FY=2 \text{ y}^{-1}$. Στις δραστηριότητες συντήρησης που εκτελούνται μία φορά το χρόνο αποδίδεται συχνότητα $FY=1 \text{ y}^{-1}$.

Πίνακας 2. Τύποι εργασιών συντήρησης στο DEMO [25].

Type of Activity	Description
Close PM	Hands-on activities performed to close the specific PM
Calibration	Hands-on activities performed to calibrate instrumentation
Close RH	Hands-on activities performed to re-assemble the component or the surrounding area after the RH task
Close CM	Hands-on activities performed to close the specific CM
CM	Corrective Maintenance - without RH tools
CM with RH	Corrective Maintenance – with the assistance of RH tools
Commissioning	Hands-on activities performed after RH task for the commissioning of the component/equipment
Decontamination	Decontamination of the component and/or area where the component is located
HP Inspection	Inspection by the health physics supervisor
Inspection	Visual inspection
Inspection & Test	Inspection and/or Test of the element
PM	Planned Maintenance - without RH tools
PM with RH	Planned Maintenance - with the assistance of RH tools
Prepare CM	Hands-on activities performed to prepare the CM
Prepare PM	Hands-on activities performed to prepare the PM
Prepare RH	Hands-on activities performed to prepare the component or the surrounding area for RH task

4.5 Αριθμός εργαζομένων

Ο αριθμός των εργαζομένων (pp) που συμμετέχουν στις δραστηριότητες συντήρησης καθορίζεται από τον τύπο της εργασίας και το πρόγραμμα συντήρησης. Επομένως, σε αυτή τη φάση σχεδιασμού του DEMO τα υπάρχοντα δεδομένα παρέχουν μόνο μια χονδρική εκτίμηση ως προς τον αριθμό μελών του προσωπικού (pp) που εμπλέκεται σε κάθε δραστηριότητα συντήρησης.

4.6 Χρόνος έκθεσης

Ο χρόνος που απαιτείται για τις διάφορες εργασίες συντήρησης δεν μπορεί να καθοριστεί σε αυτό το στάδιο του σχεδιασμού του DEMO, καθώς δεν έχει εκπονηθεί ακόμη λεπτομερές σχέδιο συντήρησης και μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο μια πρόχειρη εκτίμηση της τάξης μεγέθους του απαιτούμενου χρόνου. Ωστόσο, με βάση την εμπειρία από το ITER και το JET, έχουν υπολογιστεί οι προκαταρκτικοί χρόνοι για εργασίες συντήρησης σε ορισμένα συστήματα του DEMO (Πίνακας 3) [25].

Πίνακας 3. Ενδεικτικοί χρόνοι για συγκεκριμένες δραστηριότητες συντήρησης στο DEMO και σχετικές αναφορές.

Room or Area	Type of Activity	Max Time (h)	Min Time (h)	Reference (UID)
Upper level	Transportation	89	29	[26]
Upper-equatorial level	Transportation	90	56	[26]
Equatorial level	Transportation	58	13	[26]
Divertor level	Transportation	70	25	[26]
Basement level	Transportation	81	43	[26]
Upper pipe Chase	Maintenance	65	45	[27]
Lower pipe chase	Maintenance	65	45	[27]
NBI Cell	Vert. pipe chutes maint.	35	32	[28]
Upper port (Double Null)	All maintenance operations	83.2	83.2	[29]
Lower port (Single Null)	All maintenance operations	107.8	107.8	[30]
Lower port (Double Null)	All maintenance operations	65.3	65.3	[31]
Upper port (Single Null)	All maintenance operations	91.3	91.3	[32]

5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΣΥΛΛΟΓΙΚΗΣ ΔΟΣΗΣ

5.1 Ραδιολογικοί κίνδυνοι στο DEMO κατά τη φάση συντήρησης

Κατά την λειτουργία του tokamak, η αντίδραση σύντηξης που τροφοδοτείται με δευτέριο-τρίτιο εκπέμπει ακτινοβολία νετρονίων εντός του θαλάμου πλάσματος (vacuum vessel) με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση των υλικών που εκτίθενται στο πεδίο των νετρονίων μέσω πυρηνικών αντιδράσεων [33]. Για την προστασία από το πρωτεύον πεδίο νετρονίων υπάρχει η βιολογική θωράκιση, που περιβάλλει τον θάλαμο θωρακίζοντας την υπόλοιπη εγκατάσταση. Ωστόσο, τα νετρόνια διαχέονται μέσω των θυρών και διακένων πρόσβασης της βιολογικής θωράκισης και έχουν σαν αποτέλεσμα την ενεργοποίηση υλικών στους θαλάμους του κτηρίου του tokamak στους οποίους υπάρχει πρόσβαση από το προσωπικό για την εκτέλεση εργασιών συντήρησης.

Πειραματικά δεδομένα που προέρχονται από τις εγκαταστάσεις σύντηξης που ήδη λειτουργούν, όπως το JET, το οποίο είναι επί του παρόντος το μόνο tokamak που λειτουργεί με το μίγμα καυσίμου δευτερίου-τρίτιου που θα χρησιμοποιηθεί στους μελλοντικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έδειξαν ότι οι δραστηριότητες συντήρησης συμβάλλουν στο 66.9 % της συλλογικής δόσης στους εργαζόμενους [34]. Ως εκ τούτου, ο ορισμός των εργασιών συντήρησης και ο προσδιορισμός και ο χαρακτηρισμός των πηγών ακτινοβολίας είναι τα σημεία εκκίνησης για την εκτίμηση της δόσης στο προσωπικό.

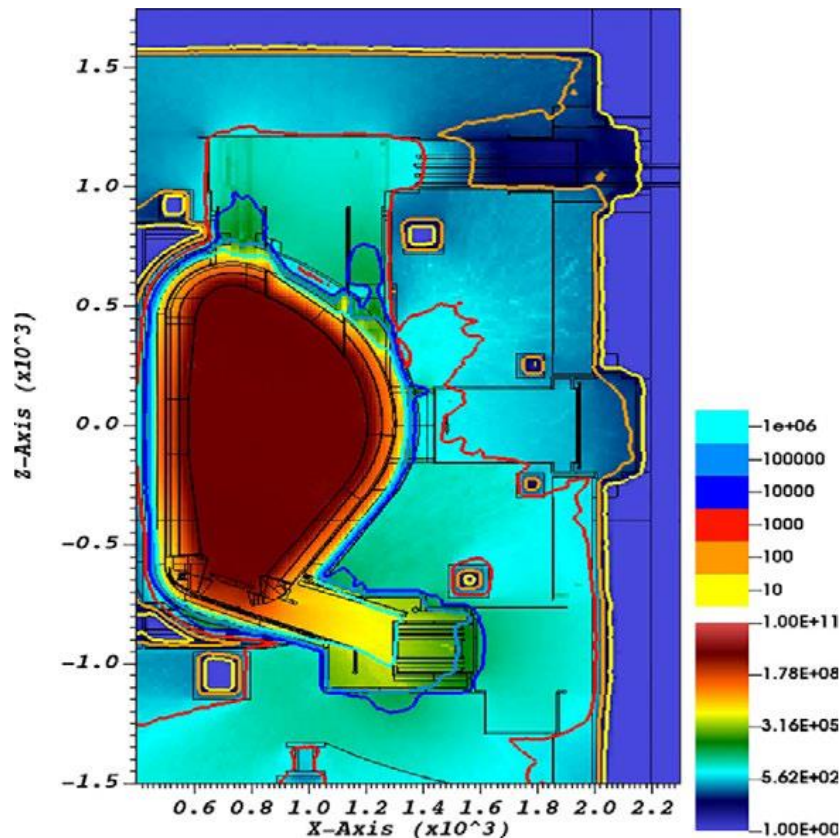
Προκαταρκτικές εκτιμήσεις έδειξαν ότι το DEMO, λόγω της πολυπλοκότητάς του, θα έχει χαμηλή αξιοπιστία κατά τη λειτουργία του λόγω του μεγάλου αριθμού αναμενόμενων ετήσιων γεγονότων αστοχίας συστημάτων, που θα απαιτούν συχνές διακοπές της λειτουργίας του. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό, έχει προταθεί η ανάπτυξη ενός προγράμματος συντήρησης που θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με σχετικά σύντομο χρόνο διακοπής λειτουργίας, μεταξύ 3 ημερών και 2 μηνών, για την πρόληψη αστοχιών ή συμβάντων που θα είχαν σαν αποτέλεσμα μακροχρόνια διακοπή της λειτουργίας του σταθμού. Αυτές οι σχετικά σύντομες αλλά συχνές δραστηριότητες προγραμματισμένης συντήρησης αναμένεται να αποτελέσουν σημαντική πηγή έκθεσης για τους εργαζόμενους.

Οι ραδιολογικοί κίνδυνοι για τους εργαζόμενους στην εγκατάσταση όταν το tokamak είναι εκτός λειτουργίας προέρχονται από:

- Την ακτινοβολία γάμμα, που εκπέμπεται από τα προϊόντα της ενεργοποίησης στα δομικά υλικά, τα υλικά που είναι αντιμέτωπα με το πλάσμα, τα υλικά των σωληνώσεων του κυκλώματος ψύξης, καθώς και ενεργοποιημένα προϊόντα διάβρωσης που κυκλοφορούν στο κύκλωμα ψύξης.
- Το τρίτιο, που αποτελεί μέρος του μείγματος καυσίμου και μπορεί να ρυπάνει τον ατμοσφαιρικό αέρα των θαλάμων στο κτήριο του tokamak και στο κτήριο συστημάτων τρίτιου λόγω διαρροής.

A. Εξωτερική έκθεση

Στο Σχήμα 14 [19] παρουσιάζεται ο ρυθμός δόσης γύρω από το Tokamak, μετά τη διακοπή λειτουργίας του DEMO. Όπως φαίνεται στο Σχήμα, ο ρυθμός δόσης θα είναι πολύ υψηλός και σε ορισμένους θαλάμους ξεπερνά τα 10 $\mu\text{Sv/h}$ μετά από 12 μέρες διακοπής της λειτουργίας του DEMO και ειδικά στο εσωτερικό του θαλάμου κενού.



Σχήμα 14. Ρυθμός δόσης [$\mu\text{Sv/h}$] στο DEMO 12 d μετά τη διακοπή λειτουργίας του (πάνω κλίμακα ισοδοσικές γραμμές, κάτω κλίμακα χαρτογράφηση δόσης) [19].

B. Εσωτερική έκθεση

Στο DEMO θα χρησιμοποιηθεί ποσότητα τριτίου περίπου 7.5 kg, δηλαδή περίπου δύο φορές μεγαλύτερη από την ποσότητα των 4 kg στο ITER, σε ένα ευρύ φάσμα διαδικασιών που αφορούν στην αποθήκευση, μεταφορά και τροφοδοσία του tokamak, αναπαραγωγή, ανάκτηση και ανατροφοδότηση στο σύστημα. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται τα προστατευτικά μέτρα από την έκθεση στο τρίτιο για τους εργαζόμενους αποκλειστικά στο κτήριο του tokamak. Κύριες εστίες υψηλής συγκέντρωσης τριτίου στο κτήριο tokamak, που διακρίνονται στα σχήματα 10 και 11, είναι το machine pit και τα port cells και οι κάθετοι αεραγωγοί, διότι σε αυτούς τους χώρους βρίσκονται οι σωλήνες μεταφοράς τριτίου από τις οποίες ο θάλαμος κενού (vacuum vessel) τροφοδοτείται με τρίτιο σαν καύσιμο για την πραγματοποίηση των αντιδράσεων σύντηξης. Στους αντιδραστήρες σύντηξης, το τρίτιο μπορεί να βρεθεί είτε ως αέριο (HT) είτε ως τριτωμένο νερό (HTO). Η δεύτερη μορφή θεωρείται περισσότερο επικίνδυνη διότι έχει διαβρωτικές ιδιότητες. Με βάση τις μελέτες που έχουν γίνει για το ITER, υπολογίζεται ότι η συμβολή του τριτίου στην συνολική επιχειρησιακή ραδιολογική έκθεση των εργαζόμενων θα μπορούσε να είναι της τάξης του 20-30 %. Επιπλέον, η εμπειρία από την εγκατάσταση του JET έδειξε ότι τα επαρκή μέτρα ακτινοπροστασίας μπορούν να εξασφαλίσουν την μείωση της δόσης του τριτίου σε πολύ μικρό ποσοστό επί του συνόλου [34].

5.2 Όρια έκθεσης

Οι στόχοι για τον περιορισμό των δόσεων των εργαζομένων στο DEMO είναι οι εξής [23]:

1. Η μέγιστη ετήσια ατομική δόση (ενεργός δόση) θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη και, υπό οποιοσδήποτε συνθήκες, κάτω από 10 mSv/έτος.
2. Η μέση ετήσια ατομική δόση σε εκτιθέμενους εργαζόμενους θα πρέπει να είναι κάτω από 2.5 mSv/έτος.
3. Κάθε μη προγραμματισμένη έκθεση που θα οφείλεται σε ατύχημα θα πρέπει να είναι μικρότερη από 10 mSv.

Ο στόχος που τέθηκε κατά τον εννοιολογικό σχεδιασμό του DEMO για την επιχειρησιακή ραδιολογική έκθεση (Operational Radiation Exposure, ORE) είναι η συλλογική δόση (Collective Dose) των εργαζομένων να είναι μικρότερη από 700 mSv·p/y [11]. Αυτή η τιμή είναι παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται στους πυρηνικούς σταθμούς σχάσης [19]. Ο ρυθμός δόσης σε περιοχές όπου η συντήρηση αναμένεται να γίνει με φυσική παρουσία εργαζόμενων πρέπει να είναι κάτω από 100 μ Sv/h. Η αρχή της βελτιστοποίησης (As Low As Reasonably Achievable, ALARA) πρέπει να εφαρμόζεται σε όλες τις φάσεις ζωής της εγκατάστασης, δηλαδή σχεδιασμού, λειτουργίας, συντήρησης και παροπλισμού της.

5.3 Ζώνες ακτινοβολίας

Για την ταξινόμηση όλων των περιοχών στο DEMO με βάση τα επίπεδα ραδιολογικού κινδύνου έχει προταθεί η κατηγοριοποίηση των χώρων εργασίας σε ζώνες ακτινοβολίας, οι οποίες καθορίζουν και τους περιορισμούς πρόσβασης. Οι ζώνες ακτινοβολίας χρησιμεύουν ως μέσο για την ελαχιστοποίηση της έκθεσης των εργαζομένων λαμβάνοντας υπόψη την κατάληψη και τα επίπεδα κινδύνου. Η στρατηγική για τους ορισμούς ζωνών του DEMO βασίζεται στους γαλλικούς κανονισμούς ακτινοπροστασίας και οι ταξινομήσεις ζωνών είναι παρόμοιες με αυτές που ορίστηκαν για το ITER [23]. Η κατηγοριοποίηση ζωνών ακτινοβολίας για το ITER δίνεται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Κατηγοριοποίηση ζωνών ακτινοβολίας στο ITER [23]

Zone	Dose Rate (μ Sv/h)	Effective Dose Rate
White	1	<80 μ Sv/month
Blue	5	<7.5 μ Sv/h
Green	5	
	10	<25 μ Sv/h
	25	
Yellow	50	<2 mSv/h
	100	
Orange	20,000	<100 mSv/h
Red	100,000	>100 mSv/h

5.4 Κατηγοριοποίηση χώρων ως προς τον κίνδυνο εσωτερικής έκθεσης

Η κατηγοριοποίηση των χώρων ως προς την επικινδυνότητα λόγω της συγκέντρωσης τριτίου στον αέρα καθορίζει το σύστημα κλιμάκωσης των απαιτήσεων απόδοσης του συστήματος εξαερισμού (confinement class) του θαλάμου ανάλογα με τον δυνητικό κίνδυνο εσωτερικής έκθεσης τριτίου σε κάθε θάλαμο του κτηρίου του tokamak. Η κατηγοριοποίηση των χώρων που προτείνεται για το DEMO δίνεται στον Πίνακα 5. Επισημαίνεται ότι η παράγωγη συγκέντρωση στον αέρα (Derived Air Concentration, DAC) ορίζεται ως η συγκέντρωση ενός δεδομένου ραδιονουκλιδίου στον αέρα το οποίο, εάν αναπνεύσει ένας ενήλικας για ένα έτος εργασίας σε σύνολο 2.000 h, με ρυθμό εισπνοής 1,1 m³/h, οδηγεί σε πρόσληψη του ετήσιου ορίου (Annual Limit of Intake, ALI). Για το τρίτιο, το ετήσιο όριο πρόσληψης για τους εργαζόμενους που έχει ως αποτέλεσμα ενεργό δόση 20 mSv αντιστοιχεί σε ενεργότητα 1×10⁹ Bq.

Πίνακας 5. Κατηγοριοποίηση χώρων ως προς τα επίπεδα συγκέντρωσης τριτίου στον αέρα [23].

Permanent Air Contamination (DAC)	Accidental Air Contamination (DAC)	Confinement Class
0	≤1	C1
≤1	≤80	C2
≤1	≤4000	C3
≤80	≤4000	C4
<4000	≥4000	C4
>4000	≥4000	C4

Γενικότερα, όλοι οι χώροι που δεν περιέχουν τμήματα του πρωτεύοντος συστήματος μεταφοράς θερμότητας (PHTS) και σωλήνες τριτίου χαρακτηρίζονται ως κατηγορία C2. Επίσης, οι διάδρομοι πρόσβασης του προσωπικού χαρακτηρίζονται ως C2. Όλες οι περιοχές που σχετίζονται με το καύσιμο και τις αντλίες του θαλάμου κενού χαρακτηρίζονται ως κατηγορία C3. Η περιοχή της δεξαμενής αποστράγγισης, όλες οι περιοχές που σχετίζονται με την έγχυση καυσίμου χαρακτηρίζονται ως περιοχές κατηγορίας C4. Τέλος, ο θόλος και η αίθουσα συντήρησης έχουν ταξινομηθεί ως C4, αλλά αυτή η ταξινόμηση είναι υπό αναθεώρηση.

5.5 Μέτρα προστασίας από εσωτερική έκθεση

Τα μέτρα για την προστασία των εργαζομένων από την εσωτερική έκθεση σε τρίτιο αποτελούνται από συστήματα εξαερισμού των θαλάμων, χρήση υλικών με χαμηλή απορροφητικότητα στο τρίτιο και την κατάτμηση και απομόνωση των διαφορετικών περιοχών του κτηρίου για τον περιορισμό της εξάπλωσης ενδεχομένης έκλυσης τριτίου σε αέρια μορφή, καθώς και χρήση εξοπλισμού ατομικής προστασίας για το προσωπικό. Η χρήση κατάλληλων μέσων ατομικής προστασίας (PPE) καθίσταται απαραίτητη για τη μείωση της πρόσληψης τριτίου με εισπνοή, απορρόφηση από το δέρμα ή κατάποση.

Οι απαιτήσεις για τον εξοπλισμό ατομικής προστασίας (PPE) βασίζονται στην ελαχιστοποίηση της συνολικής δόσης που λαμβάνεται από τους εργαζόμενους λόγω εξωτερικής και εσωτερικής έκθεσης. Όταν χρησιμοποιείται προστατευτική ενδυμασία, πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη η πρόσθετη δόση που λαμβάνεται λόγω της αύξησης του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση

μιας εργασίας σε μια περιοχή ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, η χρήση στολών με αναπνευστικό εξοπλισμό έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει σημαντικά τον χρόνο εργασίας καθώς δυσχεραίνει τις κινήσεις των εργαζόμενων.

Ο ατομικός προστατευτικός εξοπλισμός (PPE) που προτείνεται περιλαμβάνει ολόσωμες φόρμες, γάντια, ποδονάρια, αναπνευστήρες και ολόσωμες πλαστικές στολές. Όταν οι εργαζόμενοι χειρίζονται υλικό ή εξοπλισμό που είναι ρυπασμένος ή δυνητικά ρυπασμένος, θα φορούν γάντια για να ελαχιστοποιούν την πρόσληψη τριτίου μέσω του δέρματος. Τα γάντια που προσφέρουν επαρκή προστασία έναντι της διείσδυσης τριτίου είναι κατασκευασμένα από λατέξ ή χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC) και απορρίπτονται μετά από κάθε χρήση προκειμένου να μειωθεί η εξάπλωση της ρύπανσης. Γενικά, τα γάντια πάχους 0.5 mm θεωρούνται επαρκή για το χειρισμό επιφανειών με μεταθέσιμη ρύπανση μεγαλύτερη από 5 GBq/m², με την προϋπόθεση ότι αλλάζονται συχνά [35]. Επιπλέον, ως προληπτικό μέτρο, συνιστώνται επίσης καλύμματα ποδιών ή ποδονάρια για προστασία από πιθανή ρύπανση του δαπέδου.

Σε περιοχές δυνητικής συγκέντρωσης τριτίου στον αέρα, θα πρέπει να χρησιμοποιείται αναπνευστική συσκευή. Αυτός ο τύπος εξοπλισμού αποτελείται από μια μερική ή πλήρη μάσκα προσώπου που τροφοδοτείται με αέρα από φιάλη οξυγόνου. Σε περιπτώσεις όπου ο αερομεταφερόμενος κίνδυνος τριτίου είναι χαμηλός, ή όπου ο εργαζόμενος πρέπει να μετακινείται συνεχώς, προτιμάται μια αυτόνομη πλήρης ή μερική αναπνευστική συσκευή προσώπου αντί για αναπνευστήρα. Η χρήση ολόσωμων πλαστικών στολών είναι απαραίτητη για αποτελεσματική προστασία σε περιοχές με υψηλές συγκεντρώσεις τριτίου στον αέρα. Οι στολές με ενσωματωμένη παροχή αέρα πρέπει να παρέχουν επαρκή προστασία έναντι της πρόσληψης τριτίου τόσο με εισπνοή όσο και με απορρόφηση από το δέρμα. Οι στολές πρέπει να είναι σωστά σχεδιασμένες και καλά κατασκευασμένες, χρησιμοποιώντας υλικά που είναι ανθεκτικά στη διείσδυση τριτίου. Οι στολές με παροχή αέρα διατίθενται συνήθως σε ένα, δύο ή τρία κομμάτια, που αποτελούνται από ένα μακρυμάνικο πανωφόρι, ένα παντελόνι και πιθανώς μια αποσπώμενη κουκούλα [35]. Οι μπότες είναι συνήθως συγκολλημένες στο παντελόνι, για να αποκλείουν την διείσδυση τριτίου. Εκτός από την παροχή επαρκούς προστασίας έναντι του τριτίου, οι στολές πρέπει να παρέχουν καλή όραση, ελευθερία κινήσεων και ικανότητα επικοινωνίας μεταξύ των εργαζομένων.

Πίνακας 6. Συντελεστές προστασίας για διαφορετικά είδη ατομικού εξοπλισμού [35]

Suit Type	Protection Factor
Cotton overalls and respirator	2
One piece, 0.1 mm PVC suit and respirator	36
Cotton overalls, one piece PVC suit and respirator	170
Cotton overalls, two piece, 0.15-mm suit and respirator	60
Cotton overalls between 2 one-piece, 0.1-mm PVC suits and respirator	500
Wet cotton overalls between 2 one-piece 0.1-mm PVC suits and respirator	1,900
Two-piece air-supplied PVC suit and hood	3,000
One-piece PVC suit with two zipper type closures	500
One-piece suit with special air flow and removable helmet	800
One-piece suit with one zipper type closure	8,000
Three-piece suit with adhesive type closures	1,000
One-piece suit with specially designed airtight helmet	16,000

Ο συντελεστής προστασίας για εσωτερική έκθεση (PF) είναι ένας δείκτης του βαθμού προστασίας που παρέχεται από τον ατομικό εξοπλισμό για το τρίτιο. Ο συντελεστής δίνεται από τη σχέση (8), και εκφράζει το λόγο της συγκέντρωσης τριτίου στον εισπνεόμενο αέρα ως προς τη συγκέντρωση τριτίου στο περιβάλλον εργασίας.

$$PF = \frac{\text{Συγκέντρωση εισπνεόμενου αέρα σε ραδιονουκλινία}}{\text{Συγκέντρωση αέρα περιβάλλοντος σε ραδιονουκλινία}} \quad (8)$$

Για την επιλογή του κατάλληλου προστατευτικού εξοπλισμού από την έκθεση σε τρίτιο στις διάφορες περιοχές του DEMO λαμβάνεται υπόψη η συγκέντρωση τριτίου κάθε περιοχής (confinement class) και ο συντελεστής προστασίας για κάθε τύπο εξοπλισμού (Πίνακας 6). Οι τιμές του συντελεστή προστασίας κυμαίνονται από 1 έως 16,000 ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του προστατευτικού εξοπλισμού [35]. Οι αυτόνομοι αναπνευστήρες ή οι στολές υπό πίεση με παροχή αέρα συνήθως επαρκούν για τον, στην πράξη, μηδενισμό της δόσης από εσωτερική έκθεση.

Ωστόσο, παρόλο που οι προστατευτικές στολές θα περιορίσουν ή ακόμη και θα αποτρέψουν εντελώς την εσωτερική έκθεση, η χρήση προστατευτικού εξοπλισμού θα αυξήσει τη δόση λόγω εξωτερικής έκθεσης λόγω του μεγαλύτερου χρόνου που απαιτείται για παραμονή στην περιοχή των εργασιών. Ως εκ τούτου, ορίζεται ένας παράγοντας επιδείνωσης (AF) που λαμβάνει υπόψη την αύξηση της εξωτερικής δόσης που δέχεται ένας εργαζόμενος για μια δεδομένη δραστηριότητα συντήρησης, λόγω της χρήσης προστατευτικών μέσων για το τρίτιο [23]. Ο παράγοντας AF εκφράζεται συνήθως ως ποσοστό %. Η χρονική προσαύξηση σε κάθε εργασία συντήρησης λόγω της χρήσης προστατευτικού εξοπλισμού εκφράζεται από τη σχέση:

$$t_{\text{with PPE}} = t_{\text{without PPE}} * (1 + AF) \quad (9)$$

Για παράδειγμα, AF=20% σημαίνει ότι η χρήση μέσων προστασιών έναντι του τριτίου αυξάνει τον χρόνο για την εκτέλεση μιας δραστηριότητας συντήρησης κατά 20%.

5.6 Μεθοδολογία υπολογισμού συλλογικής επαγγελματικής έκθεσης

Η επαγγελματική έκθεση σε ακτινοβολία (Occupational Radiation Exposure, ORE) αναφέρεται στην έκθεση των εργαζομένων σε μια εγκατάσταση στην ιονίζουσα ακτινοβολία. Στο πλαίσιο αυτό, σαν δείκτες απόδοσης στην ακτινοπροστασία θα μπορούσαν να ληφθούν υπόψη τόσο οι ατομικές όσο και οι συλλογικές δόσεις του προσωπικού, καθώς η πρώτη αντιπροσωπεύει δείκτη του ατομικού κινδύνου και η δεύτερη μπορεί να θεωρηθεί ως παράμετρος που αντιπροσωπεύει την συνολική απόδοση ακτινοπροστασίας μιας εγκατάστασης.

Η εκτίμηση της επιχειρησιακής ραδιολογικής έκθεσης (Operational Radiation Exposure, ORE) βασίζεται στον τύπο των εργασιών συντήρησης, τις διαδικασίες συντήρησης, τους τύπους δραστηριοτήτων (χειρών ή εξ αποστάσεως), τη ζώνη ακτινοβολίας, τον αριθμό εργαζομένων, την συχνότητα των εργασιών, τα μέτρα ατομικής προστασίας, τους προστατευτικούς και επιβαρυντικούς παράγοντες και τον αριθμό των συντηρήσιμων στοιχείων και μονάδων.

Για κάθε δραστηριότητα συντήρησης, τα ακόλουθα δεδομένα πρέπει να εκτιμηθούν προκειμένου να αξιολογηθεί η συλλογική δόση:

1. Αναμενόμενος ρυθμός εξωτερικής και εσωτερικής ενεργού δόσης, DR ($\mu\text{Sv/h}$)
2. Προβλεπόμενος χρόνος που απαιτείται για την πρακτική ή δραστηριότητα, TR (h)
3. Αναμενόμενος αριθμός εμπλεκόμενων ατόμων, PP
4. Αναμενόμενη συχνότητα χρήσης, FY (1/έτος)
5. Συντελεστής επιδείνωσης για τη χρήση μέσω ατομικής προστασίας (PPE), AF (%)
6. Συντελεστής προστασίας για τη χρήση μέσω ατομικής προστασίας (PPE), PF
7. Αριθμός Στοιχείων ανά Μονάδα, NE
8. Αριθμός λειτουργικών μονάδων, NU

Η συλλογική δόση για μια εργασία συντήρησης υπολογίζεται από την κάτωθι σχέση:

$$CD = DR * FY * TR * PP * PF * (1 + AF) * NE * NU \quad (10)$$

Αντιστοίχως, η συλλογική δόση συντήρησης για ένα σύστημα υπολογίζεται από την σχέση:

$$CDI_{system} = \sum CD_i \quad (11)$$

Τελικά, ο Δείκτης Συλλογικής Δόσης (CDI) για τις συνολικές δραστηριότητες συντήρησης στο DEMO θα είναι η άθροιση των Συλλογικών Δόσεων όλων των συστημάτων και στοιχείων που περιλαμβάνονται στο πρόγραμμα συντήρησης.

6. Αποτελέσματα

6.1 Ενδεικτικά αποτελέσματα

Ο Πίνακας 7 παρουσιάζει μια ενδεικτική ανάλυση της επιχειρησιακής ραδιολογική έκθεσης (ORE) κατά τις εργασίες συντήρησης του DEMO. Σε αυτήν την ανάλυση, λαμβάνονται υπόψη, στους διαφορετικούς θαλάμους ή περιοχές του DEMO, οι καθορισμένες ζώνες ακτινοβολίας, οι συγκεντρώσεις τριτίου και οι αρχικές εκτιμήσεις των ρυθμών δόσης από εσωτερική και εξωτερική έκθεση.

Τονίζεται ότι οι ακριβείς υπολογισμοί της επιχειρησιακής ραδιολογικής έκθεσης απαιτούν λεπτομερή γνώση των οργάνων, εξαρτημάτων και συστημάτων που πρέπει να συντηρούνται σε κάθε θάλαμο ή περιοχή, των διαδικασιών συντήρησης, του αριθμού των στοιχείων και μονάδων που πρέπει να συντηρηθούν, των χρόνων που απαιτούνται για τις δραστηριότητες συντήρησης, του αριθμού των ατόμων που εμπλέκονται, της συχνότητας εργασίας, των μέσων ατομικής προστασίας (PPE) που χρησιμοποιούνται καθώς και των τιμών των προστατευτικών και επιβαρυντικών παραγόντων. Επομένως, στο παρόν στάδιο εννοιολογικού σχεδιασμού του DEMO, λόγω της έλλειψης αρκετών εκ των παραπάνω δεδομένων, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί ακριβής εκτίμηση της επιχειρησιακής ραδιολογικής έκθεσης (ORE).

Ο χρόνος που απαιτείται για τις διάφορες εργασίες συντήρησης δεν μπορεί επίσης να καθοριστεί σε αυτό το στάδιο του σχεδιασμού του DEMO, καθώς δεν έχει εκπονηθεί ακόμη ένα λεπτομερές σχέδιο συντήρησης συστημάτων και μπορεί να γίνει μόνο μια προκαταρκτική εκτίμηση της τάξης μεγέθους του απαιτούμενου χρόνου.

Ωστόσο, για τον προσδιορισμό των προσβάσιμων για τους εργαζόμενους χώρων για εργασίες προγραμματισμένης συντήρησης και στους οποίους οι κίνδυνοι εσωτερικής και εξωτερικής έκθεσης είναι οι υψηλότεροι, αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν εκτιμήσεις επιχειρησιακής ραδιολογική έκθεσης (ORE) χρησιμοποιώντας ενδεικτικές δραστηριότητες και τιμές. Αυτές οι εκτιμήσεις βασίζονται στην εμπειρία που αποκτήθηκε στο JET και σε άλλες πυρηνικές εγκαταστάσεις. Βάσει αυτής της εμπειρίας, έχουν υπολογιστεί οι προκαταρκτικοί χρόνοι για εργασίες συντήρησης σε ορισμένα συστήματα στο DEMO.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 7, η συλλογική δόση στο προσωπικό του DEMO λόγω των προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης υπολογίστηκε σε 2,543 p·mSv/y. Αυτή η τιμή είναι σημαντικά υψηλότερη από τον στόχο σχεδιασμού του DEMO και το όριο που θέτει για τη συλλογική δόση, που είναι 700 p·mSv/y. Ωστόσο, αυτή η υψηλή τιμή συλλογική δόσης οφείλεται κυρίως στις δραστηριότητες συντήρησης που εκτελούνται σε δύο συγκεκριμένους χώρους, δηλαδή στο θάλαμο 11-B4-LL (δεξαμενή αποστράγγισης συστήματος ψύξης) και στο θάλαμο 11-L2-PC (θάλαμος βαλβίδας υπερχειλίσης). Το άθροισμα των συλλογικών δόσεων για τις εργασίες συντήρησης μόνο σε αυτούς τους δύο θαλάμους υπολογίστηκε στα 2,161.208 p·mSv/y. Η συνολική συλλογική δόση για τις δραστηριότητες συντήρησης, εξαιρουμένων των αιθουσών 11-B4-LL και 11-L2-PC, υπολογίστηκε σε 382.04 p·mSv/y, η οποία είναι περίπου 7 φορές χαμηλότερη από τη συλλογική δόση συμπεριλαμβάνοντας τους παραπάνω δύο θαλάμους και επιπλέον είναι κάτω από τον στόχο σχεδιασμού του DEMO για την επιχειρησιακή ραδιολογική έκθεση (ORE) των 700 p·mSv/y.

Πίνακας 7. Ενδεικτικά αποτελέσματα επαγγελματικής έκθεσης (ORE) [23]

#	Room	Description	Zone	Confinement Class	Ext. Dose Rate (μSv/h)	Int. Dose Rate (μSv/h)	PF	AF (%)	Freq. (y-1)	pp	Hands on time (h)	Collective dose (p·m·Sv/y)	Collective dose (p·mSv/y)
												Hands-on	Remote Handling
1	11-L3-PHTS	Primary heat transfer system (L3)	Yellow	C4	100	40000	1000	50	1	1	70	14700	0
2	11-L4-PHTS	Primary heat transfer system (L4)	Yellow	C4	100	40000	1000	50	1	1	70	14700	0
3	11-L3-UP	Upper pipe chase (L3)	Yellow	C4	100	40000	1000	50	1	1	65	13650	0
4	11-L2-CRY	Cryogenic auxiliaries cold box (L2)	Yellow #	C2	100	10	100	20	1	1	65	7808	7808
5	11-L1-NBI	Neutral Beam Injection cell (L1)	Yellow	C4	100	40000	1000	50	1	1	35	7350	0
6	11-B2-PC	Port cell (B2)	Yellow	C4	100	40000	1000	50	1	1	65	13650	0
7	11-L1-PC	Port cell (L1)	Yellow	C4	100	40000	1000	50	1	1	65	13650	0
8	11-B3-LP	Lower pipe chase (B3)	Yellow	C4	100	40000	1000	50	1	1	65	13650	0
9	11-B4-DT	Coolant expansion volume drain tanks (B4)	Yellow	C4	100	40000	1000	50	1	1	65	13650	0
10	11-B4-LL	PbLi central cylindrical drain	Orange	C3	20000	10	100	20	1	1	65	1560008	0

		tank (B4)											
11	11-B2-PS	8 port cell vertical shafts (B2 to L2)	Yellow	C2	100	10	100	20	1	1	65	7808	7808
12	11-B1-V	2 cryo-distribution vertical shafts (B1 to B3)	Yellow	C2	100	10	100	20	1	1	65	7808	7808
13	11-B4-H	4 HVAC vertical shafts (B4 to L4)	Yellow	C2	100	10	100	20	1	1	65	7808	7808
14	11-B4-S	4 vertical corner shafts for services (B4 to L4)	Yellow	C2	100	10	100	20	1	1	65	7808	7808
15	11-B4-GA	Gallery at magnet feeder basement level (B4)	Yellow	C2	100	10	100	20	1	1	65	7808	7808
16	11-B3-GA	Gallery at lower pipe chase basement level (B3)	Yellow	C2	100	10	100	20	1	1	65	7808	7808
17	11-B2-GA	Gallery at basement lower port divertor level (B2)	Yellow	C2	100	10	100	20	1	1	65	7808	7808
18	11-B1-GA	Gallery at divertor Q level (B1)	Yellow	C2	100	10	100	20	1	1	65	7808	7808
19	11-L1-GA	Gallery at equatorial port level (L1)	Yellow	C2	100	10	100	20	1	1	65	7808	7808
20	11-L2-GA	Gallery at magnet feeder upper port level (L2)	Yellow	C2	100	10	100	20	1	1	65	7808	7808

21	11-L3-GA	Gallery at upper pipe chase level (L3)	Yellow	C2	100	10	100	20	1	1	65	7808	7808
22	11-L4-GA	Gallery at maintenance hall level (L4 & L5)	Yellow	C2	100	10	100	20	1	1	65	7808	7808
23	11-L3-CU01	Cubicle room #1 at upper level (L3)	Yellow	C2	100	10	100	20	1	1	65	7808	7808
24	11-L3-CU02	Cubicle room #2 at upper level (L3)	Yellow	C2	100	10	100	20	1	1	65	7808	7808
25	11-L3-LL01	Aux. of LiPb loop (pump, hx, heaters, purification, etc) (L3)	Yellow	C3	100	10	100	20	1	1	65	7808	0
26	11-L3-LL02	Aux. of LiPb loop (pump, hx, heaters, purification, etc) (L3)	Yellow	C3	100	10	100	20	1	1	65	7808	0
27	11-L4-DO	Dome Upper part of the building with cranes (L4)	Yellow	C2	100	10	100	20	1	1	65	7808	7808
28	11-L2-PC (Rupt)	Rupture disks port cell (L2)	Orange	C4	20000	40000	1000	50	1	1	20	601200	0
29	11-B3-VA01	Vacuum pumping room (B3)	Yellow #	C4	100	40000	1000	50	1	1	65	13650	0
30	11-B3-VA02	Vacuum pumping room (B3)	Yellow #	C4	100	40000	1000	50	1	1	65	13650	0
31	11-B3-VA03	Vacuum pumping room (B3)	Yellow #	C4	100	40000	1000	50	1	1	65	13650	0

32	11-B3-VA04	Vacuum pumping room (B3)	Yellow #	C4	100	40000	1000	50	1	1	65	13650	0
33	11-B3-VA05	Vacuum pumping room (B3)	Yellow #	C4	100	40000	1000	50	1	1	65	13650	0
34	11-B3-VA06	Vacuum pumping room (B3)	Yellow #	C4	100	40000	1000	50	1	1	65	13650	0
35	11-B3-VA07	Vacuum pumping room (B3)	Yellow #	C4	100	40000	1000	50	1	1	65	13650	0
36	11-B3-VA08	Vacuum pumping room (B3)	Yellow #	C4	100	40000	1000	50	1	1	65	13650	0
37	11-B3-VA09	Vacuum pumping room (B3)	Yellow #	C4	100	40000	1000	50	1	1	65	13650	0
38	11-B3-VA10	Vacuum pumping room (B3)	Yellow #	C4	100	40000	1000	50	1	1	65	13650	0
											Sum (All Rooms) =	2.543.248	124.925
											Sum (excluding 11-L2-PC and 11-B4_LL) =	382.040	

6.2 Παραδοχές και περιορισμοί

Η προστασία του προσωπικού από την έκθεση σε τρίτιο είναι ένα από τα κύρια ζητήματα για την ραδιολογική ασφάλεια στην εγκατάσταση DEMO. Ο υπολογισμός της εσωτερικής έκθεσης βασίστηκε σε προσεγγίσεις και υποθέσεις για τη ρύπανση με τρίτιο των περιοχών του DEMO με βάση τον χαρακτηρισμό τους ως προς τα επίπεδα δυνητικής συγκέντρωσης τρίτιου στους χώρους αυτούς. Οι χώροι με υψηλότερο κίνδυνο εσωτερικής ρύπανσης είναι οι θάλαμοι του Πρωτεύοντος Συστήματος Μεταφοράς Θερμότητας (PHTS), ο θάλαμος 11-L3-UP (Upper pipe chase), 11-L1-NBI (NBI cell), 11-L1-PC(port cell), 11-B4-DT (drain tank), οι θάλαμοι 11-B3-VA1-11-B3-VA10 (θάλαμοι αντλιών κενού) και ο θάλαμος 11-B4-LL στον οποίο βρίσκονται τα βοηθητικά συστήματα λιθίου. Σε αυτούς τους χώρους ο ρυθμός δόσης λόγω εσωτερικής έκθεσης μπορεί να είναι υψηλότερος από τον ρυθμό εξωτερικής έκθεσης έως και οκτώ φορές εάν δεν χρησιμοποιούνται τα κατάλληλα μέσα ατομικής προστασίας (PPE) για το τρίτιο. Ωστόσο, η χρήση κατάλληλων μέσων ατομικής προστασίας, δηλαδή PPE με δείκτη 1000 ή και μεγαλύτερο, μειώνει δραστικά την εσωτερική έκθεση στο προσωπικό και η εσωτερική έκθεση γίνεται λιγότερο από 1% σε σύγκριση με το ρυθμό εξωτερικής δόσης.

Στο κεφάλαιο 4.5 παρέχεται αναλυτικός κατάλογος των μέσων ατομικής προστασίας που χρησιμοποιούνται στην πυρηνική βιομηχανία και των αντίστοιχων συντελεστών προστασίας τους. Σε αυτή την εργασία, σε περιοχές που χαρακτηρίζονται με επίπεδα συγκέντρωσης C3 ή C4, θεωρήθηκε ότι τα μέσα ατομικής προστασίας παρέχουν συντελεστή προστασίας 1000, υποδηλώνοντας τη χρήση πλήρους προστατευτικής στολής με αναπνευστήρα. Ωστόσο, η χρήση προστατευτικής στολής θα αυξήσει τη δόση λόγω εξωτερικής έκθεσης λόγω του μεγαλύτερου χρόνου που απαιτείται για την τέλεση των εργασιών συντήρησης. Σε αυτή τη μελέτη, υποτέθηκε ότι η χρήση PPE θα έχει ως αποτέλεσμα επιβαρυντικό παράγοντα AF=50% σε περιοχές κατηγορίας C3 και C4 και AF=20% σε περιοχές κατηγορίας C2.

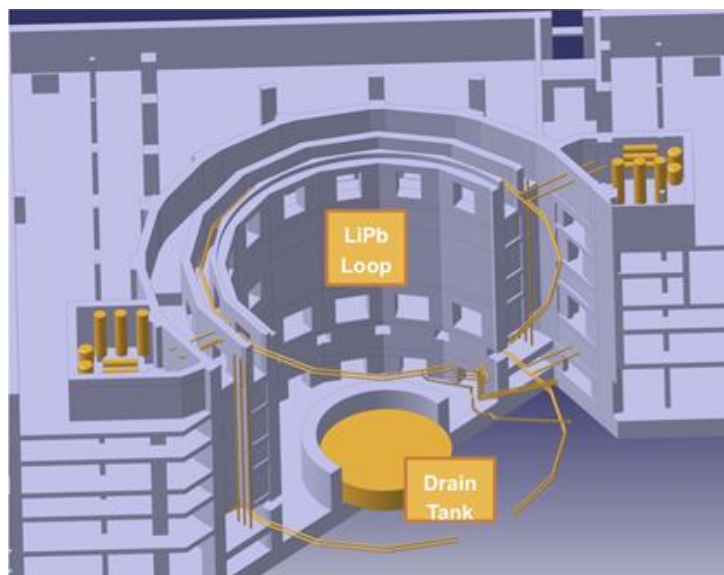
Επειδή δεν υπάρχει διαθέσιμο λεπτομερές σχέδιο συντήρησης του DEMO, υποτέθηκε συχνότητα συντήρησης 1 y^{-1} (μία φορά το χρόνο) για όλα τα εξαρτήματα του tokamak. Ωστόσο, αναμένεται ότι τα κρίσιμα όργανα και εξαρτήματα θα πρέπει να συντηρούνται πιο συχνά, δηλαδή με συχνότητα 2 y^{-1} (2 φορές το χρόνο) ή με ακόμη μεγαλύτερη συχνότητα, ενώ τα λιγότερο κρίσιμα εξαρτήματα μπορεί να συντηρούνται λιγότερο συχνά. Ο αριθμός στοιχείων ανά μονάδα (NE) και ο αριθμός λειτουργικών μονάδων θεωρήθηκαν ένα (NU=1) λόγω έλλειψης πληροφοριών.

Επιπλέον, υποτέθηκε ότι οι εργασίες συντήρησης θα εκτελούνται από έναν εργαζόμενο (pp=1) με παράλληλη απομακρυσμένη επίβλεψη και υποστήριξη. Ωστόσο, οι εργασίες συντήρησης σε ορισμένα εξαρτήματα του DEMO ενδέχεται να απαιτούν τη συμμετοχή περισσότερων του ενός ατόμων για να εκτελεστούν. Ο χρόνος συντήρησης για συστήματα και εξαρτήματα είναι προς το παρόν άγνωστος. Χρόνοι για διαδικασίες συντήρησης για ορισμένα από τα συστήματα του DEMO παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Οι ενδεικτικοί χρόνοι συντήρησης που λαμβάνονται από αυτές τις αναφορές χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς ORE που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.

6.3 Θάλαμοι 11-B4-LI, 11-L2-PC

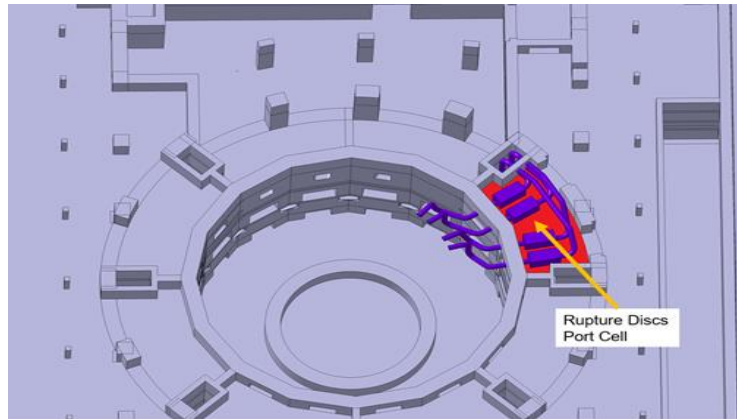
Οι αίθουσες του συστήματος μολύβδου-λιθίου (11-L3-LL01 και 11-L3-LL02) βρίσκονται στο επίπεδο L3 στο κτήριο tokamak (Σχήμα 15). Σε αυτούς τους χώρους βρίσκονται όλα τα βοηθητικά εξαρτήματα του βρόχου μολύβδου-λιθίου (PbLi), για παράδειγμα η αντλία, ο εναλλάκτης θερμότητας, τα συστήματα καθαρισμού λιθίου κ.λπ.. Ο αναμενόμενος ρυθμός δόσης γύρω από ορισμένα από τα σχετικά εξαρτήματα και συστήματα των βρόχων PbLi στην περιοχή (11-L3-LL

Gallery) και στην περιοχή της δεξαμενής PbLi (11-B4-LL PIT), όπου οι πρακτικές δραστηριότητες συντήρησης αναμένεται να εκτελεστούν, δίνεται στον Πίνακα 7 και έχει υπολογιστεί στην τεχνική έκθεση [43]. Η υψηλή ακτινοβολία γάμμα από τα προϊόντα ενεργοποίησης (Activation Corrosion Products) και η έκλυση τριτίου είναι τα κύρια προβλήματα κατά τις εργασίες συντήρησης στο σύστημα αυτό. Λόγω του αναμενόμενου υψηλού ρυθμού δόσης, στην φάση της συντήρησης η ζώνη ακτινοβολίας, βάσει της κατηγοριοποίησης που αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 4.4, θα πρέπει να είναι πορτοκαλί (<100 mSv/h) ενώ κατά τη φάση λειτουργίας θεωρείται κόκκινη (>100 mSv/h). Υπενθυμίζεται ότι βάσει των κανονισμών ακτινοπροστασίας για πυρηνικές εγκαταστάσεις απαγορεύεται αυστηρά η πρόσβαση προσωπικού σε ζώνες ακτινοβολίας πορτοκαλί και κόκκινες. Ωστόσο, ο χαρακτηρισμός αυτής της περιοχής δεν είναι πλήρης και η ζώνη ακτινοβολίας ενδέχεται να επαναξιολογηθεί.



Σχήμα 15. Σύστημα PbLi, δεξαμενή αποστράγγισης και βοηθητικά συστήματα [23].

Ο θάλαμος Rapture Disk room Cell (11-L2-PC) βρίσκεται στο επίπεδο L2 του κτηρίου tokamak (Σχήμα 16). Ο τελικός χαρακτηρισμός της ζώνης ακτινοβολίας για την περιοχή αυτή δεν είναι διαθέσιμος προς το παρόν. Όμως, εξαιτίας του υψηλού αναμενόμενου ρυθμού εξωτερικής δόσης, σύμφωνα με τα κριτήρια ταξινόμησης ζωνών ακτινοβολίας, σε επίπεδο λειτουργίας 1 (συντήρηση), η ζώνη ακτινοβολίας αναμένεται να είναι πορτοκαλί (<100 mSv/h). Ωστόσο, μετά από λεπτομερείς υπολογισμούς, η ταξινόμηση αυτού του δωματίου μπορεί επίσης να επαναξιολογηθεί.



Σχήμα 16. Απεικόνιση του rupture disk room στο κτήριο tokamak [23]

6.4 Αξιοποίηση αυτοματοποιημένων συστημάτων τηλεχειρισμού

Δεδομένου ότι οι ρυθμοί δόσης καθώς και η συγκέντρωση τριτίου στον αέρα στις περιοχές των port cells και του ισημερινού επιπέδου θα είναι πολύ υψηλοί για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την διακοπή λειτουργίας του tokamak, έχει προταθεί η συντήρηση στις περιοχές των port cells να πραγματοποιείται με χρήση πλήρως αυτοματοποιημένου ρομποτικού συστήματος. Επιπλέον, δεδομένου ότι σύμφωνα με την αρχή ALARA, η συντήρηση με φυσική παρουσία δεν είναι επιθυμητή, θεωρείται ότι η χρήση συστημάτων τηλεχειρισμού θα εφαρμοστεί σε όλους τους θαλάμους ή περιοχές με σημαντική συγκέντρωση τριτίου (κατηγορίες συγκέντρωσης C3 και C4) και επίπεδα εξωτερικής ακτινοβολίας πάνω από $100 \mu\text{Sv/h}$ (κίτρινη ζώνη). Σε αυτές τις περιπτώσεις, θα εφαρμοστούν ρομποτικά συστήματα και αυτοματοποιημένες διαδικασίες. Η χειρωνακτική εργασία συντήρησης μπορεί επίσης να δικαιολογηθεί κατά τη διάρκεια, για παράδειγμα, απρογραμμάτιστων δραστηριοτήτων, όταν η εργασία με φυσική παρουσία μειώνει σημαντικά το χρόνο διακοπής λειτουργίας του αντιδραστήρα, και σε σπάνιες εργασίες συντήρησης χαμηλής δόσης, που διαφορετικά θα απαιτούσαν περίπλοκα και δαπανηρά απομακρυσμένα συστήματα, χωρίς να επιβαρύνουν σημαντικά τον εργαζόμενο ή τα επίπεδα συλλογικής δόσης του προσωπικού. Στον Πίνακα 7 δίνεται ενδεικτική ανάλυση επιχειρησιακής ραδιολογικής έκθεσης (ORE) για εργασίες συντήρησης στο DEMO με την υπόθεση ότι όλες οι εργασίες συντήρησης σε χώρους που ορίζονται ως ζώνες κίτρινης ακτινοβολίας και άνω και κατηγορίες περιορισμού C3 ή C4, εκτελούνται εξ αποστάσεως χρησιμοποιώντας πλήρως αυτοματοποιημένα ρομποτικά συστήματα. Σε αυτή την περίπτωση, ο χρόνος συντήρησης θεωρήθηκε μηδέν. Από τον Πίνακα 7 μπορεί να φανεί ότι η συλλογική δόση στο προσωπικό του DEMO λόγω των διαδικασιών συντήρησης ρουτίνας στην περίπτωση της χρήσης ρομποτικών διαδικασιών συντήρησης υπολογίστηκε στα $124.9 \text{ p}\cdot\text{mSv}$ ετησίως. Αυτή είναι τιμή σημαντικά χαμηλότερη από τον στόχο σχεδιασμού DEMO για το ORE, που είναι $700 \text{ p}\cdot\text{mSv/y}$.

Στον Πίνακα 8, συνοψίζονται τα τελικά αποτελέσματα συλλογικής δόσης στο προσωπικό του DEMO που υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία για την εκτέλεση των εργασιών με φυσική παρουσία του προσωπικού σε όλους τους θαλάμους, πλην των θαλάμων 11-B4-LI, 11-L2-PC και με πλήρως αυτοματοποιημένα ρομποτικά συστήματα στις περιοχές υψηλότερης δόσης.

Πίνακας 8. Αποτελέσματα συλλογικής δόσης για εργασίες συντήρησης.

	Συλλογική δόση (p.mSv/y)
Σε ολόκληρο το κτήριο Tokamak	2,543.2
Σε ολόκληρο το κτήριο Tokamak πλην των θαλάμων 11-B4-LI , 11-L2-PC	382.4
Μόνο στους χώρους κατηγορίας C1 η C2	124.9

7. Γενική συζήτηση - Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο 7 θα συζητηθούν τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας και οι βασικές παράμετροι που τα επηρεάζουν (χρόνος συντήρησης, αριθμός εργαζομένων, συντελεστές προστασίας και επιδείνωσης κλπ).

Ο στόχος σχεδιασμού για την επιχειρησιακή ραδιολογική έκθεση (Operational Radiation Exposure, ORE) του αντιδραστήρα DEMO είναι η συλλογική δόση των εργαζομένων να είναι μικρότερη από 700 p·mSv/y. Στο κεφάλαιο 6 πραγματοποιήθηκαν ενδεικτικοί υπολογισμοί συλλογικής δόσης για δραστηριότητες προγραμματισμένης συντήρησης του DEMO. Συνολικά στο κτήριο tokamak η συλλογική δόση από εργασίες συντήρησης με φυσική παρουσία σε όλα τα τμήματα (θαλάμους) του κτηρίου υπολογίστηκε σε 2543,248 p·mSv/y. Η τιμή αυτή είναι πέντε φορές μεγαλύτερη από το όριο των 700 p·mSv/y. Παρατηρείται όμως -με βάση τις τιμές του πίνακα 7- ότι η τιμή αυτή εξαρτάται κυρίως από τη δόση που λαμβάνει το προσωπικό σε δύο συγκεκριμένους χώρους, το θάλαμο rupture disk (11-L2-PC) και το θάλαμο των συστημάτων μολύβδου-λιθίου (11-B4-LL). Αυτό διότι η εξωτερική έκθεση σε αυτούς τους δυο θαλάμους είναι μεγάλη λόγω της εγγύτητας του θαλάμου στον θάλαμο κενού (machine pit) (σχήμα 15,16) και των προϊόντων νετρονικής ενεργοποίησης στο θάλαμο των συστημάτων ψύξης μολύβδου-λιθίου (11-B4-LL), αντίστοιχα.

Συνεπώς, αν εξαιρεθούν αυτοί οι δύο θάλαμοι από τις εργασίες συντήρησης που πραγματοποιούνται με φυσική παρουσία, η τιμή της συλλογικής δόσης είναι 382.4 p·mSv/y, 50% περίπου χαμηλότερα από την τιμή-στόχο των 700 p·mSv/y. Στην περίπτωση ανάπτυξης και χρήσης αυτοματοποιημένων συστημάτων τηλεχειρισμού σε όλες τις περιοχές κατηγορίας συγκέντρωσης τρίτιου C3 και C4, η συλλογική δόση μειώνεται περαιτέρω σε 124.925 p·mSv/y, τιμή 5 φορές μικρότερη από το όριο.

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την συλλογική δόση κατά τις εργασίες συντήρησης, όπως παρουσιάστηκε και στο κεφάλαιο 5.6, είναι ο χρόνος και η συχνότητα συντήρησης, ο αριθμός εργαζομένων που θα εμπλακούν, οι συντελεστές προστασίας και επιδείνωσης και οι ρυθμοί εξωτερικής και εσωτερικής έκθεσης. Η συλλογική δόση σε κάθε τμήμα του κτηρίου tokamak αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση του αριθμού των εργαζομένων και του χρόνου και της συχνότητας συντήρησης. Ωστόσο, διαμοιρασμός των εργασιών σε περισσότερους εργαζόμενους μειώνει την ατομική δόση.

Η συχνότητα και ο χρόνος προγραμματισμένης συντήρησης με φυσική παρουσία στους θαλάμους του tokamak, βάσει της εμπειρίας από την λειτουργία του JET και τον σχεδιασμό για το ITER, ορίστηκαν μία φορά το χρόνο με διάρκεια 65 εργατοώρες (p·h). Για κρίσιμα όργανα και εξαρτήματα που θα απαιτούν τακτικότερη συντήρηση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός χειρωνακτικής συντήρησης για τις απολύτως αναγκαίες εργασίες και αυτοματοποιημένης μέσω συστημάτων τηλεχειρισμού ώστε να ελαχιστοποιηθεί η συχνότητα και ο χρόνος της ανθρώπινης παρουσίας .

Σε όλους τους χώρους του κτηρίου tokamak, με εξαίρεσή το θάλαμο rupture disk (11-L2-PC) και το θάλαμο των συστημάτων μολύβδου-λιθίου (11-B4-LL), ο ρυθμός εξωτερικής έκθεσης έχει οριστεί σε 100 μSv/h με βάση πρόσφατες μελέτες [21]. Αντίστοιχα οι ρυθμοί εσωτερικής έκθεσης

υπολογίστηκαν με βάση την κατηγορία συγκέντρωσης τριτίου του κάθε χώρου (Πίνακες 3, 6). Έτσι οι ρυθμοί εσωτερικής έκθεσης σε περιοχές C1, C2 αντιστοιχούν σε 10 $\mu\text{Sv/h}$ ενώ σε C3 και C4 αντιστοιχούν σε 40,000 $\mu\text{Sv/h}$. Συνεπώς, στους χώρους C3, C4 κύριος επιβαρυντικός παράγοντας είναι η εσωτερική έκθεση ενώ στους χώρους C2, C1 είναι η εξωτερική έκθεση. Καθώς εργασίες συντήρησης με φυσική παρουσία θα διεξαχθούν μόνο στους χώρους C1, C2 διαπιστώνεται ότι εφόσον εκεί ο ρυθμός εξωτερικής έκθεσης είναι δεκαπλάσιος του ρυθμού εσωτερικής έκθεσης, η εξωτερική έκθεση αποτελεί τον κύριο επιβαρυντικό παράγοντα στην διαμόρφωση της συλλογικής δόσης.

Οι τιμές του παράγοντα προστασίας (PF) συσχετίζονται με τιμές του παράγοντα επιδείνωσης (AF). Με βάση μελέτες ακτινοπροστασίας από πυρηνικούς αντιδραστήρες σχάσης και την εμπειρία που αποκτήθηκε από τον ερευνητικό πυρηνικό αντιδραστήρα του Δημόκριτου κατά την περίοδο λειτουργίας του, συσχετίστηκαν οι δυο παράγοντες για συγκεκριμένες τιμές τους και οι τιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστούν οι αντίστοιχες συλλογικές δόσεις (Πίνακας 9). Απώτερος στόχος είναι ο προσδιορισμός του κατάλληλου συντελεστή προστασίας (PF) για προσωπικό που θα εισέλθει στις C2 περιοχές για εργασίες συντήρησης, ο οποίος θα μεγιστοποιεί την προστασία από εσωτερική έκθεση και θα ελαχιστοποιεί την επιβάρυνση εξαιτίας της επιπλέον εξωτερικής έκθεσης. Η επιλογή του κατάλληλου συντελεστή προστασίας (PF) πρέπει επίσης να εναρμονίζεται με το νομοθετικό πλαίσιο για τις πυρηνικές εγκαταστάσεις το οποίο προβλέπει προληπτικά μέτρα ατομικής προστασίας για καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης. Για αυτό το λόγο πρέπει να ληφθεί υπόψη η συγκέντρωση τριτίου στις C2 περιοχές από μη προγραμματισμένα γεγονότα (πχ διαρροή σωληνώσεων) ή έκτακτες καταστάσεις ατυχήματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις η εναέρια συγκέντρωση τριτίου μπορεί να φτάσει μέχρι και 80 DAC που ισοδυναμεί με ρυθμό δόσης 800 $\mu\text{Sv/h}$.

Πίνακας 9. Μεταβολή της συλλογικής δόσης για διαφορετικές τιμές των παραγόντων προστασίας και επιδείνωσης για εσωτερική έκθεση 10 $\mu\text{Sv/h}$ και 800 $\mu\text{Sv/h}$ αντίστοιχα.

Παράγοντας Προστασίας (PF)	Παράγοντας επιδείνωσης AF(%)	Συλλογική δόση ($\text{p}\cdot\text{mSv/y}$) για ρυθμό εσωτερικής έκθεσης 10 $\mu\text{Sv/h}$	Συλλογική δόση ($\text{p}\cdot\text{mSv/y}$) για ρυθμό εσωτερικής έκθεσης 800 $\mu\text{Sv/h}$
1	1	119.5	583.4
50	15	122.1	135.8
70	17	123.2	133.4
100	20	124.9	126.9
200	25	129.4	132.2
300	30	133.9	145.9
400	35	138.4	140.3
500	40	143.6	144.4

Από τον Πίνακα 9 παρατηρείται ότι η συλλογική δόση για ρυθμό εσωτερικής έκθεσης 10 $\mu\text{Sv/h}$ αυξάνεται με την αύξηση των τιμών των παραγόντων προστασίας και επιδείνωσης. Αυτό συμβαίνει διότι σε περιοχές με τόσο μικρή έκθεση στο τρίτιο η επιλογή ατομικού εξοπλισμού με μεγάλο συντελεστή προστασίας (PF) δρα μόνο επιβαρυντικά στον εργαζόμενο αυξάνοντας τον χρόνο τέλεσης της εργασίας συντήρησης και την έκθεση στην εξωτερική ακτινοβολία. Όμως, στην περίπτωση που ο ρυθμός εσωτερικής έκθεσης είναι 800 $\mu\text{Sv/h}$, εξαιτίας, για παράδειγμα, συμβάντος διαρροής τριτίου, παρατηρείται ότι η συλλογική δόση ελαχιστοποιείται για παράγοντα

προστασίας 100 (PF=100). Δηλαδή για μικρότερες τιμές η εσωτερική έκθεση επιβαρύνει περισσότερο τον εργαζόμενο σε σχέση με την εξωτερική.

Συνεπώς, με βάση τις παραπάνω διαπιστώσεις κρίνεται προτείνεται στις C2 περιοχές του DEMO να χρησιμοποιηθεί εξοπλισμός με παράγοντα προστασίας PF=100. Μια τέτοια τιμή είναι εναρμονισμένη με το νομοθετικό πλαίσιο για πυρηνικές εγκαταστάσεις διότι προστατεύει επαρκώς τους εργαζομένους από τυχόν απρογραμμάτιστη διαρροή τριτίου στους χώρους συντήρησης και ελαχιστοποιεί την επιβάρυνση από την εξωτερική έκθεση. Τέτοιος συντελεστής προστασίας αντιστοιχεί, βάσει του πίνακα 6, σε ολόσωμη στολή και συσκευή παροχής οξυγόνου.

Τέλος, επισημαίνεται ότι στα τμήματα στα οποία η συντήρηση θα διεξαχθεί με φυσική παρουσία συνίσταται, πέρα από τον εξοπλισμό ατομικής προστασίας, να χρησιμοποιηθούν μεταφερόμενες θωρακίσεις για την βελτίωση ραδιολογικής προστασίας από την εξωτερική έκθεση (πχ προϊόντα νετρονικής ενεργοποίησης). Μια τέτοια λύση θα μπορούσαν να αποτελέσουν τα κινητά πετάσματα μολυβδού πάχους 5 cm.

Βιβλιογραφία

- [1] BP Statistical Review of World Energy, 71st Edition, 2022
- [2] United Nations / Framework Convention on Climate Change (2015) Adoption of the Paris Agreement, 21st Conference of the Parties, Paris: United Nations. AN OFFICIAL PUBLICATION
- [3] European Commission Communication (COM(2019) 640) "The European Green Deal"
- [4] European Commission Communication (COM(2018)773) "A Clean Planet for all: A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy"
- [5] Stram, B. N. (2016). "Key challenges to expanding renewable energy", *Energy Policy*, 96, 728-734 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.05.034>)
- [6] Ganea, T. (2022). "Benefits, Drawbacks, and the Path Forward for Nuclear Fission", *Technium*, 4, 71-75, (ISSN: 2668-778X)
- [7] Didier G. (2009). "Fusion for Energy: A new European organization for the development of fusion energy", *Fusion Engineering and Design*, 84, 138–142 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2009.01.041>)
- [8] Fleschner, F. (2024). "Nuclear fusion: European joint experiment achieves energy record", Max Planck Institute for Plasma Physics press release (https://www.ipp.mpg.de/5405892/jet_rekord_2024)
- [9] Donne, A.J.H. et al. (2019). "The European roadmap towards fusion electricity", EUROfusion, Programme Management Unit, 2-4 (<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0432>)
- [10] Wesson, J. (2004). "Tokamaks". Oxford Engineering Science Series (48) (3 ed.). Oxford: Clarendon press, 719, (ISBN 978-0-19-850922-6.)
- [11] Gliss, . et al. . (2022). "Integrated design of tokamak building concepts including ex-vessel maintenance", *Fusion Engineering and Design*, 177, 3-4, (<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2022.113068>)
- [12] Dstrozzi, F. (2020). "Lawson criterion", Wikipedia, (https://en.wikipedia.org/wiki/Lawson_criterion.)
- [13] Lawson, J. D. (1955). "Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor". *Proceedings of the Physical Society, Section B*, 70(1), 6–10. (<http://dx.doi.org/10.1088/0370-1301/70/1/30>)
- [14] Ongena, J.(2004). "Energy For Future Centuries Will Fusion Be An Inexhaustible, Safe And Clean Energy Source? ", *Fusion Science and Technology*, 45, 3-14 (<https://doi.org/10.13182/FST04-A464>)
- [15] Vitaly, S. (2001). "On the history of the research into controlled thermonuclear fusion" ,*Journal of the Russian Academy of Sciences*, 44, 835–865

- [16] S. Li, H. Jiang, Z. Ren, C. Xu - S. Li et. al. (2014) "Optimal Tracking for a Divergent-Type Parabolic PDE System in Current Profile Control", Abstract and Applied Analysis, Article ID 940965,5-8. (<https://doi.org/10.1155/2014/940965>)
- [17] Dan, L. (2007). "Chinese scientists conduct more tests on thermonuclear fusion reactor", China View, (http://news.xinhuanet.com/english/2007-01/15/content_5608276.htm)
- [18] Creely, A. J., Greenwald, M. J., Ballinger, S. B., Brunner, D.; Canik, J., Doody, J.; Fülöp, T., Garnier, D. T., Granetz, R., Gray, T. K.; Holland, C. (2020). "Overview of the SPARC tokamak". Journal of Plasma Physics. 86 (5), (ISSN 0022-3778.)
- [19] Sandri, S. (2022). "Occupational radiation exposure at the experimental fusion facilities". Radiation Protection, 29, No 200 EU Scientific Seminar 2022 -Radiological protection considerations for fusion reactors,29, (ISSN 2315-2826.)
- [20] Klinger. T. (2016). "A newcomer: the Wendelstein 7-X stellarator", Europhys. News 47, 35-38, (<https://doi.org/10.1051/epn/2016506>)
- [21] EUROfusion and Fusion for Energy
- [22] Bianca, A., (2022). "Technical Report SAE.ROOMBK.1 / Room Book Engineer 2022". EUROfusion,18, (IDM EFDA_D_2QLPBX)
- [23] Stamatelatos, I., (2023). " Occupational safety & editing GSSR Vol. 4" , EUROfusion-NCSR,7, (IDM SAE-S.02.01-T001-D009)
- [24] Porfiri, M.T., (2019). "Final Report on Deliverable PMI – 2.1-T021 DEMO Room Book". EUROfusion,10, (IDM 2NQF7B)
- [25] Flynn, F., (2020). "Maintenance Management Plan (Summary) For Plant Maintenance", EUROfusion Power Plant Physics and Technology Department, (IDM SAE-S.02.01-T001-D009)
- [26] Vale, A., (2020). " Maintenance Process Summary For Inter-Building Transport" , EUROfusion Power Plant Physics and Technology Department, 14 , (IDM EFDA_D_2MXL46)
- [27] Drumm, B., (2020). " Maintenance Process Summary For Upper and Lower Pipe Chases", EUROfusion Power Plant Physics and Technology Department, 15, (IDM EFDA_D_2P4WTR)
- [28] Drumm, B., (2020). "Maintenance Process Summary For Vertical Pipe Chutes", EUROfusion Power Plant Physics and Technology Department,12, (IDM EFDA_D_2P44VF)
- [29] Lilburne, J., (2020). "Maintenance Process Summary For DN Upper Port", EUROfusion Power Plant Physics and Technology Department, 11, (IDM EFDA_D_2NU4AP)
- [30] Lilburne, J., (2020). " Maintenance Process Summary For DN Lower Port", EUROfusion Power Plant Physics and Technology Department, 11, (IDM EFDA_D_2NU4AP)
- [31] Lilburne, J., (2020). "Maintenance Process Summary For SN Upper Port", EUROfusion Power Plant Physics and Technology Department, 10, (IDM EFDA_D_2PAXPY)
- [32] Lilburne, J., (2020). " Maintenance Process Summary For SN Lower Port", EUROfusion Power Plant Physics and Technology Department, 11, (IDM EFDA_D_2NPYMJ)
- [33] Caruso G, et al. (2022). "DEMO – The main achievements of the Pre – Concept phase of the safety and environmental work package and the development of the GSSR.", Fusion Engineering and Design 176

[34] Porfiri, Natalizio A. (2002). "ORE assessment in ITER: status of art". ENEA report, (FUS-TN-SA-SE-R-49.)

[35] Fuller, T. P., Easterly, C. E. ,(1979). "Tritium Protective Clothing", Oak Ridge National Lab., TN (USA), 40,(https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/11/499/11499889.pdf)