



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

**Εφαρμογές μικρών πυρηνικών αντιδραστήρων σε εγκαταστάσεις πρόωσης  
εμπορικών πλοίων**

**Applications of Small Nuclear Reactors in merchant marine propulsion systems**

Συγγραφέας:

Αναστάσιος Βοντζορίδης

A.M.: 51117006

Επιβλέπων: Γεώργιος Λιβανός

Αιγάλεω 2023





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### **Διπλωματική εργασία**

**Εφαρμογές μικρών πυρηνικών αντιδραστήρων σε εγκαταστάσεις πρόωσης  
εμπορικών**

**Συγγραφέας**

Αναστάσιος Βοντζορίδης (Α.Μ.: 51117006)

### **Επιβλέπων**

Όνοματεπώνυμο,

Γεώργιος Λιβανός Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

### **Ημερομηνία εξέτασης**

10/04/2022

### **Εξεταστική Επιτροπή**

Όνοματεπώνυμο,

Γεώργιος Λιβανός Καθηγητής  
ΠΑ.Δ.Α.

Όνοματεπώνυμο,

Δημήτριος-Νικόλαος  
Παγώνης Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Όνοματεπώνυμο,

Δημήτριος Κουμπογιάννης  
Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.



## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Βοντζορίδης Αναστάσιος του Ζαφειριού, με αριθμό μητρώου 51117006 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο Δηλών



**Βοντζορίδης Αναστάσιος**



## **Ευχαριστίες**

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται ο ευχάριστος κύκλος των σπουδών μου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γεώργιο Λιβανό, ο οποίος μου προσέφερε πολύτιμες πληροφορίες και εποικοδομητικά σχόλια κατά την συγγραφή της παρούσας εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, που με στήριξε σε όλη την διάρκεια της πενταετούς φοίτησης μου και που χωρίς αυτούς δεν θα βρισκόμουν εδώ που είμαι σήμερα.





## Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών του ΠΑ.Δ.Α. και παρουσιάζει την πυρηνική ενέργεια και το πως αυτή μπορεί να εφαρμοστεί στην ναυτιλία, μέσω των μικρών πυρηνικών αντιδραστήρων. Αρχικά, γίνεται μια ιστορική ανασκόπηση της πυρηνικής ενέργειας από την ανακάλυψη της σχάσης του ατόμου το 1938, μέχρι και σήμερα. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις εφαρμογές πυρηνικών αντιδραστήρων σε υποβρύχια και πλοία. Στην συνέχεια γίνεται μια εισαγωγή στις βασικές αρχές της πυρηνικής φυσικής και στην λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων και των διαφορετικών ειδών που υπάρχουν. Δίνεται έμφαση στις νέες γενιές μικρών αντιδραστήρων γνωστών και ως Small Modular Reactors (SMR), τα είδη αυτών, καθώς και αναλύονται οι πιθανές εφαρμογές τους σε συστήματα πρόωσης πλωτών μέσων. Τέλος γίνεται σύγκριση της πυρηνικής ενέργειας με άλλα εναλλακτικά καύσιμα καθώς και παρουσιάζονται τα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν για να γίνει αυτή η τεχνολογία βιώσιμη.

Λέξεις κλειδιά: Πυρηνική ενέργεια, Ναυτιλία , Πυρηνική πρόωση, Πυρηνικός αντιδραστήρας , Σχάση , Σύντηξη , Αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος , Αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος , Αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος , Αεριοψυκτοι αντιδραστήρες , Αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων , Αντιδραστήρες τετηγμένου άλατος , Μικροί αντιδραστήρες.

## **Abstract**

The present diploma thesis is exploring nuclear energy and how it can be implemented in the maritime industry, with the application of Small Modular Reactors. First, there is a historical review of nuclear energy from the discovery of fission of the atom in 1938, to the present day. Special emphasis is placed on nuclear reactor applications in submarines and ships. An introduction, follows, on the basic principles of nuclear physics and the operation of nuclear reactors and the different types thereof. Emphasis is placed on the new generation of small reactors known as Small Modular Reactors (SMR), followed by an analysis of their types, and their possible applications in propulsion systems of merchant marine ships. Lastly, a comparison of nuclear energy with other alternative fuels is represented, as well as the problems that must be overcome in order to make this technology a reality in the maritime industry.

Key words: Nuclear power, shipping, nuclear propulsion, nuclear reactor , fission , fusion , light water reactors , boiling water reactors , pressurized water reactors , gas cooled reactors , fast neutron reactors , molten salt reactors, small modular reactors.



## Πριεχόμενα

Ευχαριστίες.....	7
Εικόνες.....	15
Πίνακες.....	18
Κεφάλαιο 1: Ιστορική ανασκόπηση.....	19
1.1    Ιστορικές καινοτομίες.....	19
1.2    Πρόσφατες εξελίξεις.....	23
Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο πυρηνικής φυσικής.....	26
2.1    Ο πυρήνας του ατόμου.....	26
2.2    Η πυρηνική δύναμη.....	27
2.3    Ευστάθεια πυρήνα και ραδιενέργεια.....	27
2.4    Είδη ακτινοβολίας.....	28
2.4.1    Ακτινοβολία Άλφα.....	28
2.4.2    Ακτινοβολία Βήτα.....	28
2.4.3    Ακτινοβολία Γάμμα.....	28
2.5    Ενέργεια σύνδεσης.....	29
2.6    Πυρηνική σχάση.....	31
2.7    Αλυσιδωτή αντίδραση.....	32
2.8    Πυρηνική σύντηξη.....	33
2.8.1    Κριτήριο Lawson.....	35
Κεφάλαιο 3: : Πυρηνικοί αντιδραστήρες.....	35
3.1    Πυρηνικοί αντιδραστήρες σχάσης.....	35
3.1.1    Αρχές λειτουργίας.....	35
3.2    Είδη αντιδραστήρων.....	36
3.2.1    Αντιδραστήρας ελαφρού ύδατος ( <i>light-water reactors- LWR</i> ).....	36

3.2.2	Αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος ( <i>Boiling water reactor - BWR</i> ) .....	37
3.2.3	Αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος ( <i>Pressurized water reactor – PWR</i> ) 38	
3.2.4	Αντιδραστήρας πεπιεσμένου βαρέος ύδατος-CANDU ( <i>Pressurized water reactor – PHWR</i> ).....	38
3.2.5	Αντιδραστήρας ελαφρού ύδατος με γραφίτη ως επιβραδυντή ( <i>Light water graphite-moderated reactor – LWGR</i> ) .....	39
3.2.6	Αερίψυκτοι αντιδραστήρες ( <i>Gas-cooled reactors – AGR</i> ).....	40
3.2.7	Αντιδραστήρας ταχέων νετρονίων ( <i>Fast neutron reactor – FNR</i> ) .....	41
3.3	Πυρηνικοί αντιδραστήρες σύντηξης .....	41
3.3.1	Αρχές λειτουργίας.....	41
3.3.2	Αντιδραστήρας σύντηξης με αδρανειακό περιορισμό ( <i>Inertial confinement</i> ).....	41
3.3.3	Αντιδραστήρας σύντηξης με μαγνητικό περιορισμό ( <i>Magnetic confinement</i> ) .....	43
Κεφάλαιο 4: Μικροί αντιδραστήρες (Small modular reactors SMR) .....		44
4.1	Εισαγωγή.....	44
4.2	Ανάλυση ειδών μικρών αντιδραστήρων .....	49
4.2.1	Υδρόψυκτοι μικροί αντιδραστήρες ( <i>Light Water Reactors</i> ) .....	49
4.2.2	Μικροί Αερίψυκτοι αντιδραστήρες ( <i>Gas cooled reactors - GCR</i> ).....	57
4.2.3	Μικροί αντιδραστήρες υγρού μετάλλου / Ταχέων νετρονίων ( <i>Liquid Metal / Fast Neutron</i> ) .....	59
4.2.4	Μικροί αντιδραστήρες τετηγμένου άλατος ( <i>Molten Salt Reactor</i> ).....	61
Κεφάλαιο 5: : Εφαρμογές SMR στη ναυτιλιακή βιομηχανία.....		63
5.1	Προοπτικές.....	63
5.2	SMR σε επίγειες εγκαταστάσεις και λιμένες .....	63
5.3	SMR σε εγκαταστάσεις πρόωσης πλοίου .....	64
5.3.1	Marine Reactor X (MRX).....	64

5.3.2	ThorCon .....	65
5.3.3	Ρωσία : RITM-200 .....	67
5.3.4	Molten Chloride Fast Reactor .....	69
5.4	Η περίπτωση του Gen4Energy Hyperion Tanker : Ανάλυση εγκατάστασης 70	
5.4.1	Αντιδραστήρας.....	71
5.5	Μελέτη του πλοίου υπό μετασκευή .....	75
5.5.1	Εισαγωγή .....	75
5.5.2	Πρώτο στάδιο εκτίμησης κίνδυνου ( Risk Assessment ).....	75
5.5.3	Πρώιμη τεχνική εκτίμηση.....	79
5.5.4	Επιλογές για το σημείο τοποθέτησης του <i>SMR</i> και λεπτομέρειες του συστήματος πρόωσης. ....	1
5.5.5	Σύστημα πρόωσης CRP .....	3
5.5.6	Ο ανθρώπινος παράγοντας στην εκτίμηση κίνδυνου.....	5
5.6	Ναυπηγική επισκόπηση της μετασκευής .....	6
Κεφάλαιο 6: : Περιβαλλοντικό αποτύπωμα .....		9
6.1	Εκπομπές καυσαερίων στη ναυτιλιακή βιομηχανία.....	9
6.2	Εναλλακτικά καύσιμα για συστήματα πρόωσης.....	9
6.3	Πλεονεκτήματα πυρηνικής πρόωσης. ....	11
Κεφάλαιο 7: : Πυρηνική ενέργεια στη ναυτιλία - Οικονομική ανάλυση και προκλήσεις .....		12
7.1	Οικονομική βιωσιμότητα .....	12
7.2	Νομοθετικό πλαίσιο .....	14
7.3	Ανάπτυξη υποδομών .....	15
7.4	Εργασιακές αλλαγές και εκπαίδευση προσωπικού .....	15
7.5	Ανταγωνιστικό περιβάλλον.....	15
Κεφάλαιο 8: : Συμπεράσματα.....		16
Κεφάλαιο 9: Βιβλιογραφία .....		18

## Εικόνες

Εικόνα 1 USS Long Beach (Wikipedia, n.d.) .....	19
Εικόνα 2 USS Nautilus (Wikipedia, n.d.) .....	19
Εικόνα 3 USS Enterprise (Wikipedia, n.d.) .....	19
Εικόνα 4 HMS Dreadnought (S101) (Wikipedia, χ.χ.) .....	20
Εικόνα 5 USSR Icebreaker Lenin (Wikipedia, χ.χ.) .....	21
Εικόνα 6 NS Musu / RV Mirai (Wikipedia, χ.χ.) .....	22
Εικόνα 7 NS Otto Hahn (Wikipedia, χ.χ.) .....	22
Εικόνα 8 NS Savannah (Wikipedia, χ.χ.) .....	22
Εικόνα 9 Yamal (Wikipedia, χ.χ.) .....	23
Εικόνα 10 50th Anniversary Victory (Wikipedia, n.d.) .....	23
Εικόνα 11 LK-60 Icebreaker Arktika (Wikipedia, χ.χ.) .....	24
Εικόνα 12 Σε έναν μεγάλο πυρήνα τα απομακρυσμένα πρωτόνια δέχονται μια ισχυρή ηλεκτρομαγνητική άπωση και μια αμελητέα πυρηνική έλξη. (Wolfson, 2020).....	27
Εικόνα 13 Σχηματική αναπαράσταση στοιχείων με τα ισότοπα τους (Wolfson, 2020) .....	27
Εικόνα 14 Τα τρία είδη ακτινοβολίας χωρίζονται σε ξεχωριστές διαδρομές όταν περνούν μέσα από ένα μαγνητικό πεδίο. (Wolfson, 2020).....	29
Εικόνα 15 Καμπύλη ενέργειας σύνδεσης (Wolfson, 2020).....	30
Εικόνα 16 Βασική αντίδραση σχάσης (S.E. Hirdaris, και συν., 2014).....	31
Εικόνα 17 : Σχηματική αναπαράσταση αλυσιδωτής αντίδρασης (YOUNG, 1994)....	32
Εικόνα 18 Καθαρό αποτέλεσμα αντίδρασης πρωτονίου-πρωτονίου (Wolfson, 2020)	34
Εικόνα 19 LWR για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (large.stanford.edu, χ.χ.) .....	37
Εικόνα 20 BWR (World Nuclear Association, n.d.).....	37
Εικόνα 21 PWR (World Nuclear Association, n.d.) .....	38

Εικόνα 22 PHWR/CANDU (World Nuclear Association, n.d.).....	39
Εικόνα 23 RBMK (World Nuclear Association, n.d.).....	40
Εικόνα 24 AGR (World Nuclear Association, n.d.) .....	40
Εικόνα 25: Σφαιρίδιο καυσίμου D-T (Wikipedia, χ.χ.).....	42
Εικόνα 26 Θάλαμος χρυσού (Wikipedia, χ.χ.).....	42
Εικόνα 27 Ο θάλαμος του NIF για την σύντηξη (cdn.theatlantic, χ.χ.).....	42
Εικόνα 28 Αντιδραστήρας tokamak (Wikipedia, χ.χ.).....	43
Εικόνα 29 Αντιδραστήρας KSTAR (Wikipedia, χ.χ.).....	44
Εικόνα 30 Πλωτή εξέδρα Akademik Lomonosov (Wikipedia, 2022).....	46
Εικόνα 31 Ο CAREM SMR υπό κατασκευή στο πυρηνικό σύμπλεγμα Atucha στην Αργεντινή (Argentina.gob, χ.χ.).....	51
Εικόνα 32 Μονάδα ισχύος του NuScale SMR (World Nuclear Association, 2022) ...	54
Εικόνα 33 Η τοποθεσία του εργοστασίου Carbon Free Power Project (Carbon Free Power Project, χ.χ.).....	54
Εικόνα 34 Όλα τα project της NuScale σε παγκόσμιο επίπεδο. (NuScale Power, χ.χ.) .....	55
Εικόνα 35 Σχέδιο του εργοστασίου SMR της Roll-Royce (Rolls-Royce SMR, χ.χ.) .	56
Εικόνα 36 Σφαιρίδιο καυσίμου TRISO (X-Energy, χ.χ.) .....	58
Εικόνα 37 Αντιδραστήρας XE-100 (X-Energy, χ.χ.).....	58
Εικόνα 38 GE-H PRISM (General Electric Power, χ.χ.).....	60
Εικόνα 39 Project NATRIUM (Natrium Power, χ.χ.) .....	61
Εικόνα 40 Μέση τομή του MSR (Wikipedia, χ.χ.).....	62
Εικόνα 41 Heat Transfer Reactor Experiments ( HTRE3 ) (Wikipedia, χ.χ.) .....	62
Εικόνα 42 Αντιδραστήρας ThorCon μέσα στο κυλινδρικό δοχείο (ThorCon, χ.χ.) ....	66
Εικόνα 43 Διάταξη μιας μονάδας ThorCon (ThorCon Power, χ.χ.).....	66
Εικόνα 44 TMSR-500, που αποτελείται από δυο μονάδες ThorCon (ThorCon Power, χ.χ.).....	67



Εικόνα 45 Κέλυφος του αντιδραστήρα RITM-200, του νέου παγοθραυστικού Yakutia (ROSATOM, 2022) .....	68
Εικόνα 46 Μακέτα του παγοθραυστικού “The Leader” του project 10510 (Wikipedia, χ.χ.).....	69
Εικόνα 47 All Electric Advanced Atomic Ships από την Core Power (Core Power, χ.χ.) .....	70
Εικόνα 48 Διάταξη πυρήνα (S.E. Hirdaris, και συν., 2014) .....	72
Εικόνα 49 Πρόσοψη πυρήνα και δοχείου (S.E. Hirdaris, και συν., 2014) .....	73
Εικόνα 50 : Αναπαράσταση εγκαταστάσεως παραγωγής ατμού (S.E. Hirdaris, et al., 2014) .....	74
Εικόνα 51 Στατιστικά ατυχημάτων δεξαμενόπλοιων (S.E. Hirdaris, et al., 2014).....	76
Εικόνα 52 Τα στατιστικά των αιτιών ατυχημάτων υποβρυχίων. (S.E. Hirdaris, et al., 2014) .....	77
Εικόνα 53 Στατιστικά αιτιών απώλειας ζωής σε υποβρύχια (S.E. Hirdaris, et al., 2014) .....	77
Εικόνα 54 Στατιστικά από ναύαγια υποβρυχίων (S.E. Hirdaris, et al., 2014).....	78
Εικόνα 55 Γενικά χαρακτηριστικά σκάφους (S.E. Hirdaris, και συν., 2014).....	79
Εικόνα 56 Φωτογραφία και σχέδιο του, υπό μετασκευή πλοίου (S.E. Hirdaris, και συν., 2014) .....	80
Εικόνα 57 Γενική διάταξη του μηχανοστασίου (S.E. Hirdaris, και συν., 2014) .....	2
Εικόνα 58 Σύστημα azipod (Wartsila, χ.χ.) .....	3
Εικόνα 59 Σχέδιο διάταξης συστήματος πρόωσης (S.E. Hirdaris, και συν., 2014).....	4
Εικόνα 60 : Εναλλακτικό σχέδιο διάταξης με διπλό αξονικό σύστημα (S.E. Hirdaris, και συν., 2014) .....	5
Εικόνα 61 Διάγραμμα έλικας SMR Tanker και πατρικού σκάφους (S.E. Hirdaris, et al., 2014) .....	8
Εικόνα 62 Κατανομή βαρών σκάφους μετά την μετασκευή (S.E. Hirdaris, et al., 2014) .....	8

## Πίνακες

Πίνακας 1 Γενικά χαρακτηριστικά πυρινοκίνητων πλοίων (S.E. Hirdaris, και συν., 2014) .....	25
Πίνακας 2 SMR και τα στάδια κατασκευής τους (ADVANCES IN SMALL MODULAR REACTOR TECHNOLOGY DEVELOPMENTS, 2020) .....	46
Πίνακας 3 Χαρακτηριστικά του SMR .....	73
Πίνακας 4 Εκτίμηση αλλαγών του Tanker κατά την μετασκευή. ....	82
Πίνακας 5 Κανονισμοί που πληροί το SMR Tanker .....	83
Πίνακας 6 Εκτίμηση κινδύνου για 4 τοποθεσίες του SMR πάνω στο πλοίο (S.E. Hirdaris, και συν., 2014).....	1
Πίνακας 7 Χαρακτηριστικά του δεξαμενόπλοιου SMR σε σχέση με το πατρικό σκάφος (S.E. Hirdaris, και συν., 2014).....	6
Πίνακας 8 Κριτήρια ευστάθειας IMO (S.E. Hirdaris, και συν., 2014) (IMO (1981) Resolution A. 491 (XII)).....	7
Πίνακας 9 : Εκπομπές CO2 της ναυτιλιακής βιομηχανίας 2012-2018 (IMO, 2020) ....	9
Πίνακας 10 Μέτρα μείωσης εκπομπών (S.E. Hirdaris, και συν., 2014).....	11

# Κεφάλαιο 1: Ιστορική ανασκόπηση

## 1.1 Ιστορικές καινοτομίες

Η ανακάλυψη της σχάσης του πυρήνα του ατόμου, το 1938 άλλαξε τον κόσμο μας. Οι επιστήμονες της εποχής φανταζόντουσαν ένα μέλλον όπου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένας πυρηνικός αντιδραστήρας ως μέσο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Λίγα χρόνια αργότερα, κατά την διάρκεια του ψυχρού πολέμου, το Αμερικανικό Πολεμικό Ναυτικό, είχε στόχο να μετατρέψει τα υποβρύχια του, από βραδυκίνητα υποθαλάσσια σκάφη, σε πολεμικές μηχανές ικανές να πιάουν μέχρι και ταχύτητα 25 κόμβων, χωρίς να υπάρχει ανάγκη για ανεφοδιασμό για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Οι πρώτες δοκιμές για συστήματα πρόωσης, με αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος (*PWR, Pressurized Water Reactor*, αρχές λειτουργίας τους στην Ενότητα 3) ξεκίνησαν το 1953 και το πρώτο πυρινοκίνητο υποβρύχιο ήταν το *USS Nautilus* που τέθηκε σε υπηρεσία το 1955. Το αεροπλανοφόρο *USS Enterprise* που τέθηκε σε υπηρεσία το 1960 είχε οκτώ μονάδες PWR και το καταδρομικό *USS Long Beach* ακολούθησε το 1961, με δυο μονάδες PWR.



Εικόνα 2 USS Nautilus (Wikipedia, n.d.)

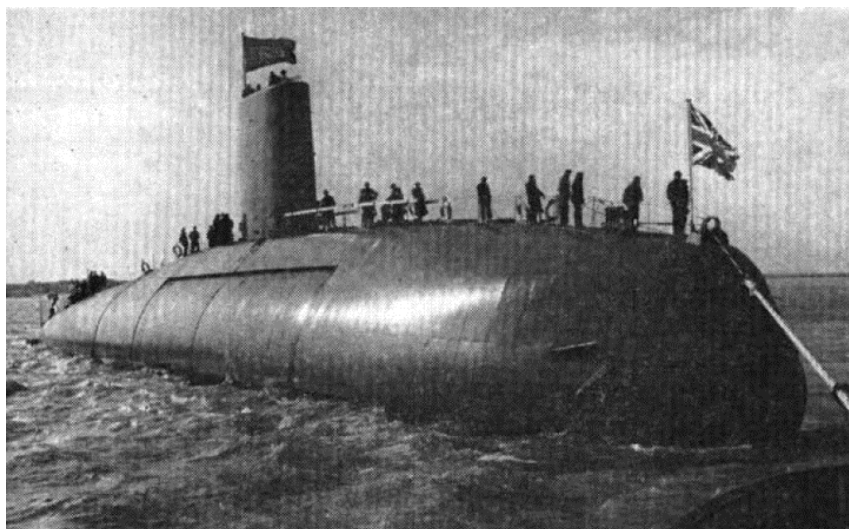


Εικόνα 1 USS Long Beach (Wikipedia, n.d.)



Εικόνα 3 USS Enterprise (Wikipedia, n.d.)

Το 1958 έγινε η Αμοιβαία Αμυντική Συμφωνία (*UK–US Mutual Defence Agreement*) ανάμεσα στις ΗΠΑ, Ηνωμένο Βασίλειο και την Βόρεια Ιρλανδία, με σκοπό την συνεργασία των εθνών αυτών για την αξιοποίηση της ατομικής ενέργειας για αμυντικούς σκοπούς. Το πρώτο αγγλικό πυρηνικό υποβρύχιο ήταν το *HMS Dreadnought* που τέθηκε σε υπηρεσία το 1962. Μέχρι εκείνη την χρονιά όμως οι ΗΠΑ είχαν ήδη 26 πυρηνοκίνητα υποβρύχια και αλλά 30 που ήταν υπό κατασκευή.



Εικόνα 4 HMS Dreadnought (S101) (Wikipedia, χ.χ.)

Παράλληλα με τις ΗΠΑ, αλλά ανεξάρτητα, η Ρωσία ανέπτυξε τους δικούς της αντιδραστήρες. Από το 1950 μέχρι το 2003 η ΕΣΣΔ/Ρωσία, έκτισε 248 πυρηνικά υποβρύχια, 5 σκάφη επιφανείας και 9 παγοθραυστικά, που είχαν συνολικά 468 αντιδραστήρες. Το πρώτο πυρηνοκίνητο σκάφος επιφανείας ήταν το παγοθραυστικό *Lenin* (20000 DWT), τέθηκε σε λειτουργία το 1959 και έμεινε σε υπηρεσία για 30 χρόνια. Σήμερα έχει μετασκευαστεί σε μουσείο και είναι μονιμά αγκυροβολημένο στο Μούρμανσκ της Ρωσίας. Στην αρχή είχε τρεις αντιδραστήρες ισχύος 90 MWt αλλά αντικαταστάθηκαν από δυο αντιδραστήρες ισχύος 171 MWt, ως συνέπεια, δυο ατυχημάτων που συνέβησαν το 1965 και το 1967.



Εικόνα 5 USSR Icebreaker Lenin (Wikipedia, χ.χ.)

Το πρώτο πυρινοκίνητο εμπορικό πλοίο ήταν το *Container Ship NS Savannah* (22,000 t DWT). Ναυπηγήθηκε στις ΗΠΑ το 1962, τέθηκε σε υπηρεσία το 1970 και έκανε χρήση ενός *PWR* θερμικής ισχύος 75 MW. Ήταν ένα τεχνικό επίτευγμα για την εποχή παρόλα αυτά αποδείχθηκε πολύ δαπανηρή η λειτουργία του. Το 1964 καθελκύστηκε το Γερμανικό φορτηγό και ερευνητικό πλοίο *NS Otto Hahn* (15.000 t DWT) που είχε μονό αντιδραστήρα θερμικής ισχύος 36 MW που μετέφερε 8 MW μηχανική ισχύ στην έλικα. Ταξίδεψε χωρίς τεχνικά προβλήματα για 10 χρόνια, όμως το 1982 μετασκευάστηκε με κινητήρα *Diesel*, καθώς η λειτουργία του ήταν πολύ κοστοβόρα. Το Ιαπωνικό φορτηγό πλοίο *NS Mutsu* (8000 t DWT) ήταν το τρίτο πυρινοκίνητο εμπορικό πλοίο που τέθηκε σε λειτουργία το 1970. Για η ναυπήγηση του βασίστηκε στο *NS Savannah* και έγιναν πολλές βελτιώσεις πάνω σε θέματα σχεδίασης και ασφάλειας του σκάφους. Το 1974 έγινε ένα ατύχημα που είχε ως αποτέλεσμα μικρή διαφυγή ραδιενέργειας. Η ποσότητα ήταν αμελητέα, παρόλα αυτά υπήρξε μεγάλη κοινωνική αλλά και πολιτική πίεση που οδήγησε το σκάφος να τεθεί εκτός υπηρεσίας.

Το 1995 μετασκευάστηκε και πλέον είναι γνωστό ως το ωκεανογραφικό σκάφος *RV Mirai*.



*Εικόνα 7 NS Savannah (Wikipedia, χ.χ.)*



*Εικόνα 6 NS Otto Hahn (Wikipedia, χ.χ.)*



*Εικόνα 8 NS Musu / RV Mirai (Wikipedia, χ.χ.)*

Ο Lloyd's Register (1966) ήταν ο πρώτος νηογνώμονας που ανέπτυξε κανόνες για πυρινοκίνητα πλοία στην κατηγορία “*Nuclear Powered- NP*”. Εμπειρείχε ντετερμινιστικές προδιάγραφες για την γάστρα, τον αντιδραστήρα καθώς και για την επιτήρηση λειτουργίας αλλά και την συντήρηση του σκάφους. Ακολούθησε ο Παγκόσμιος Ναυτιλιακός Οργανισμός (I.M.O) που το 1981 ανέπτυξε μέτρα που αφορούσαν την διασφάλιση της ανθρώπινης ζωής καθώς και την προστασία του

περιβάλλοντος από πιθανή έκθεση ραδιενέργειας. Ο κώδικας αυτός εμπεριέχει επίσης προδιάγραφες για την προστασία του αντιδραστήρα, την κατασκευαστική ακεραιότητα και την αντοχή καθώς και θέματα πυρασφάλειας. (S.E. Hirdaris, και συν., 2014)

## 1.2 Πρόσφατες εξελίξεις

Τα τελευταία χρόνια οι περισσότερες καινοτομίες και εξελίξεις έχουν δημιουργηθεί από τον Ρωσικό Αρκτικό στόλο. Λόγω των ακραίων καιρικών συνθηκών, υπήρχε μεγάλη ανάγκη για την διασφάλιση της αξιοπιστίας αλλά και την βελτιστοποίηση των αυτοματισμών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την μείωση του προσωπικού πάνω στο σκάφος. (S.E. Hirdaris, και συν., 2014)

Απόγονοι του παγοθραυστικού *Lenin* ήταν οι σειρά *Arktika Class Icebreakers*. Από το 1975 μέχρι το 2007 τέθηκαν σε υπηρεσία ,έξι παγοθραυστικά, που ναυπηγήθηκαν στη Αγία Πετρούπολη, δυο από τα οποία είναι σε υπηρεσία μέχρι και σήμερα. Όλα χρησιμοποιούν δυο αντιδραστήρες *OK-900A PWR*. Το πιο πρόσφατο σκάφος, το '*50th Anniversary of the Victory*' , (προς τιμήν των 50 χρόνων από την νίκη του Β



Εικόνα 10 50th Anniversary Victory (Wikipedia, n.d.)



Εικόνα 9 Yamal (Wikipedia, χ.χ.)

παγκοσμίου πολέμου ) έχει μήκος 160 m και πλάτος 30 m και είναι ικανό να σπάει πάγο πάχους έως και 2,8 μέτρα. (Wikipedia, n.d.)

Το 2009 έγιναν μελέτες για την νέα γενιά παγοθραυστικών με καλύτερους αυτοματισμούς που είχαν ως αποτέλεσμα την μείωση του πληρώματος στο μισό και χρησιμοποιούσαν βελτιωμένο αντιδραστήρα βασισμένο στον *KLT-40 PWR*. Έχει γρήγορο σύστημα ερματισμού που του επιτρέπει να κινείται σε ρηχά αλλά και βαθιά νερά, μεταβάλλοντας το βύθισμά του. Από αυτές τις μελέτες γεννήθηκε η σειρά *LK-60* στα μέσα του 2012. Ο ανεφοδιασμός των σκαφών αυτών εκτιμάται ότι θα χρειάζεται κάθε 7 χρόνια, θα χρειάζεται μετασκευή κάθε 20 χρόνια και η συνολική διάρκεια ζωής εκτιμάται στα 40 χρόνια.

Αυτή η σειρά, έχει τον αντιδραστήρα *RITM-200* που θα αναλυθεί στην [Ενότητα 6](#).



Εικόνα 11 LK-60 Icebreaker Arktika (Wikipedia, χ.χ.)



Πίνακας 1 Γενικά χαρακτηριστικά πυρινοκίνητων πλοίων (S.E. Hirdaris, και συν., 2014)

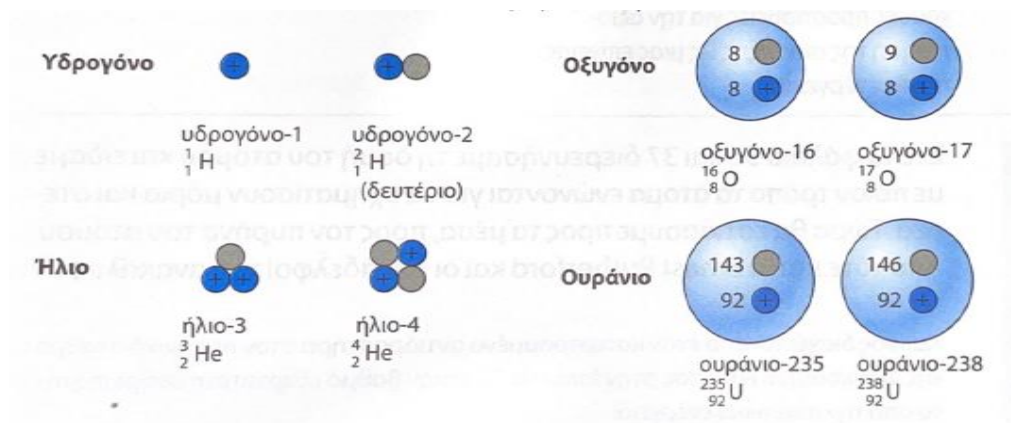
Όνομα πλοίου	Τύπος	Χώρα	Τύπος αντιδραστήρα	Γενικά χαρακτηριστικά					Ισχύς (MW)	Χρονιά	Παροπλισμός
				$L_{ολ}$ (m)	$B$ (m)	$D$ (m)	$T$ (m)	$\nabla$ (GT)			
Mutsu	Cargo	Japan	PWR $\chi$ 1	130.0	19.0	13.2	6.9	8242	36	1972	1996
Savannah	Container	USA	PWR $\chi$ 1	181.5	23.8	15.2	9	13,599	80	1962	1977
Otto Hahn	Ore Carrier	Germany	FDR $\chi$ 1	172.0	23.4	14.5	9.2	14,040	38	1968	1982
Sovetski Souz	Icebreaker	Russia	OK-900A $\chi$ 2	149.7	28.1	15.7	9.0	23,000	171 $\chi$ 2	1989	Σε λειτουργία
Vaygach	Icebreaker	Russia	KLT-40M $\chi$ 1	149.7	28.1	15.7	9.0	20,791	171	1989	Σε λειτουργία
Taimyr	Icebreaker	Russia	KLT-40M $\chi$ 1	151.8	29.2	15.2	8.1	20,791	171	1989	Σε λειτουργία
Sevmorput	Icebreaker	Russia	KLT-40M $\chi$ 1	260.0	32.0	18.3	12	33,900	135	1988	Σε λειτουργία
Let Pobedy	Icebreaker	Russia	OK-900A $\chi$ 2	159.6	30.0	17.2	11.1	23,439	171 $\chi$ 2	2007	Σε λειτουργία
Artika	Icebreaker	Russia	PWR $\chi$ 2	147.9	29.9	17.2	11	20,665	171 $\chi$ 2	1975	2008
Lenin	Icebreaker	Russia	PWR $\chi$ 2	134.0	27.6	16.1	10.5	19,240	159 $\chi$ 2	2008	1989

## Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο πυρηνικής φυσικής

### 2.1 Ο πυρήνας του ατόμου

Ο πυρήνας ενός ατόμου αποτελείται από θετικά φορτισμένα πρωτόνια και ουδέτερα νετρόνια, τα οποία από κοινού ονομάζονται νουκλεόνια. Ο αριθμός των νουκλεονίων ονομάζεται Μαζικός Αριθμός και των πρωτονίων ονομάζεται Ατομικός Αριθμός. Σε ένα ουδέτερο φορτισμένο άτομο, ο ατομικός αριθμός, καθορίζει τον αριθμό των ηλεκτρονίων ( Ουδέτερη φόρτιση υπάρχει όταν, τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια είναι ίσα με τα θετικά πρωτόνια ). Κάθε ατομικός αριθμός αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο. (Wolfson, 2020)

Επειδή τα νετρόνια είναι ουδέτερα φορτισμένα, επηρεάζουν αμελητέα την χημική συμπεριφορά του ατόμου. Για αυτό τον λόγο οι πυρήνες του ίδιου στοιχείου μπορούν να έχουν διαφορετικό αριθμό νετρονίων. Τα στοιχεία αυτά ονομάζονται ισότοπα. Πολλά ισότοπα στοιχείων βρίσκονται στην φύση. Κάποια στοιχεία όμως έχουν κάποια ραδιενεργά ισότοπα τα οποία μπορούν να παραχθούν μέσω πυρηνικών αντιδράσεων, τα οποία χρησιμοποιούνται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες αλλά και οπλικά συστήματα. Ένα παράδειγμα είναι το Ουράνιο το οποίο αποτελείται κυρίως από το ισότοπο U-238 αλλά, το 0.7% του, είναι το U-235 το οποίο χρησιμοποιείτε ως καύσιμο. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται κάποια στοιχεία σε σύγκριση με τα ισότοπα τους. Παρατηρούμε πως διαφέρουν κατά ένα ή περισσότερα νετρόνια (που απεικονίζονται με γκρι χρώμα) (Wolfson, 2020)

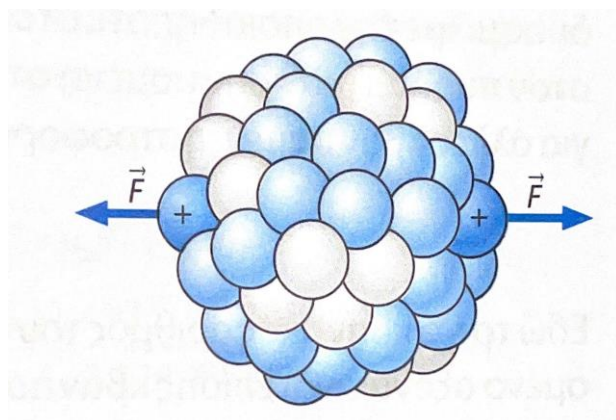


## 2.2 Η πυρηνική δύναμη

Στο άτομο υπάρχουν δυο δυνάμεις, η πυρηνική δύναμη (λόγο του πυρήνα) και η ηλεκτρομαγνητική δύναμη (λόγο των πρωτονίων). Η πρώτη ασκείται σε όλα τα ζεύγη νουκλεονίων καθώς και αναμεσα σε πρωτόνια με πρωτόνια και νετρόνια με νετρόνια. Είναι πολύ ισχυρή αλλά έχει πολύ μικρή εμβέλεια ( $10^{-15}$  m). Η ηλεκτρική άπωση των πρωτονίων είναι κατά πολύ μικρότερη αλλά έχει μεγαλύτερη εμβέλεια.

## 2.3 Ευστάθεια πυρήνα και ραδιενέργεια.

Ένας πυρήνας θεωρείται σταθερός όταν μπορεί και συγκρατεί τα πρωτόνια και τα νετρόνια του και ονομάζεται νουκλίδιο. Σε πολλές περιπτώσεις αυτό δεν είναι εφικτό καθώς επικρατεί η ηλεκτρική άπωση των πρωτονίων και έτσι ο πυρήνας διασπάται, εκπέμποντας στο περιβάλλον ένα μέρος του. Αυτή η εκπομπή ονομάζεται ραδιενέργεια και πλέον το νουκλίδιο θεωρείται ραδιενεργό. Η διάσπαση του πυρήνα λαμβάνει χωρά σε πολύ διαφορετικούς ρυθμούς για διάφορα ισότοπα. Η ενεργότητα ενός πυρήνα θεωρείται ο αριθμός διασπάσεων ανά μονάδα χρόνου και μονάδα στο SI είναι το becquerel (Bq) όπου 1 Bq ισούται με μια διάσπαση το δευτερόλεπτο. Χρήσιμο μέτρο, είναι ο χρόνος ημίσειας ζωής ενός ισοτόπου που μας δείχνει τον χρόνο που οι πυρήνες ενός δείγματος έχουν διασπαστεί στο μισό. (YOUNG, 1994)



Εικόνα 13 Σε έναν μεγάλο πυρήνα τα απομακρυσμένα πρωτόνια δέχονται μια ισχυρή ηλεκτρομαγνητική άπωση και μια αμελητέα πυρηνική έλξη. (Wolfson, 2020)

## 2.4 Είδη ακτινοβολίας

Οι επιστήμονες παρατήρησαν πως όταν η ακτινοβολία διάφορων ισοτόπων περάσει μέσα από ένα μαγνητικό πεδίο χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες την άλφα, την βήτα και την γάμμα αντίστοιχα. (YOUNG, 1994)

### 2.4.1 Ακτινοβολία Άλφα

Οι πυρήνες που εκπέμπουν ακτινοβολία άλφα έχουν πολύ θετικό φορτίο και ανήκουν σε μεγάλα άτομα. Απελευθερώνουν δυο πρωτόνια και δυο νετρόνια, δηλαδή ένα σωματίδιο άλφα, στην πραγματικότητα είναι το He-4 (Ήλιο -4). Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που εμφανίζεται κατά την αντίδραση αυτή είναι η κινητική ενέργεια του σωματιδίου άλφα.

### 2.4.2 Ακτινοβολία Βήτα

Οι πυρήνες που εκπέμπουν ακτινοβολία βήτα έχουν πολλά νετρόνια, ένα από τα οποία διασπάται σε ένα πρωτόνιο, ένα ηλεκτρόνιο και ένα ασύλληπτο ουδέτερο σωματίδιο που λέγεται νεutrίνο. Το ηλεκτρόνιο εξέρχεται με μεγάλη ενέργεια η οποία προκαλεί την ακτινοβολία βήτα. Ο πυρήνας λοιπόν παραμένει με την ίδια μάζα αλλά έχει μεγαλύτερο ατομικό αριθμό ( επειδή έχει ένα επιπλέον θετικό φορτίο )

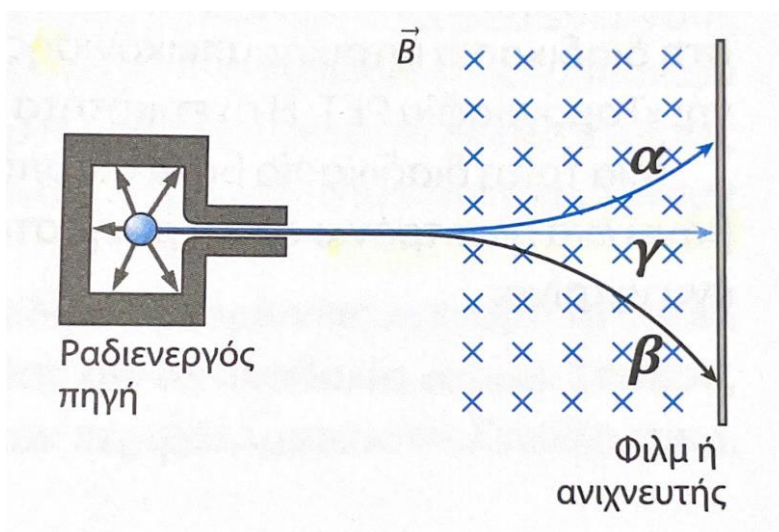
Ένα ακόμα είδος ακτινοβολίας βήτα είναι η μετατροπή ενός πρωτονίου σε ένα νετρόνιο με την επακόλουθη εκπομπή ενός ποζιτρονίου ( ένα ηλεκτρόνιο με θετικό φορτίο ή αντι-ηλεκτρόνιο ) και ενός νεutrίνου.

Το τρίτο είδος ακτινοβολίας βήτα είναι η σύλληψη ενός ηλεκτρονίου κατά την οποία ένα πρωτόνιο μετατρέπεται σε νετρόνιο και εκπέμπει ένα νεutrίνο.

### 2.4.3 Ακτινοβολία Γάμμα

Η ακτινοβολία γάμμα παρατηρείται όταν ένας πυρήνας σε διεγερμένη κατάσταση (δηλαδή παραλαμβάνει κάποια ενέργεια ), διασπάται και εκπέμπει ένα φωτόνιο

(γνωστό και ως σωματίδιο γάμμα). Συνήθως αυτή η διαδικασία συνοδεύει την ακτινοβολία άλφα ή βήτα. Δεν μεταβάλλεται το είδος του πυρήνα καθώς το σωματίδιο γάμμα είναι ουδέτερο και χωρίς μάζα.



Εικόνα 12 Τα τρία είδη ακτινοβολίας χωρίζονται σε ξεχωριστές διαδρομές όταν περνούν μέσα από ένα μαγνητικό πεδίο. (Wolfson, 2020)

## 2.5 Ενέργεια σύνδεσης

Για να μπορέσει να υπερνικηθεί η ισχυρή πυρηνική δύναμη, η αποδόμηση ενός πυρήνα απαιτεί μεγάλο ποσό ενέργειας. Αυτή η ενέργεια ονομάζεται ενέργεια σύνδεσης και είναι μεγαλύτερη όταν ένας πυρήνας είναι ισχυρά συνδεδεμένος. Εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης της ενέργειας σε αυτό το φαινόμενο και τον τύπο του Αϊνστάιν, προκύπτει η παρακάτω σχέση :

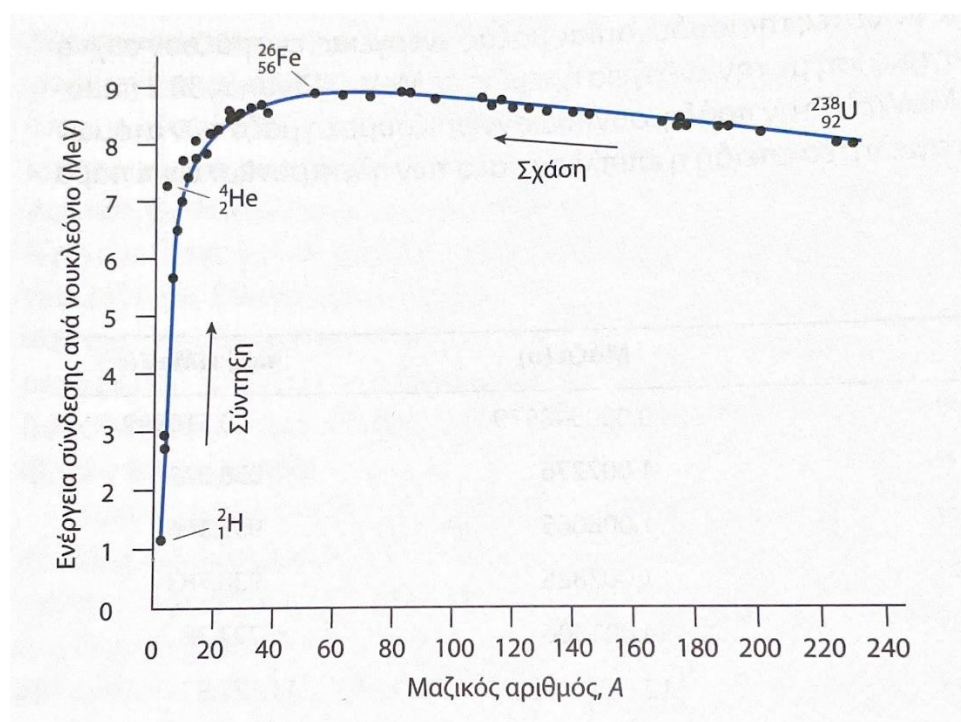
Εξίσωση 1

$$m_N \cdot c^2 + E_b = Z m_p \cdot c^2 + (A - Z) \cdot m_n \cdot c^2$$

Όπου οι όροι στο αριστερό μέρος υποδηλώνουν την Ενέργεια ηρεμίας του πυρήνα με μάζα  $m_N$  και ενέργεια σύνδεσης  $E_b$ . Οι όροι στο δεξί μέρος είναι ενέργεια ηρεμίας των επιμέρους  $Z$  πρωτονίων και  $A-Z$  νετρονίων που αποτελούν τον πυρήνα. Επομένως εξάγουμε το συμπέρασμα, πως αν δώσουμε στο σύστημα ενέργεια  $E_b$  τότε μπορούμε να αποδομήσουμε τον πυρήνα στα νουκλεόνια που τον αποτελούν.

Παρατηρούμε πως τελικά η μάζα του πυρήνα δεν ισούται με το άθροισμα των επιμέρους μαζών. Αυτό το, έλλειμμα μάζας, δεν είναι κάτι ασυνήθιστο καθώς το παρατηρούμε σε όλα τα στοιχεία. Για παράδειγμα, η μάζα ενός μορίου νερού δεν είναι ίση με τις επιμέρους μάζες των υδρογόνων και του οξυγόνου που το αποτελούν, όμως λόγω του χημικού δεσμού η διαφορά είναι σχεδόν αμελητέα. Στις πυρηνικές αλληλεπιδράσεις όμως η πυρηνική ενέργεια είναι κατά πολύ μεγαλύτερη για αυτό είναι πιο εμφανής.

Η καμπύλη ενέργειας σύνδεσης αναπαριστά την ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο συναρτήσει με τον ατομικό αριθμό  $A$ . Παρατηρείται πως στην περιοχή για  $A=60$ , είναι οι ισχυρότεροι συνδεδεμένοι πυρήνες. Αυτό μας υποδηλώνει πως είναι ενεργειακά αποδοτικότερο δυο ελαφρότεροι πυρήνες να ενωθούν και σχηματίσουν έναν μεγαλύτερο ενδιάμεσης μάζας, με την διαδικασία της **σύντηξης**. Αντιστοίχως, οι βαρύτεροι πυρήνες είναι πιο εύκολο να μετάβουν σε μια ενεργειακά χαμηλότερη κατάσταση και να υποστούν **σχάση**, σε δυο πυρήνες ενδιάμεσης μάζας. (Wolfson, 2020)

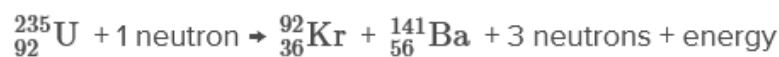


Εικόνα 13 Καμπύλη ενέργειας σύνδεσης (Wolfson, 2020)

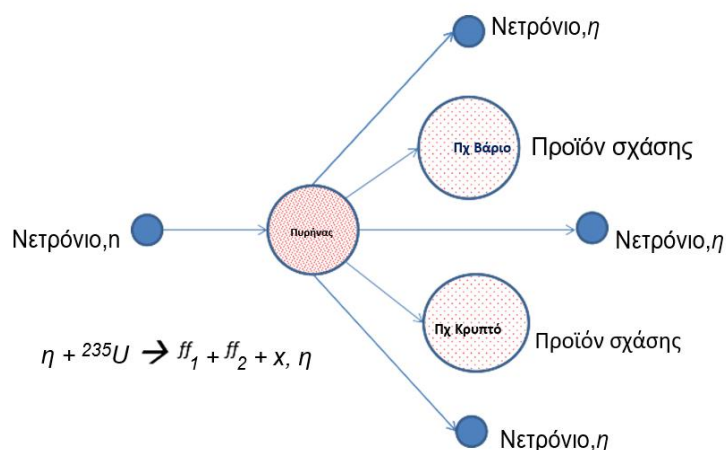
## 2.6 Πυρηνική σχάση

Η σχάση του πυρήνα ανακαλύφθηκε το 1938 όταν Γερμανοί χημικοί βομβάρδισαν ουράνιο με νετρόνια. Παρατηρήθηκε πως το ουράνιο χωρίστηκε σε δυο ραδιενεργά ισότοπα, το Βάριο και το Λανθάνιο. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει συνήθως όταν ένα νετρόνιο προσκρούει σε έναν πυρήνα, αλλά μπορεί να συμβεί και αυθόρμητα σε εξαιρετικά σπάνιες περιπτώσεις. Κατά την σχάση ο πυρήνας που λαμβάνει το νετρόνιο γίνεται εξαιρετικά ασταθής. Τα προϊόντα της σχάσης, είναι ένα ζεύγος πυρήνων άνισης μάζας, καθώς και 2 με 3 νετρόνια. Ένα παράδειγμα σχάσης είναι η διάσπαση του U-235 ως εξής :

*Εξίσωση 2*



Παρατηρούμε πως οι δείκτες και οι εκθέτες είναι το ίδιο και στα δυο μέλη. Η ενέργεια που βρίσκεται στα προϊόντα της εξίσωσης εκλύεται στο περιβάλλον σε μορφή θερμότητας. Την μετράμε σε μεγαηλεκτρονιο βολτ MeV. Ένα eV μας δείχνει το ποσό κινητικής ενέργειας που αποκτά ένα ηλεκτρόνιο, όταν περνά από διαφορά δυναμικού ενός βολτ (V), στο κενό. Αναφορικά  $1 \text{ eV} = 1.602 \ 176 \ 53 \ (14) \times 10^{-19} \text{ J}$ . Κατά την σχάση απελευθερώνονται περίπου 200 MeV. Συγκριτικά οι ακτινοβολίες α και β είναι 0-10 MeV. (Wolfson, 2020)

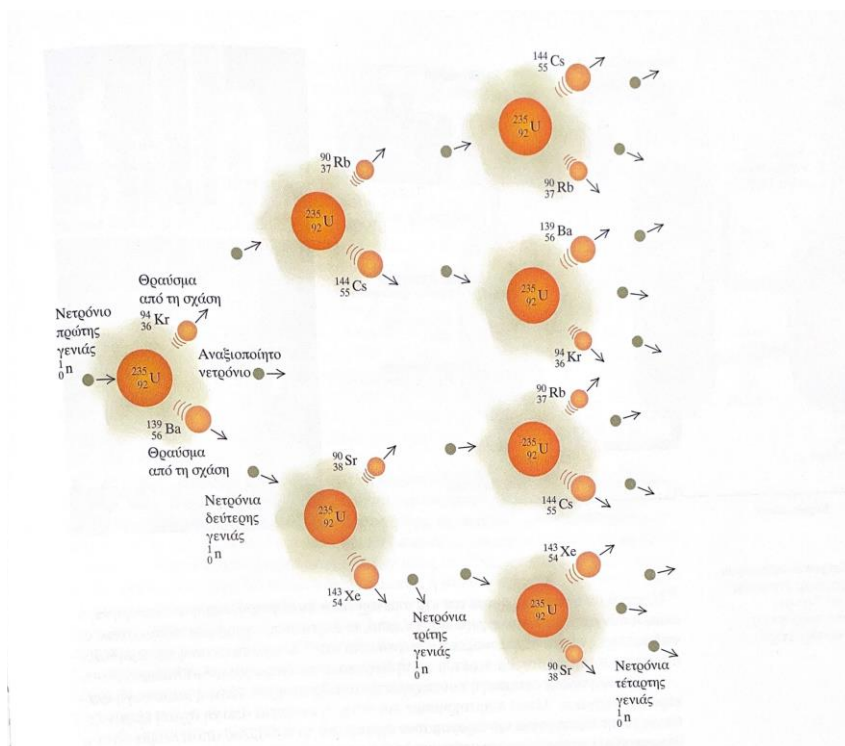


*Εικόνα 14 Βασική αντίδραση σχάσης (S.E. Hirdaris, και συν., 2014)*

## 2.7 Αλυσιδωτή αντίδραση

Όπως προαναφέρθηκε, κατά την σχάση ενός πυρήνα δημιουργούνται από δυο έως τρία ελεύθερα νετρόνια. Τα νετρόνια αυτά με την σειρά τους έρχονται σε επαφή με άλλους πυρήνες που υπόκεινται σε επιπλέον σχάσεις. Επομένως κάθε γεγονός σχάσης προκαλεί επιπλέον σχάση. Αν κάποιος πυρήνας δεν προκαλέσει γεγονός σχάσης τότε η αντίδραση σταματάει.

Στην περίπτωση ενός πυρηνικού αντιδραστήρα, έχουμε αργή και ελεγχόμενη αλυσιδωτή αντίδραση ενώ στην περίπτωση ενός πυρηνικού όπλου έχουμε μια πολύ γρήγορη και εκρηκτική αντίδραση. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε μια κρίσιμη μάζα ευσχάσιμου υλικού τέτοια ώστε να υπάρχει τουλάχιστον ένα γεγονός σχάσης. Στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείτε μια υπερκρίσιμη μάζα οπότε έχουμε εκθετική αύξηση των φαινομένων σχάσης άρα και τις παραγόμενης ενέργειας. Ο συντελεστής πολλαπλασιασμού,  $K$ , δείχνει τον μέσο αριθμό παραγομένων νετρονίων που θα προκαλέσουν επιπλέον σχάση. Μια κρίσιμη μάζα έχει  $K=1$  και μια υπερκρίσιμη έχει  $K>1$ . (YOUNG, 1994)



Εικόνα 15 : Σχηματική αναπαράσταση αλυσιδωτής αντίδρασης (YOUNG, 1994)

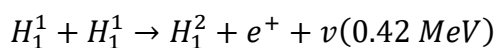


## 2.8 Πυρηνική σύντηξη

Κατά την πυρηνική σύντηξη δυο ή περισσότεροι μικροί ή ελαφριοί πυρήνες έρχονται σε επαφή και σχηματίζουν ένα νέο, μεγαλύτερο, πυρήνα. Η φιλοσοφία της αντίδρασης αυτής είναι παρόμοια με την σχάση καθώς η ενέργεια που εκλύεται οφείλεται στην ενέργεια σύνδεσης των νουκλεονίων.

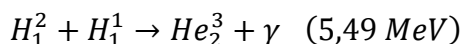
Από την καμπύλη [ενέργειας σύνδεσης](#) βλέπουμε πως η καμπύλη είναι πιο απότομη στο αριστερό μέρος της, που υποδηλώνει πως η μεγαλύτερη ενέργεια ανά νουκλεόνιο προέρχεται από την σύντηξη του υδρογόνου. Στο σύμπαν, οι αντιδράσεις σύντηξης που τροφοδοτούν τους μεγάλους αστέρες όπως τον Ήλιο, πράγματι ξεκίνησαν από την σύντηξη του  $H_2$ , κατά την οποία, σχηματίζεται το δευτέριο. Κατά την αντίδραση αυτή εκπέμπεται επιπλέον ένα ποζιτρόνιο ένα νεutrίνο και 0,42 MeV ενέργειας ως εξής :

*Εξίσωση 3*



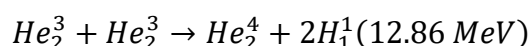
Το δευτέριο συντήκεται πάλι και γίνεται Ηλιο-3 και ακτινοβολία γάμμα :

*Εξίσωση 4*



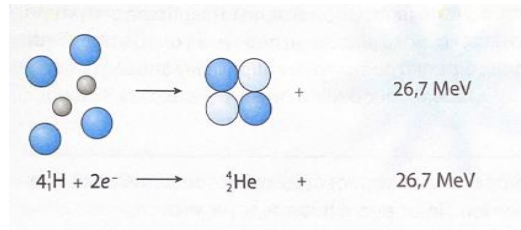
Στη συνέχεια δυο πυρήνες ηλίου-3 αντιδρούν και σχηματίζουν ηλιο-4 και ζεύγος πρωτονίων ως εξής :

*Εξίσωση 5*



Τέλος το ποζιτρόνιο εξαϋλώνεται με ένα ηλεκτρόνιο και παράγει 1,022 MeV.

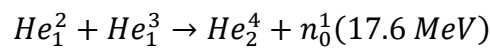
Αυτές οι αντιδράσεις συνιστούν έναν κύκλο πρωτονίου-πρωτονίου. Οι πρώτες δυο αντιδράσεις λαμβάνουν χωρά δυο φορές. Επομένως, το πλήρες αποτελέσματα είναι η μετατροπή τεσσάρων πρωτονίων και δυο ηλεκτρονίων σε έναν πυρήνα Ηλιου-4 και 26,7 MeV.



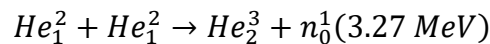
Εικόνα 16 Καθαρό αποτέλεσμα αντίδρασης πρωτονίου-πρωτονίου (Wolfson, 2020)

Καθώς ο κύκλος αυτός δεν μπορεί να λάβει χώρα εύκολα, οι μελέτες για την σύντηξη επικεντρώνονται σε κύκλους βαρύτερων ισοτόπων του υδρογόνου όπως Δευτέριου-Δευτέριου (D-D) και Δευτέριου-Τρίτιου (T-D) και είναι οι εξής :

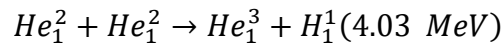
*Εξίσωση 6 Αντίδραση D-T*



*Εξίσωση 7 Αντίδραση D-D*



*Εξίσωση 8 Αντίδραση D-D*



Τα αποτελέσματα της αντίδρασης D-D είναι σχεδόν ισοπίθانا να συμβούν.

Προφανώς η ηλεκτρική άπωση μεταξύ των πυρήνων πρέπει να ξεπεραστεί για να έχουμε φαινόμενο σύντηξης. Αυτό στην πράξη σημαίνει πως πρέπει να επιτύχουμε μεγάλες ταχύτητες σωματιδίων, το οποίο συνεπάγεται με μεγάλη θερμοκρασία. Σε θερμοκρασία σύντηξης, τα ηλεκτρόνια, αποκολλώνται από τον πυρήνα και πλέον το υλικό αποτελεί πλάσμα. Είναι φανερό πως πρέπει αυτή η τεράστια θερμοκρασία να μπορέσει να περιοριστεί για να αξιοποιηθεί η ενέργεια σύντηξης.

Οι μεγάλοι αστέρες όπως ο Ήλιος, επιτυγχάνουν τα παραπάνω, χάρη στο τεράστιο βαρυτικό πεδίο τους. Έτσι έχουν ταυτόχρονα συμπίεση υλικού σε θερμοκρασία σύντηξης ( 15 MK ) αλλά και τον περιορισμό αυτού.

Στην Γη όμως για να πέτυχουμε αυτό το αποτέλεσμα χρειάζεται ακόμα μεγαλύτερη θερμοκρασία καθώς υπάρχουν απώλειες θερμότητας λόγω ακτινοβολίας. Η

θερμοκρασία κατά την οποία η ενέργεια που παράγεται υπερβαίνει την ενέργεια που χάνεται λόγω ακτινοβολίας ονομάζεται **κρίσιμη θερμοκρασία ανάφλεξης**.

- Για τις αντιδράσεις D-D είναι περίπου 600 MK
- Για τις αντιδράσεις D-T είναι περίπου 50 MK

Επίσης, για την παραγωγή καθαρής ενέργειας από την σύντηξη θα πρέπει να μπορέσει να περιοριστεί το πλάσμα αρκετό χρόνο ώστε η ενέργεια που παράγεται να υπερβεί την ενέργεια που προσδόθηκε για την θέρμανση του πλάσματος. (YOUNG, 1994)

### 2.8.1 Κριτήριο Lawson

Με βάση το κριτήριο του Lawson, η απαιτούμενη θερμοκρασία εξαρτάται από τον αριθμό των πυρήνων και κατά επέκταση την πυκνότητα  $n$ . Όσο αυξάνεται η πυκνότητα τόσο αυξάνεται ο αριθμός των πυρήνων που ετοιμάζονται να συγκρουστούν καθώς και ο αριθμός των πυρήνων που είναι διαθέσιμοι να δεχθούν σύγκρουση. Επομένως έχουμε τετραπλασιασμό του ρυθμού σύντηξης. Η συνολική ενέργεια σύντηξης εκφράζεται από την σχέση :

$$n^2 * t$$

όπου  $t$  είναι ο χρόνος περιορισμού.

Κατά προσέγγιση το κριτήριο Lawson εκφράζεται ως εξής :

- $nt > 10^{22} \text{ S} / \text{m}^3$  , για σύντηξη D-D
- $nt > 10^{20} \text{ S}/\text{m}^3$  , για σύντηξη D-T

Η διαφορά της δύναμης κατά  $10^2$  δηλώνει πως είναι πιο εύκολη η πραγματοποίηση η σύντηξη D-T. Παρακάτω θα αναλυθούν οι τεχνολογίες πίσω από τους [αντιδραστήρες σύντηξης](#). (Wolfson, 2020)

## Κεφάλαιο 3: : Πυρηνικοί αντιδραστήρες

### 3.1 Πυρηνικοί αντιδραστήρες σχάσης

#### 3.1.1 Αρχές λειτουργίας

Ένας πυρηνικός αντιδραστήρας, χρησιμοποιεί μια ελεγχόμενη αλυσιδωτή αντίδραση με κρίσιμη μάζα ( $K=1$ ) σχάσιμου υλικού, ώστε να παράγεται σταθερή ενέργεια. Αυτή η ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού, ο οποίος περιστρέφει έναν

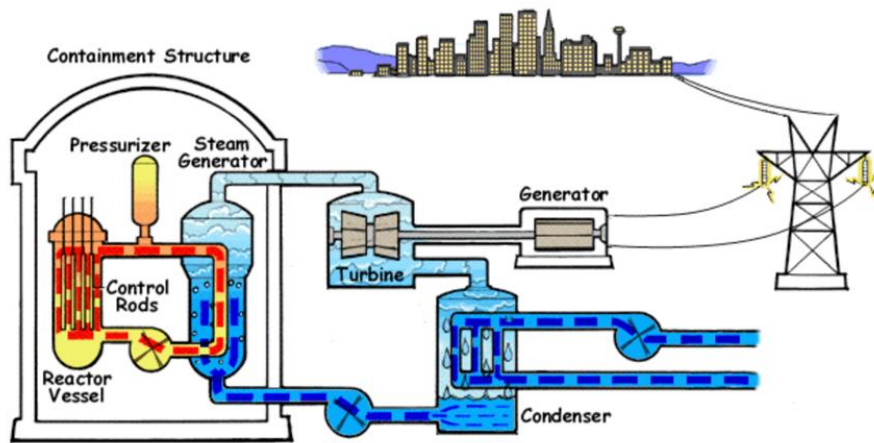
στρόβιλο ο οποίος είναι συνδεδεμένος με μια ηλεκτρική γεννήτρια. Κατά την σχάση του U-235 παράγονται περίπου 2.5 νετρόνια, επομένως, είναι προϋπόθεση ότι τα περισσότερα νετρόνια δεν πρέπει να προκαλέσουν σχάση. Για αυτό τον λόγο, κατασκευάζονται οι ράβδοι ελέγχου οι οποίοι ρυθμίζονται μέσα ή έξω από το καύσιμο και απορροφούν νετρόνια, ρυθμίζοντας έτσι το K.

Στους περισσότερους τύπους αντιδραστήρων τα νετρόνια χρειάζεται να επιβραδυνθούν για την αποτελεσματική πρόκληση σχάσης. Ο επιβραδυντής λύνει αυτό το πρόβλημα και είναι από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που ξεχωρίζουν τους αντιδραστήρες διαφορετικών σχεδιασμών. Εξίσου σημαντικό είναι και το ψυκτικό μέσο το οποίο απάγει την παραγομένη θερμότητα κατά την σχάση. Σε κάποιους αντιδραστήρες χρησιμοποιείται το νερό ως επιβραδυντής αλλά και ως ψυκτικό μέσο. (Wolfson, 2020)

## 3.2 Είδη αντιδραστήρων

### 3.2.1 Αντιδραστήρας ελαφρού ύδατος (*light-water reactors- LWR*)

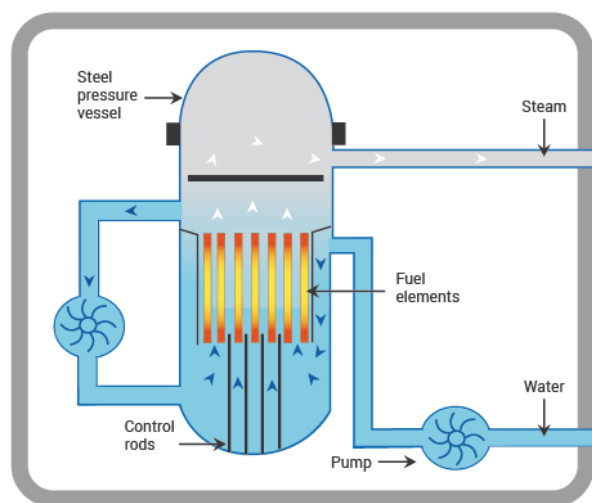
Αυτός ο σχεδιασμός αντιδραστήρα χρησιμοποιεί κοινό νερό. Τα πρωτόνια του υδρογόνου προκαλούν την επιβράδυνση των νετρονίων. Επίσης το νερό λειτουργεί και ως ψυκτικό μέσο και κυκλοφορεί μέσα στο δοχείο πίεσης όπου βρίσκεται το καύσιμο, δηλαδή οι ράβδοι ουράνιου. Το νερό ζεσταίνεται από την θερμότητα που παράγεται κατά την σχάση του ουρανίου και στην συνέχεια διοχετεύεται στην γεννήτρια ατμού. Ο παραγόμενος ατμός, κινεί ατμοστρόβιλο που συνδέεται με μια ηλεκτρική γεννήτρια. Μέσα στον θάλαμο πίεσης υπάρχουν και οι ράβδοι ελέγχου για την ρύθμιση της αποδιδόμενης ισχύος. Τέλος το νερό υγροποιείται πάλι και επιστρέφει στο δοχείο πίεσης ώστε να αναθερμανθεί. Το θετικό των *LWR* είναι πως η απώλεια ψυκτικού υγρού ισοδυναμεί με απώλεια και επιβραδυντή άρα η αλυσιδωτή αντίδραση διακόπτεται. Το αρνητικό είναι όμως πως το ελαφρύ ύδωρ απορροφά εύκολα νετρόνια επομένως το καύσιμο ουράνιο πρέπει να εμπλουτιστεί με U-235 ώστε να διατηρείται η αντίδραση. Ο ανεφοδιασμός ενός *LWR* μπορεί να διαρκέσει περισσότερο από ένα μήνα καθώς ο αντιδραστήρας πρέπει να κλείσει και το δοχείο του πυρήνα, να απομακρυνθεί. (World Nuclear Association, n.d.) (Wolfson, 2020)



Εικόνα 17 LWR για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (large.stanford.edu, χ.χ.)

### 3.2.2 Αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος ( Boiling water reactor - BWR)

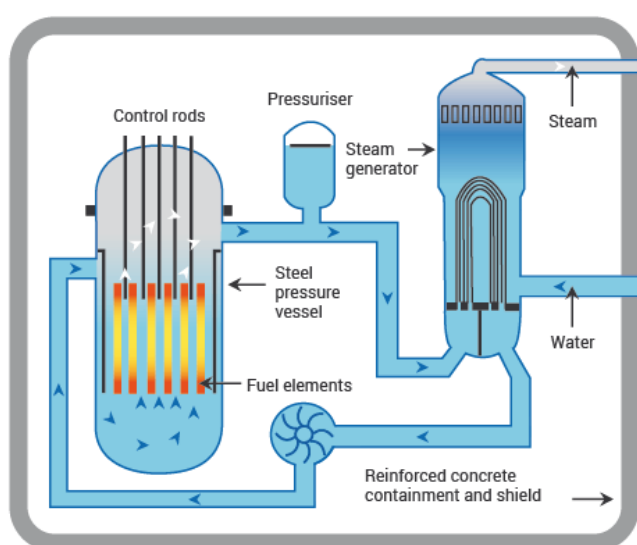
Είναι είδος αντιδραστήρα *LWR*, στο οποίο το νερό βράζει μέσα στο δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα (περίπου  $285^{\circ}\text{C}$ ), όπου βρίσκονται οι ράβδοι καυσίμου ουρανίου και οι ράβδοι ελέγχου. Επειδή το νερό βρίσκεται σε άμεση επαφή με το ουράνιο, επιμολύνεται με ραδιενέργεια οπότε υπάρχει ειδική προστασία στην ηλεκτρογεννήτρια για να υπάρχει ασφάλεια κατά την συντήρηση. Η ραδιενέργεια στο νερό όμως έχει πολύ μικρό χρόνο ημίσειας ζωής οπότε εξασθενεί σύντομα μετά την απενεργοποίηση του αντιδραστήρα.



Εικόνα 18 BWR (World Nuclear Association, n.d.)

### 3.2.3 Αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος ( *Pressurized water reactor – PWR* )

Είναι το πιο συνηθισμένο είδος αντιδραστήρα *LWR*. Περιέχει ένα κύριο βρόχο ψύξης που, το νερό ρέει μέσα στον πυρήνα του αντιδραστήρα υπό υψηλή πίεση και ένα δευτερεύον βρόχο, στον οποίο παράγεται ο ατμός που κινεί τον στρόβιλο της ηλεκτρογεννήτριας. Σε αντίθεση με τον *BWR*, το νερό δεν γίνεται ραδιενεργό, καθώς δεν έρχεται σε άμεση επαφή με τον πυρήνα. Ο σχεδιασμός προήλθε από εγκαταστάσεις πρόωσης υποβρυχίων και χρησιμοποιείται ευρέως για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και για την πρόωση σύγχρονων υποβρυχίων και πλοίων.

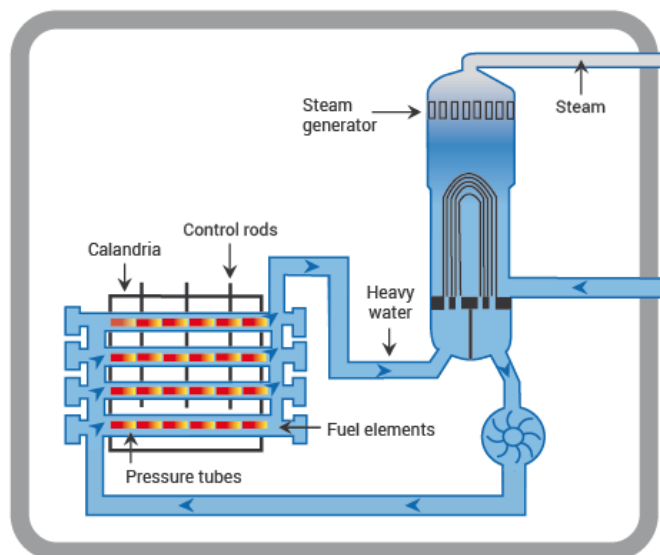


Εικόνα 19 PWR (World Nuclear Association, n.d.)

### 3.2.4 Αντιδραστήρας πεπιεσμένου βαρέος ύδατος-CANDU ( *Pressurized water reactor – PHWR* )

Ο Καναδικός σχεδιασμός *CANDU* (*Canada Deuterium Uranium*) περιέχει ως ψυκτικό αλλά και ως επιβραδυντικό μέσο βαρύ ύδωρ, δηλαδή οξείδιο του δευτερίου, που συμβολίζεται ως  $D_2O$ , ή  $^2H_2O$ . Αντί για δυο άτομα υδρογόνου και ένα οξυγόνο, που είναι το κανονικό μόριο νερού, περιέχει δυο άτομα του ισότοπου του υδρογόνου και ένα οξυγόνο. Λόγο της χαμηλής απορρόφησης νετρονίων, αυτό το είδος αντιδραστήρα μπορεί να λειτουργήσει και με φυσικό ουράνιο, χωρίς να χρειάζεται εμπλουτισμός. Έτσι εμπλουτίζεται το νερό αντί για το καύσιμο. Επίσης, επιτρέπει μερικό

ανεφοδιασμό απομονωμένων ράβδων χωρίς να χρειάζεται να κλείσει ολόκληρος ο αντιδραστήρας το οποίο τον καθιστά πιο αποδοτικό.

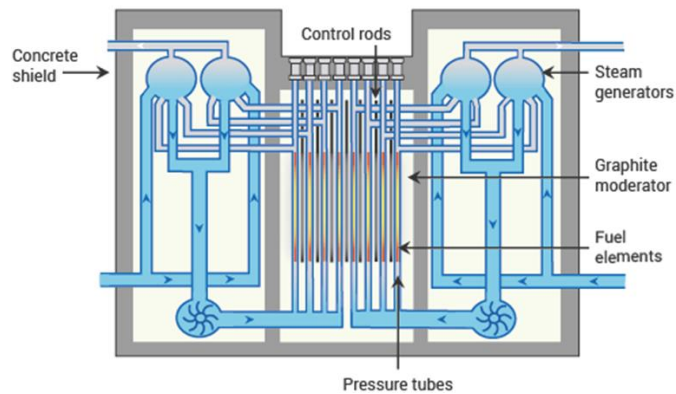


Εικόνα 20 PHWR/CANDU (World Nuclear Association, n.d.)

### 3.2.5 Αντιδραστήρας ελαφρού ύδατος με γραφίτη ως επιβραδυντή ( *Light water graphite-moderated reactor – LWGR* )

Είναι ένας παλαιότερος Σοβιετικός σχεδιασμός που χρησιμοποιεί γραφίτη ως επιβραδυντή. Χρησιμοποιείται για παραγωγή ενέργειας αλλά και πλουτωνίου για οπλικά συστήματα. Είναι ο τύπος αντιδραστήρα που χρησιμοποιήθηκε στο Τσερνόμπιλ. Χρησιμοποιεί σωλήνες πίεσης μήκους (7 μέτρων) που διατρέχουν ανάμεσα από το επιβραδυντή, γραφίτη, και ψύχεται με νερό, το οποίο αφήνεται να βράσει στον πυρήνα στους 300°C, όπως στους *BWR*. Οι ράβδοι καυσίμου αποτελούντε από, χαμηλά εμπλουτισμένο ουράνιο με μήκος 3,65 m Το ελάττωμα αυτού του σχεδιασμού είναι πως η απώλεια ψυκτικού μέσου, δεν ισοδυναμεί με την παύση της αλυσιδωτής αντίδρασης, ενώ ταυτόχρονα την επιταχύνει, λόγω της απώλειας του απορροφητικού υδρογόνου στο νερό.

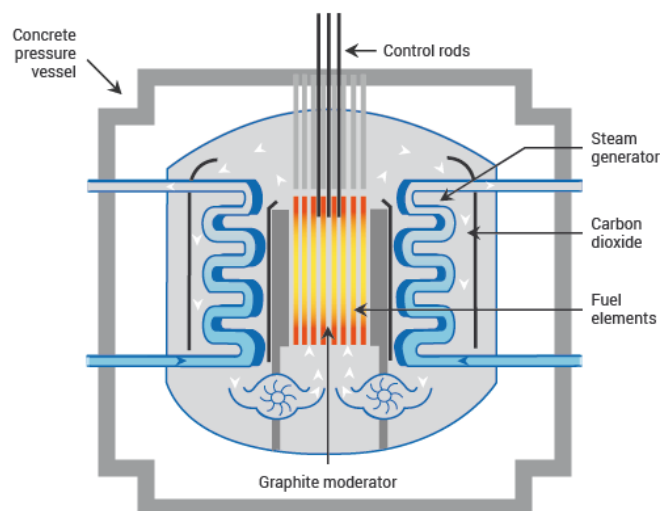
### A Light Water Graphite-moderated Reactor (LWGR/RBMK)



Εικόνα 21 RBMK (World Nuclear Association, n.d.)

### 3.2.6 Αερίψυκτοι αντιδραστήρες (Gas-cooled reactors – AGR)

Πρόκειται για Βρετανικό σχεδιασμό αντιδραστήρα, έχει επιβραδυντή γραφίτη και αέριο διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) ως κύριο ψυκτικό μέσο. Για καύσιμο χρησιμοποιεί, σφαιρίδια εμπλουτισμένου οξειδίου του ουρανίου, που βρίσκονται μέσα σε σωλήνες χάλυβα. Περιμετρικά, υπάρχει το κύκλωμα του διοξειδίου του άνθρακα που κυκλοφορεί μέσα στον πυρήνα, το οποίο θερμαίνεται στους  $650^\circ\text{C}$  και παράγει ατμό. Οι ράβδοι ελέγχου βρίσκονται αναμεσα στον γραφίτη και υπάρχει ένα δευτερεύον σύστημα τερματισμού λειτουργίας το οποίο προσθέτει άζωτο στο ψυκτικό για την διακοπή της αλυσιδωτής αντίδρασης.



Εικόνα 22 AGR (World Nuclear Association, n.d.)



### 3.2.7 Αντιδραστήρας ταχέων νετρονίων ( *Fast neutron reactor – FNR* )

Έχουν κύριο χαρακτηριστικό ότι δεν χρησιμοποιούν επιβραδυντή καθώς εκμεταλλεύονται τα ταχεία νετρόνια. Χρησιμοποιούν για καύσιμο το ισότοπο U-235 και παράγουν το ευσχάσιμο PU-239. Εκμεταλλεύονται ως και 60 φορές περισσότερο την ενέργεια του αρχικού ουρανίου, αλλά είναι πιο ακριβή η κατασκευή τους. Εκτός από την παραγωγή ενέργειας μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να παράγουν περισσότερο πλουτόνιο από ότι καταναλώνουν. Για αυτό είναι γνωστοί και ως παραγωγικοί αντιδραστήρες.

## 3.3 Πυρηνικοί αντιδραστήρες σύντηξης

### 3.3.1 Αρχές λειτουργίας

Οι τεχνολογίες αντιδραστήρων σύντηξης βασίζονται στις δυο διαφορετικές πτυχές του κριτηρίου *Lawson*. Η σύντηξη με αδρανειακό περιορισμό επιτυγχάνει μεγαλύτερες τιμές πυκνότητας σε πολύ μικρό χρόνο περιορισμού. Ο χρόνος είναι τόσο σύντομος που αυτό που κρατάει τα σωματίδια περιορισμένα, είναι η ίδια τους η αδράνεια. Η σύντηξη με μαγνητικό περιορισμό από την άλλη, έχει στόχο να διατηρεί χαμηλής πυκνότητας πλάσμα σε ένα δοχείο με μαγνητικό πεδίο το οποίο μειώνει την δυνατότητα διαφυγής του πλάσματος ενώ ταυτόχρονα διατηρεί ένα σχετικά μεγάλο χρόνο περιορισμού. (Wolfson, 2020)

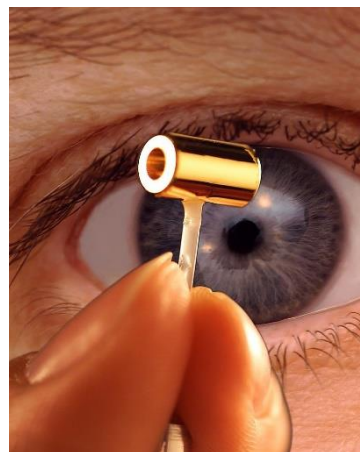
### 3.3.2 Αντιδραστήρας σύντηξης με αδρανειακό περιορισμό ( *Inertial confinement* )

Ένας αντιδραστήρας με αδρανειακό περιορισμό χρησιμοποιεί παλμούς από ακτίνες λέιζερ πολύ υψηλής ενέργειας για να ζεστάνει ένα πολύ μικρό σφαιρίδιο καυσίμου (μερικά χιλιοστά ). Το καύσιμο συνήθως είναι σφαιρίδιο D-T (Deuterium-Tritium) το οποίο βρίσκεται σε ένα δοχείο χρυσού. Κατά την θέρμανση εκρήγνυται και αποβάλλει ενέργεια και ακτίνες X, δηλαδή το καύσιμο έρχεται σε κατάλληλη πυκνότητα και θερμοκρασία ώστε να συντηχθεί.

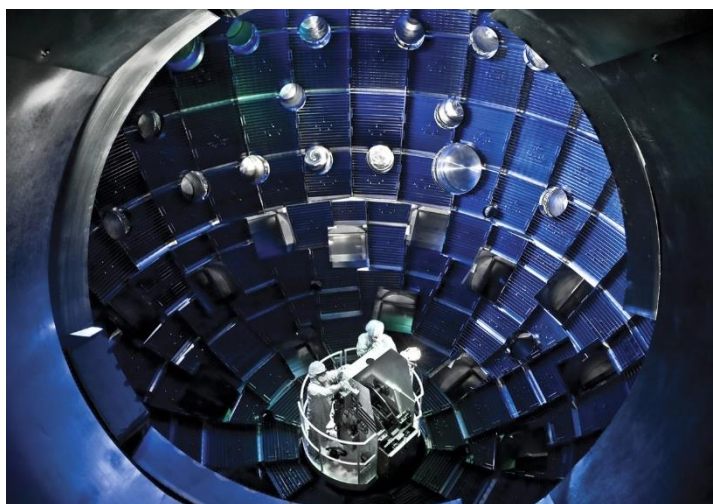
Το πιο δυνατό λέιζερ στον πλανήτη μας βρίσκεται στην Εθνική Εγκατάσταση Ανάφλεξης (*National Ignition Facility – NIF*) . Χρησιμοποιεί 192 δέσμες λέιζερ και στέλνει έναν παλμό ενέργειας 1.9 MJ που διαρκεί 20 ns σε έναν θάλαμο χρυσού που περιέχει στόχο D-T. Κατά την διάρκεια του συντόμου παλμού η ισχύς του λέιζερ φτάνει τα 500 TW.



Εικόνα 24: Σφαιρίδιο καυσίμου D-T (Wikipedia, χ.χ.)



Εικόνα 23 Θάλαμος χρυσού (Wikipedia, χ.χ.)



Εικόνα 25 Ο θάλαμος του NIF για την σύντηξη (cdn.theatlantic, χ.χ.)

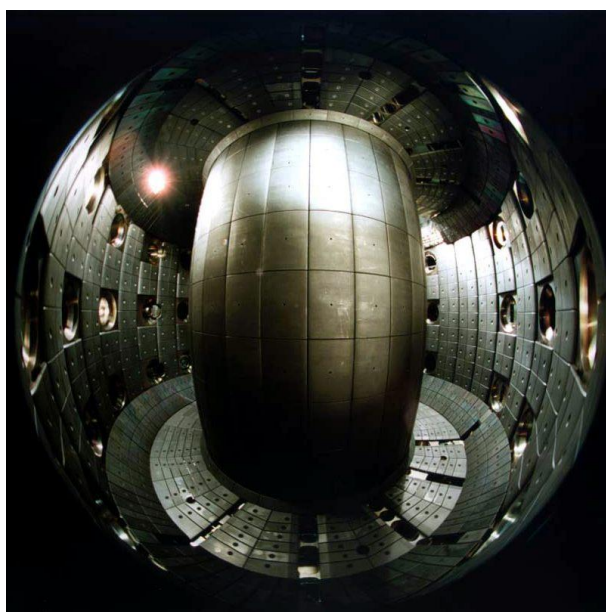
Οι σκοποί του *NIF*, εκτός από την επίτευξη πυρηνική σύντηξης, είναι και η μελέτη της ύλης κάτω από ακραίες συνθήκες καθώς και η προσομοίωση εκρήξεων πυρηνικών οπλών, χωρίς να γίνονται στην πραγματικότητα πυρηνικές δοκιμές.

Το εμπόδιο που πρέπει να ξεπεραστεί για να είναι βιώσιμο αυτό το σύστημα είναι η ενέργεια της σύντηξης να ξεπερνάει την ενέργεια δέσμης του λέιζερ. Αυτό το εμπόδιο είναι αρκετά δύσκολο να ξεπεραστεί, καθώς μια ριπή λέιζερ για να προετοιμαστεί χρειάζεται πολλές μέρες.

Το 2021 το NIF κατάφερε για πρώτη φορά, η παραγόμενη ενέργεια να ξεπεράσει την προσδοκώμενη φτάνοντας στα 1.3 MJ. Είναι ένα ορόσημο για την αδρανειακή σύντηξη, όμως ακόμα ο δρόμος είναι μακρής για να μπορέσει να γίνει αξιοποιήσιμη αυτή η ενέργεια. (LLNL, 2021)

### 3.3.3 Αντιδραστήρας σύντηξης με μαγνητικό περιορισμό ( *Magnetic confinement* )

Αυτός ο τύπος αντιδραστήρα, χρησιμοποιεί ένα δοχείο, όπου εσωτερικά βρίσκεται το πλάσμα, σε ένα μαγνητικό πεδίο. Στόχος είναι, να παγιδεύσει τα σωματίδια και να μένουν μακριά από τα τοιχώματα του δοχείου, που είναι σχετικά κρύο.



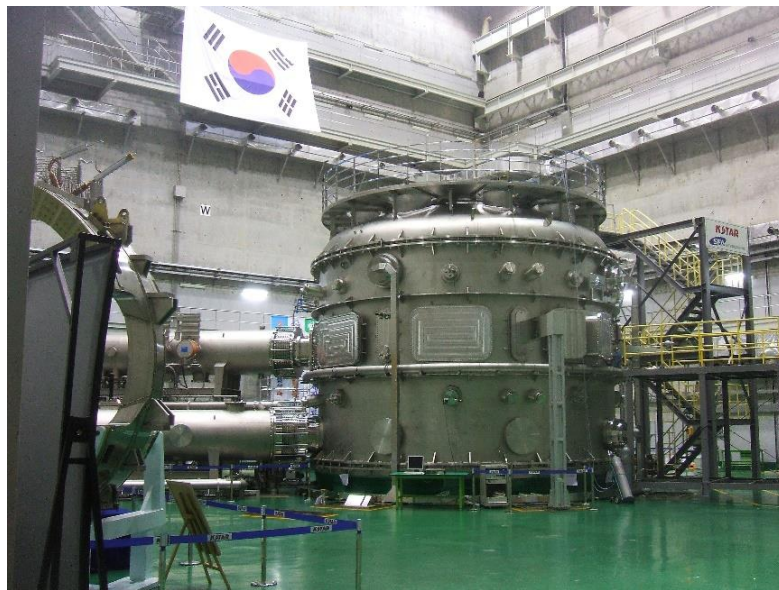
Εικόνα 26 Αντιδραστήρας tokamak (Wikipedia, χ.χ.)

Η πιο γνωστή συσκευή μαγνητικής δέσμησης είναι το Ρωσικό *tokamak*. Έχει τοξοειδές σχήμα, ώστε οι μαγνητικές γραμμές να μην ακουμπούν ποτέ τα τοιχώματα, μειώνοντας έτσι τις απώλειες.

Ο Γαλλικός αντιδραστήρας σύντηξης *International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)* αναμένεται να είναι ο πρώτος του οποίου, η παραγόμενη ενέργεια, θα

υπερβαίνει την ενέργεια θέρμανσης του πλάσματος. Κατά την εγγραφή αυτής της εργασίας, ο *ITER* είναι προγραμματισμένος να ξεκινήσει τα πειράματά του, το 2025.

Το 2020 ο αντιδραστήρας *KSTAR* (*Korea Superconducting Tokamak Advanced Research*) κατάφερε να διατηρήσει πυρηνική σύντηξη για 30 δευτερόλεπτα σε θερμοκρασία 100 MK. Το πείραμα διακόπηκε λόγω της αδυναμίας των υλικών. Οι επιστήμονες έχουν στόχο μέχρι το 2025 να φτάσουν τα 300 δευτερόλεπτα. (New Scientist, 2022)



Εικόνα 27 Αντιδραστήρας *KSTAR* (Wikipedia, χ.χ.)

## Κεφάλαιο 4: Μικροί αντιδραστήρες (Small modular reactors SMR)

### 4.1 Εισαγωγή

Σε μια παγκόσμια διάσκεψη για την κλιματική αλλαγή το 2019 αποκαλύφθηκε πως πολλά κράτη μέλη θεωρούν τους *Small Modular Reactors*, ως μια πιθανή βιώσιμη επιλογή πυρηνικής ενέργειας ώστε να καταπολεμηθεί η κλιματική αλλαγή. (S.E. Hirdaris, et al., 2014)

Σήμερα λόγω του αυξημένου κόστους παραγωγής ενός αντιδραστήρα και την ανάγκη εξυπηρέτησης μικρότερων δικτύων, υπάρχει κινητικότητα από την βιομηχανία προς την ανάπτυξη μικρότερων μονάδων. Οπότε ανάλογα με την ενεργειακή ανάγκη του δικτύου, θα τοποθετείται και ο επιθυμητός αριθμός μονάδων *SMR*. Μια τέτοια επένδυση θα ήταν πολύ πιο ασφαλής καθώς έχει μικρότερο κόστος από έναν παραδοσιακό αντιδραστήρα. (Ingersoll & Carelli, 2021)

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (*International Atomic Energy Agency – IAEA*), ως μικροί αντιδραστήρες θεωρούνται εκείνοι, με ηλεκτρική ισχύ μικρότερη από 300 MWe ( Ηλεκτρικά Μεγαβάτ ), ενώ μεσαίου μεγέθους είναι αντιδραστήρες με ισοδύναμη ηλεκτρική ισχύ μεταξύ 300 και 700 MWe. Ο όρος “*Modular*” (ή αρθρωτός ) υποδηλώνει πως αυτοί οι αντιδραστήρες μπορούν να παραχθούν σε εργοστασιακά κομμάτια, τα οποία προέρχονται από γραμμές παραγωγής. Έτσι μειώνεται το κόστος κατασκευής καθώς και ο χρόνος παραγωγής κάθε αντιδραστήρα και το κόστος τοποθέτησης.

Πολλές φορές, στην βιβλιογραφία, οι έννοιες των *Small Reactors* και των *Small Modular Reactors* είναι ταυτόσημες, παρόλο που αναφέρονται σε διαφορετικά είδη αντιδραστήρων.

Με βάση την Παγκόσμια Ένωση Πυρηνικής Ενέργειας (*World Nuclear Association*) τα χαρακτηριστικά των *SMR* είναι τα παρακάτω :

- Μικρή παραγωγή ισχύος ( έως 300 MWe) και συμπαγής αρχιτεκτονική. Παθητικά συστήματα ασφάλειας ώστε να υπάρχει μικρότερη ανάγκη για δράση σε περίπτωση βλάβης.
- Η συμπαγής αρχιτεκτονική επιτρέπει κατασκευή σε εργοστασιακά κομμάτια, σε γραμμή παραγωγής, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε μια συνολικά ποιοτικότερη κατασκευή.
- Η μικρότερη παραγόμενη ισχύς σημαίνει πως έχουν μικρότερο πυρήνα αντιδραστήρα.
- Προσφέρουν, τη δυνατότητα τοποθέτησης στο υπέδαφος, έχοντας έτσι επιπρόσθετη ασφάλεια σε φυσικά φαινόμενα όπως σεισμούς και τσουνάμι καθώς και ανθρωπογενής παράγοντες όπως, τρομοκρατικές επιθέσεις.
- Δυνατότητα τοποθέτησης πολλαπλών μονάδων ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες της περιοχής.
- Δυνατότητα αφαίρεσης μονάδας αντιδραστήρα ή παροπλισμού επιτόπου στο τέλος τις διάρκειας ζωής του. (World Nuclear Association, 2022)

Τα σχέδια *SMR* που βρίσκονται υπό ανάπτυξη είναι τα εξής :

- Υδροψυκτοι αντιδραστήρες
- Υψηλής θερμοκρασίας αερόψυκτοι αντιδραστήρες
- Αντιδραστήρες υγρού μετάλλου
- Αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων που ψύχονται με νάτριο και αέριο.
- Αντιδραστήρες τετηγμένου άλατος
- Μικρό-αντιδραστήρες

Ο πρώτος *SMR* τέθηκε σε λειτουργία το 2020 στην Ρωσία. Η πλωτή εξέδρα παραγωγής ενέργειας *Akademik Lomonosov* χρησιμοποιεί δυο μονάδες *KLT-40S/ PWR*, που αποδίδουν ισχύς 35 MWe ο καθένας. (Wikipedia/Akademik Lomonosov, n.d.)



Εικόνα 28 Πλωτή εξέδρα *Akademik Lomonosov* (Wikipedia, 2022)

Ακολουθούν αναλυτικά οι πίνακες με όλους τους *SMR* καθώς και τα στάδια κατασκευής τους με βάση την Παγκόσμια Ένωση Ατομικής Ενέργειας.

Πίνακας 2 *SMR* και τα στάδια κατασκευής τους (ADVANCES IN SMALL MODULAR REACTOR TECHNOLOGY DEVELOPMENTS, 2020)

Σχέδιο	Ισχύς MW(e)	Τύπος	Σχεδιαστές	Χώρα	Κατάσταση
<b>PART 1: WATER COOLED SMALL MODULAR REACTORS (LAND BASED)</b>					
<b>CAREM</b>	30	PWR	CNEA	Argentina	<b>Under construction</b>
<b>ACP100</b>	100	PWR	CNNC	China	<b>Detailed Design</b>
<b>CANDU SMR</b>	300	PHWR	Candu Energy Inc (SNC- Levelin Group)	Canada	<b>Conceptual Design</b>

<b>CAP200</b>	200	PWR	SNERDI/SPIC	China	<b>Conceptual Design</b>
<b>DHR400</b>	400	LWR	CNNC	China	<b>Basic Design</b>
<b>HAPPY200</b>	200	PWR	SPIC	China	<b>Detailed Design</b>
<b>TEPLATORTM</b>	50	HWR	UWB Pilsen & CIIRC	Czech Republic	<b>Conceptual Design</b>
<b>NUWARD</b>	2 × 170	PWR	EDF, CEA, TA,	France	<b>Conceptual Design</b>
<b>IRIS</b>	335	PWR	IRIS Consortium	Multiple	<b>Basic Design</b>
<b>DMS</b>	300	BWR	Hitachi-GE Nuclear Energy	Japan	<b>Basic Design</b>
<b>IMR</b>	350	PWR	MHI	Japan	<b>Conceptual Design</b>
<b>SMART</b>	107	PWR	KAERI and K.A.CARE	Republic of Korea and	<b>Certified Design</b>
<b>RITM-200</b>	2 × 53	PWR	JSC "Afrikantov OKBM"	Russian	<b>Under Development</b>
<b>UNITHERM</b>	6.6	PWR	NIKIET	Russian	<b>Conceptual Design</b>
<b>VK-300</b>	250	BWR	NIKIET	Russian	<b>Detailed Design</b>
<b>KARAT-45</b>	45 - 50	BWR	NIKIET	Russian	<b>Conceptual Design</b>
<b>KARAT-100</b>	100	BWR	NIKIET	Russian	<b>Conceptual Design</b>
<b>RUTA-70</b>	70	PWR	NIKIET	Russian	<b>Conceptual Design</b>
<b>ELENA</b>	68	PWR	National Research Centre "Kurchatov	Russian Federation	<b>Conceptual Design</b>
<b>UK SMR</b>	443	PWR	Rolls-Royce and	United Kingdom	<b>Conceptual Design</b>
<b>NuScale</b>	12 × 60	PWR	NuScale Power Inc.	United States of America	<b>Under Regulatory Review</b>
<b>BWRX-300</b>	270 - 290	BWR	GE-Hitachi Nuclear Energy and Hitachi	United States of America, Japan	<b>Pre-licensing</b>
<b>SMR-160</b>	160	PWR	Holtec International	United States of America	<b>Preliminary Design</b>
<b>W-SMR</b>	225	PWR	Westinghouse Electric Company, LLC	United States of America	<b>Conceptual Design</b>
<b>mPower</b>	2 × 195	PWR	BWX Technologies, Inc	United States of America	<b>Conceptual Design</b>
<b>PART 2: WATER COOLED SMALL MODULAR REACTORS (MARINE BASED)</b>					
<b>KLT-40S</b>	2 × 35	PWR in Floating	JSC Afrikantov OKBM	Russian Federation	<b>In Operation</b>
<b>RITM-200M</b>	2 × 50	PWR in Floating	JSC Afrikantov OKBM	Russian Federation	<b>Under Development</b>
<b>ACPR50S</b>	50	PWR in Floating	CGNPC	China	<b>Conceptual Design</b>
<b>ABV-6E</b>	6-9	PWR in Floating	JSC Afrikantov OKBM	Russian Federation	<b>Final design</b>
<b>VBER-300</b>	325	PWR in Floating	<b>JSC Afrikantov OKBM</b>	<b>Russian Federation</b>	<b>Licensing Stage</b>

**SHELF**      **6.6**      **PWR in Immersed**      **NIKIET**      **Russian Federation**      **Detailed Design**

<b>PART 3: HIGH TEMPERATURE GAS COOLED SMALL MODULAR REACTORS</b>					
<b>HTR-PM</b>	210	HTGR	INET, Tsinghua	China	<b>Under</b>
<b>StarCore</b>	14/20	HTGR	StarCore Nuclear	Canada/UK/US	<b>Pre-Conceptual</b>
<b>GTHTR300</b>	100 -	HTGR	JAEA	Japan	<b>Pre-licensing</b>
<b>GT-MHR</b>	288	HTGR	JSC Afrikantov OKBM	Russian	<b>Preliminary Design</b>

<b>MHR-T</b>	4 ×	HTGR	JSC Afrikantov OKBM	Russian	<b>Conceptual Design</b>
<b>MHR-100</b>	25 –	HTGR	JSC Afrikantov OKBM	Russian	<b>Conceptual Design</b>
<b>PBMR-400</b>	165	HTGR	PBMR SOC Ltd	South Africa	<b>Preliminary Design</b>
<b>A-HTR-100</b>	50	HTGR	Eskom Holdings SOC	South Africa	<b>Conceptual Design</b>
<b>HTMR-100</b>	35	HTGR	Steenkampskraal Thorium Limited	South Africa	<b>Conceptual Design</b>
<b>Xe-100</b>	82.5	HTGR	X-Energy LLC	United States of America	<b>Basic Design</b>
<b>SC-HTGR</b>	272	HTGR	Framatome, Inc.	United States of America	<b>Conceptual Design</b>
<b>HTR-10</b>	2.5	HTGR	INET, Tsinghua	China	<b>Operational</b>
<b>HTTR-30</b>	30 (t)	HTGR	JAEA	Japan	<b>Operational</b>
<b>RDE</b>	3	HTGR	BATAN	Indonesia	<b>Conceptual Design</b>

#### **PART 4: FAST NEUTRON SPECTRUM SMALL MODULAR REACTORS**

<b>BREST-OD-300</b>	300	LMFR	NIKIET	Russian	<b>Detailed Design</b>
<b>ARC-100</b>	100	Liquid	ARC Nuclear Canada,	Canada	<b>Conceptual Design</b>
<b>4S</b>	10	LMFR	Toshiba Corporation	Japan	<b>Detailed Design</b>
<b>microURANUS</b>	20	LBR	UNIST	Korea,	<b>Pre-Conceptual</b>
<b>LFR-AS-200</b>	200	LMFR	Hydromine Nuclear	Luxembourg	<b>Preliminary Design</b>
<b>LFR-TL-X</b>	5~20	LMFR	Hydromine Nuclear	Luxembourg	<b>Conceptual Design</b>
<b>SVBR</b>	100	LMFR	JSC AKME	Russian	<b>Detailed Design</b>
<b>SEALER</b>	3	LMFR	LeadCold	Sweden	<b>Conceptual Design</b>
<b>EM2</b>	265	GMFR	General Atomics	United States of America	<b>Conceptual Design</b>
<b>Westinghouse LFR</b>	450	LMFR	Westinghouse Electric Company,	United States of America	<b>Conceptual Design</b>
<b>SUPERSTAR</b>	120	LMFR	Argonne National Laboratory	United States of America	<b>Conceptual Design</b>

#### **PART 5: MOLTEN SALT SMALL MODULAR REACTORS**

<b>Integral MSR</b>	195	MSR	Terrestrial Energy Inc.	Canada	<b>Conceptual Design</b>
<b>smTMSR-400</b>	168	MSR	SINAP, CAS	China	<b>Pre-Conceptual</b>
<b>CA Waste Burner 0.2.5</b>	20 MW(t)	MSR	Copenhagen Atomics	Denmark	<b>Conceptual Design</b>
<b>ThorCon</b>	250	MSR	ThorCon International	International Consortium	<b>Basic Design</b>
<b>FUJI</b>	200	MSR	International Thorium Molten Salt Forum	Japan	<b>Experimental Phase</b>
<b>Stable Salt Reactor -</b>	300	MSR	Moltex Energy	United Kingdom /	<b>Conceptual Design</b>
<b>LFTR</b>	250	MSR	Flibe Energy, Inc.	United States of America	<b>Conceptual Design</b>
<b>KP-FHR</b>	140	Pebble-bed salt-cooled	KAIROS Power, LLC.	United States of America	<b>Conceptual Design</b>



<b>Mk1 PB-FHR</b>	100	FHR	University of California at Berkeley	United States of America	<b>Pre-Conceptual Design</b>
<b>MCSFR</b>	<b>50 -</b>	<b>MSR</b>	<b>Elysium Industries</b>	<b>USA and</b>	<b>Conceptual Design</b>

#### PART 6: MICRO MODULAR REACTORS

<b>Energy Well</b>	8	FHTR	Centrum výzkumu	Czech Republic	<b>Pre-Conceptual</b>
<b>MoveluX</b>	3~4	Heat Pipe	Toshiba Corporation	Japan	<b>Conceptual Design</b>
<b>U-Battery</b>	4	HTGR	Urenco	United	<b>Conceptual Design</b>
<b>Aurora</b>	1.5	FR	OKLO, Inc.	United States	<b>Conceptual Design</b>
<b>Westinghouse</b>	2 -3.5	Heat Pipe	Westinghouse Electric	United States	<b>Under</b>
<b>MMR</b>	<b>5-10</b>	<b>HTGR</b>	<b>Ultra Safe Nuclear</b>	<b>United States</b>	<b>Preliminary Design</b>

## 4.2 Ανάλυση ειδών μικρών αντιδραστήρων

### 4.2.1 Υδροψυκτοι μικροί αντιδραστήρες ( *Light Water Reactors* )

Οι συγκεκριμένοι αντιδραστήρες έχουν ως ψυκτικό μέσο το νερό και έχουν το μικρότερο τεχνολογικά ρίσκο καθώς είναι παρόμοιοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται σήμερα. Περίπου το 80 % των εμπορικών αντιδραστήρων παγκοσμίως είναι τέτοιου τύπου, αυτή τη στιγμή. Επίσης έχουν χρησιμοποιηθεί και σε συστήματα προώσεις υποβρυχίων αλλά και πλοίων οπότε η τεχνολογία θεωρείται εδραιωμένη. Κατ' επέκταση αυτή η σχεδίαση έχει το μικρότερο επενδυτικό ρίσκο.

Οι περισσότεροι *SMR* που βρίσκονται σε στάδιο μελέτης ή είναι υπό κατασκευή είναι αντιδραστήρες Ελαφρού ύδατος ( *Light Water Reactors* ). Αν και όλοι έχουν κοινό χαρακτηριστικό το ψυκτικό μέσο κάποιοι έχουν και επιμέρους διαφορές. Οι σχεδιασμοί μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες.

- Έχουν παραδοσιακό δίκτυο σωληνώσεων - Συνδέει τον αντιδραστήρα με την γεννήτρια παραγωγής ατμού μέσω μεγάλων σωληνώσεων, όπως στους παραδοσιακούς μεγάλους αντιδραστήρες .
- Έχουν συμπαγές δίκτυο - Η γεννήτρια ατμού βρίσκεται εσωτερικά στο κέλυφος του αντιδραστήρα.
- Έχουν πλήρως εσωτερικό σχεδιασμό (Integral) – Τα περισσότερα ή όλα τα μέρη του δικτύου παραγωγής ατμού, βρίσκονται εσωτερικά στο κέλυφος του αντιδραστήρα. (Ingersoll & Carelli, 2021)

Πολλές χώρες έχουν ξεκινήσει να επικεντρώνονται στην παραγωγή *LWR SMR* τα τελευταία χρόνια. Στις ΗΠΑ τα σχέδια αντιδραστήρων *KLT*, *VBER* και *Holtec SMR* διαθέτουν παραδοσιακό βρόγχο όπου οι γεννήτριες ατμού είναι εξωτερικά από το δοχείο πίεσης. Τα σχέδια *B&W*, *Westinghouse* και *Nuscale* έχουν το δίκτυο ατμού εσωτερικά στο δοχείο πίεσης. Όλοι όμως έχουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε θέματα ασφάλειας σε σχέση με τους υπάρχοντες μεγάλους πυρηνικούς σταθμούς *LWR*. (World Nuclear Association, 2022)

Η Ρωσία έχει ήδη σε λειτουργία πλωτή εξέδρα που περιέχει δυο μονάδες *SMR KLT-40S*. Επίσης υπό αναπτύξει έχει και τα μοντέλα [\*RITM-200M\*](#) που θα σχολιασθούν στην Ενότητα 6.

#### 4.2.1.1 Αργεντινή : *Central Argentina de Elementos Modulares (CAREM)*

Ο αντιδραστήρας *CAREM* βρίσκεται υπό κατασκευή για αρκετά χρόνια και συζητήθηκε για πρώτη φορά σε συνέδριο της *IAEA* το 1984. Ο σχεδιασμός έχει εσωτερικό σχεδιασμό και φυσική ροή του βασικού ψυκτικού μέσου. Το πρότυπο σχέδιο έχει ισχύς 27 MWe, ενώ τα μοντέλα προς εργοστασιακή χρήση θα έχουν 150-300 MWe. Το σύστημα είναι σχεδιασμένο να αυτοσυντηρεί μόνο του την πίεση χωρίς να χρειάζεται ψεκασμό ή καυστηρά. Ο πυρήνας αποτελείται από 61 εξαγωνικές συνδεσμολογίες καυσίμου και 25 ράβδους ελέγχου. Το κύριο ψυκτικό υγρό κυκλοφορεί μέσα σε ελικοειδή σωληνώσεις που ανήκουν στις γεννήτριες ατμού. Στο δευτερεύον δίκτυο, το νερό τροφοδοσίας και ο παραγόμενος ατμός, συλλέγονται σε ένα δίκτυο σωληνώσεων, που βρίσκονται εσωτερικά στο δοχείο πίεσης. Το σύστημα *CAREM* διαθέτει συστήματα παθητικής ασφάλειας και προσφέρει περίοδο χάριτος 36 ώρες, μετά το ατύχημα, χωρίς να χρειάζεται κάποια ενέργεια από τον χειριστή.

Η Εθνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (*CNEA*) δέχθηκε την υποστήριξη της Αργεντινής το 2009, ώστε να χτίσει ένα πρότυπο σταθμό παραγωγής δίπλα στον είδη υπάρχον πυρηνικό σταθμό *Atucha*. Τα έργα ξεκίνησαν το 2014 και κατά την συγγραφή της παρούσα εργασίας είναι ακόμα υπό κατασκευή. (Argentina.gob, n.d.)

Είναι μεγάλη καινοτομία για την ανθρωπότητα, ως ο πρώτος *SMR* που μπαίνει σε στάδιο κατασκευής σε πυρηνικό σταθμό. Όλο το project είναι υπό την επίβλεψη της *CNEA* και τηρεί τα διεθνή στάνταρ ασφάλειας και ποιότητάς. Θεωρητικά, θα είναι οικονομικά βιώσιμη και καθαρή πηγή ενέργειας, αυτό μένει να αποδειχθεί και στην

πράξη. Η Αργεντινή κατά αυτή την έννοια θα μπορούσε να αποτελέσει το παράδειγμα προς μίμηση και για άλλες χώρες, ώστε σιγά σιγά η πυρηνική ενέργεια να είναι πιο προσιτή και να μην αντιμετωπίζεται με φόβο και ανασφάλεια. (Ingersoll & Carelli, 2021)



Εικόνα 29 Ο CAREM SMR υπό κατασκευή στο πυρηνικό σύμπλεγμα Atucha στην Αργεντινή (Argentina.gob, χ.χ.)

#### 4.2.1.2 Κίνα : ACP-100

Ο σχεδιασμός αυτός κατασκευάζεται από το *Nuclear Power Institute of China (NPIC)* για την *China National Nuclear Corporation (CNNC)*. Είναι επηρεασμένος από παλαιότερα μοντέλα αντιδραστήρων της ίδιας εταιρίας όπως τα *CNP-600* και *CNP-600/1000*. Η κυκλοφορία του ψυκτικού γίνεται μέσω εξωτερικών σωληνώσεων τοποθετημένες πάνω στο κέλυφος του αντιδραστήρα. Εξωτερικά επίσης βρίσκονται και οι μηχανισμοί που ελέγχουν τις ράβδους ελέγχου και ο συμπιεστής. Περιλαμβάνει 57 συνδεσμολογίες καυσίμου. Οι ράβδοι ελέγχου είναι από Βόριο και είναι βυθισμένες στο ψυκτικό υγρό.

Υπάρχουν ειδικές μπαταρίες ώστε να υπάρχει εφεδρική ενέργεια σε περίπτωση *black out*, καθώς και επαρκές νερό ώστε να το καύσιμο να έχει επαρκεί ψύξη για τουλάχιστον 7 μέρες. Η αρχική μελέτη των 100 MWe προοριζόταν για χρήση στο εσωτερικό της Κίνας, ώστε να προσφέρει μια εναλλακτική λύση στα παραδοσιακά εργοστάσια με γαιάνθρακες. Το *project* εγκρίθηκε το 2010 και το 2018 ολοκληρώθηκε η μελέτη

ασφάλειας . Το 2019 ξεκίνησε η κατασκευή ενός πρωτότυπου σταθμού για επίδειξη στην περιοχή Χαινάν. (Ingersoll & Carelli, 2021)

#### 4.2.1.3 Γαλλία : Flexblue

Αποτελεί ίσως τον πιο ιδιαίτερο σχεδιασμό από του εμπορικούς SMR που μελετήθηκαν καθώς ο συγκεκριμένος αντιδραστήρας είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί 50-100 μέτρα κάτω από το νερό. Το πάνω όριο των 50 μέτρων συμβάλει στην προστασία από καιρικά φαινόμενα ενώ το κάτω όριο των 100 μέτρων, προστατεύει από την υπερβολική πίεση της εξωτερικής κατασκευής, η οποία έχει διάστασης μήκους 146 m και διάμετρο 14 m.

Έχει αποδιδόμενη ισχύ 169 MWe και μπορούν τοποθετηθούν πολλές μονάδες μαζί. Η εγκατάσταση ελέγχου είναι στη στεριά και μπορούν να ελέγχονται μέχρι και 6 μονάδες ταυτόχρονα από το ίδιο δωμάτιο ελέγχου. Ένα φορτηγό πλοίο, με μεγάλο γερανό, χρησιμοποιείτε για την μεταφορά της μονάδας. Εκτιμάται πως θα χρειάζεται ανεφοδιασμό κάθε 2-3 χρόνια, κατά τον οποίο θα μεταφέρετε η μονάδα στην κεντρική εγκατάσταση για συντήρηση. Με παραπάνω μελέτη του φορτηγού πλοίου ίσως να μπορέσει να πραγματοποιείτε ο ανεφοδιασμός και από το ίδιο, στο σημείο λειτουργίας.

Πιο επιμελής συντήρηση εκτιμάται να συμβαίνει κάθε 10 χρόνια ( *Overhauling* ) και η συνολική διάρκεια ζωής της μονάδας θα είναι τα 60 χρόνια, όπου τότε η μονάδα θα μετακομισθεί σε ειδική εγκατάσταση αποσύνθεσης.

Είναι προφανές πως το θαλάσσιο περιβάλλον εκτός από την επιμέρους προστασία που επιφέρει, παρέχει και το απόλυτο και συνεχές ψυκτικό μέσο. Θα έχει ειδικά σύστημα παθητικής ασφάλειας ώστε σε περίπτωση ατυχήματος να μην χρειάζεται άμεσα ανταπόκριση από τον χειριστή. Το αρχικό σχέδιο εγκρίθηκε το 2016 αλλά αργότερα ακυρώθηκε και δεν προχώρησε στην υλοποίηση του. (Ingersoll & Carelli, 2021)

#### 4.2.1.4 ΗΠΑ : NuScale

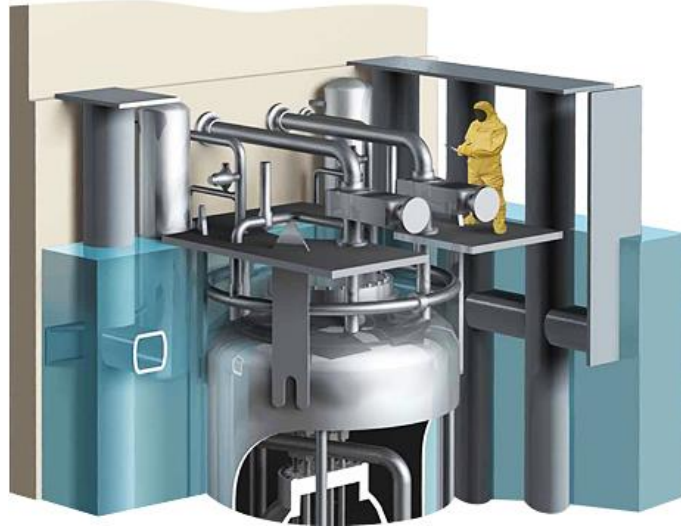
Το αρχικό σχέδιο ολοκληρώθηκε το 2003 από τις ερευνητικές ομάδες *Oregon State University (OSU)*, *Idaho National Engineering* και *Environmental Laboratory*. Το 2007 ιδρύθηκε η εταιρία *NuScale Power LLC* με σκοπό την υλοποίηση του σχεδίου SMR.

Ο πυρήνας αποτελείται από 37 συνδεσμολογίες καυσίμου και 16 ράβδους ελέγχου καθώς και διαλυμένο Βόριο εντός του ψυκτικού υγρού. Ο υπέρθερμος ατμός παράγεται σε δυο γεννήτριες ατμού με ελικοειδές πηνίο. Μια μονάδα παράγει 77 MWe ισχύς ενώ ένα εργοστάσιο NuScale θα είναι σχεδιασμένο να στεγάζει 12 μονάδες SMR. (Ingersoll & Carelli, 2021)



*Εικόνα 30 Γεννήτρια ατμού με ελικοειδές πηνίο NuScale (world nuclear news, 2014)*

Ο αντιδραστήρας βρίσκεται εντός ειδικού δοχείου υψηλής πίεσης από ατσάλι, το οποίο είναι βυθισμένο σε πισίνα με νερό. Όλες οι μονάδες βρίσκονται στην ίδια πισίνα, η οποία παρέχει στο σύστημα την κατάλληλη ψύξη. Το σύστημα περιέχει δικλείδα ασφάλειας σε περίπτωση ατυχήματος, η οποία προσφέρει πρακτικά άπειρο χρονικό περιθώριο μέχρι να χρειαστεί αντιμετώπιση από τον χειριστή. Η κάθε μονάδα έχει απομονωμένη γεννήτρια ατμού οπότε μπορεί να λειτουργεί, όσο οι άλλες, είναι σε κατάσταση ανεφοδιασμού. Η υπηρεσιακή διάρκεια ζωής εκτιμάται στα 60 χρόνια. (World Nuclear Association, 2022)



Εικόνα 31 Μονάδα ισχύος του NuScale SMR (World Nuclear Association, 2022)

Το 2015, η NuScale έλαβε χρηματοδότηση ύψους \$16,6 εκ, από το *U.S. Department of Energy* για το project που ονομάστηκε, *Carbon Free Power Project (CFPP)*. Το 2016 το σχέδιο εγκρίθηκε από την *Nuclear Regulatory Commission* ενώ η εκτίμηση της ασφάλειας και του κινδύνου της κατασκευής τέλειωσε το 2020. Το *DOE* ενέκρινε το πολυετές σχέδιο κατασκευής κόστους \$1,355 δις. Θα κατασκευαστή το πρωτότυπο εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας στο *Idaho National Laboratory Site*. Η πρώτη μονάδα *NuScale VOYGR-6* με ισχύ 462 MWe εκτιμάται πως θα μπει σε λειτουργία το 2029 ενώ το 2030 θα προστεθούν επιπλέον μονάδες, οπότε το εργοστάσιο θα είναι σε πλήρη λειτουργία. Το κόστος ενός εργοστασίου με 12 μονάδες εκτιμάται στα \$2850/kW ενώ η εταιρία έχει στόχο παραγωγή ενέργειας \$55/MWh (*levelized cost of electricity*) (NuScale Power, n.d.) (Carbon Free Power Project, n.d.)



Εικόνα 32 Η τοποθεσία του εργοστασίου Carbon Free Power Project (Carbon Free Power Project, χ.χ.)

Η *NuScale* έχει σκοπό να κάνει τους *SMR* προσιτούς σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς συνεργάζεται με πολλές χώρες, ώστε με την τεχνογνωσία της, να υλοποίηση παρόμοια *project* με το δικό της στο *Idaho*.

United States	Idaho: Carbon Free Power Project	Europe	Bulgaria: Kozloduy Nuclear Power Plant - New Build Plc
	Illinois: Sargent & Lundy		Czech Republic: ČEZ Group
	Minnesota: Xcel Energy Inc.		Poland: Getka Group
	Missouri: Associated Electric Cooperative Inc.		Poland: KGHM Polska Miedź S.A.
	Virginia: Enfission, LLC		Poland: Piela Business Engineering
	Washington: Grant County Public Utility District		Poland: UNIMOT S.A.
	Wisconsin: Dairyland Power Cooperative		Romania: Societatea Nationala Nuclearelectrica SA
Canada	NuScale Energy Exploration (E2) Center	Middle East	Ukraine: Energoatom
	Bruce Power, L.P.		Ukraine: State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety
	BWX Technologies		United Kingdom: Shearwater Energy, Ltd.
	Kinectrics Inc.		Jordan: Jordan Atomic Energy Commission
	Ontario Power Generation Inc.		Japan: JGC Holdings Corporation (JGC HD)
Prodigy Clean Energy	Kazakhstan: Kazakhstan Nuclear Power Plants LLP		
		Asia	Republic of Korea: Doosan Enerbility Co., Ltd.
			Republic of Korea: Samsung C&T Corporation, Doosan Enerbility Co., and GS Energy Corporation

Εικόνα 33 Όλα τα *project* της *NuScale* σε παγκόσμιο επίπεδο. (*NuScale Power*, χ.χ.)

#### 4.2.1.5 *Rolls-Royce SMR*

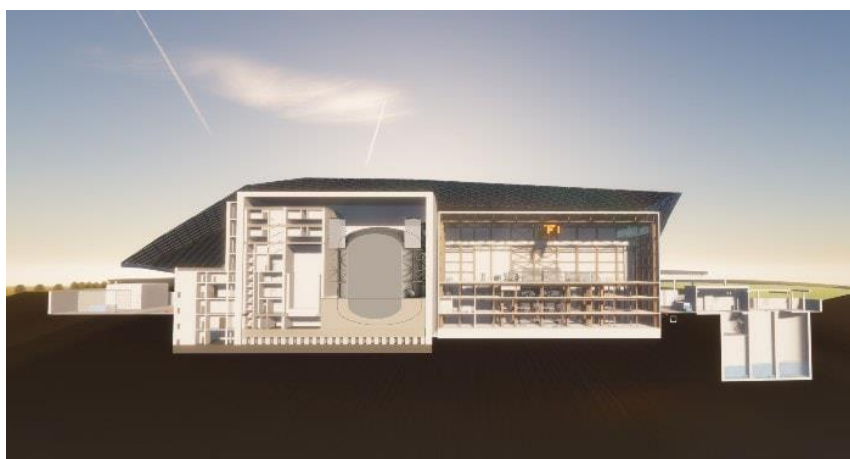
Η *Rolls-Royce* είναι από τους ευεργέτες των μικρών πυρηνικών αντιδραστήρων καθώς από το 1950 έχουν φτιάξει τρεις γενιές αντιδραστήρων σε υποβρύχια. Από το 2015, εργάζεται πάνω στον πρώτο *SMR* της. Αρχικά η μελέτη ξεκίνησε για έναν μικρό αντιδραστήρα παραγωγής 220 MWe αλλά μέχρι το 2021 το κατέληξε να είναι ένας μεσαίου μεγέθους αντιδραστήρας με ισχύ τουλάχιστον 470 MWe. (*Rolls-Royce SMR*, n.d.)

Το σύστημα διαθέτει τρεις βρόγχους και εξωτερικές γεννήτριες ατμού. Όπως όλοι οι *SMR* στόχος είναι να κατασκευάζεται σε εργοστάσιο και πιο συγκεκριμένα σε διάστημα 500 ημέρων και θα έχει διάρκεια ζωής 60 χρόνια. Ως καύσιμο θα

χρησιμοποιεί 4,95% εμπλουτισμένο καύσιμο με 121 ράβδους καυσίμου. Ο κύκλος ανεφοδιασμού εκτιμάται κάθε 18 με 24 μήνες.

Στους ήδη πολλούς συνεργάτες της *Rolls-Royce* ( *Assystem, Atkins, BAM Nuttall, Laing O'Rourke, National Nuclear Laboratory, Nuclear AMRC, Jacobs and The Welding Institute* ), το 2020 προστέθηκε και η αμερικανική *Exelon* με σκοπό να λειτουργήσει εκείνη, τον πρώτο SMR στο Ηνωμένο Βασίλειο. (World Nuclear Association, 2022)

Η κυβέρνηση του Ηνωμένου Βασιλείου έδωσε επιχορήγηση για το *project* £210 εκ. καθώς το θεωρούν πολύ σημαντικό βήμα για την επίτευξη του στόχου για μηδενικούς ρίπους μέχρι το 2050. Αναμένεται να δημιουργήσει 40000 θέσεις εργασίας. Το 80% της κατασκευής του SMR θα πραγματοποιηθεί σε εργασιακό περιβάλλον, πλήρως ελεγχόμενο, σε γραμμή παραγωγής του H.B. Μπορεί το εγχείρημα να είναι πρωτοποριακό αλλά βασίζεται σε ήδη εφαρμοσμένη τεχνολογία, οπότε υπάρχει ήδη μεγάλη τεχνογνωσία. Επίσης με την εμπειρία που θα αποκτήσει έχει σκοπό να στηρίζει και παγκόσμια project ώστε να δημιουργηθούν παρόμοια εργοστάσια σε όλο τον πλανήτη. Ήδη έχει υπογραφεί συμφωνία (*Memorandums of Understanding*) με την Εσθονία, την Τουρκία και την Τσεχία. Ο στόχος είναι να γίνει ελκυστική ιδέα προς ιδιωτικούς επενδυτές χωρίς να χρειάζεται κυβερνητική υποστήριξη για τους επομένους SMR. Η πρώτη μονάδα αναμένεται να τεθεί σε λειτουργία το 2030. Το 2021 το κόστος παραγωγής ήταν \$5100/kW και LCOE εκτιμήθηκε στα £35-50/MWh. (Ingersoll & Carelli, 2021)



Εικόνα 34 Σχέδιο του εργοστασίου SMR της Roll-Royce (*Rolls-Royce SMR, χ.χ.*)



#### 4.2.2 Μικροί Αεριοψυκτοι αντιδραστήρες ( *Gas cooled reactors - GCR*)

Όλοι οι *SMR* αυτού του τύπου που βρίσκονται υπό ανάπτυξη αυτή τη στιγμή, έχουν κύριο ψυκτικό μέσο το Ήλιο. Η Γερμάνια, οι Η.Π.Α , η Κίνα και η Ιαπωνία έχουν ήδη δοκιμαστικούς αντιδραστήρες.

Το πλεονέκτημα που έχει αυτό το είδος αντιδραστήρα σε σχέση με τους *LWR*, είναι πως το ψυκτικό μέσο όντας αέριο είναι μονοφασικό οπότε είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμο. Επιπροσθέτως, έχει κατά πολύ μεγαλύτερη θερμοκρασία λειτουργίας που φτάνει ακόμα και τους 700-800 °C, σε σχέση με τους 300-350 °C των *LWR*. Έτσι επιτυγχάνεται μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης κατά την μετατροπή της θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε περισσότερες βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

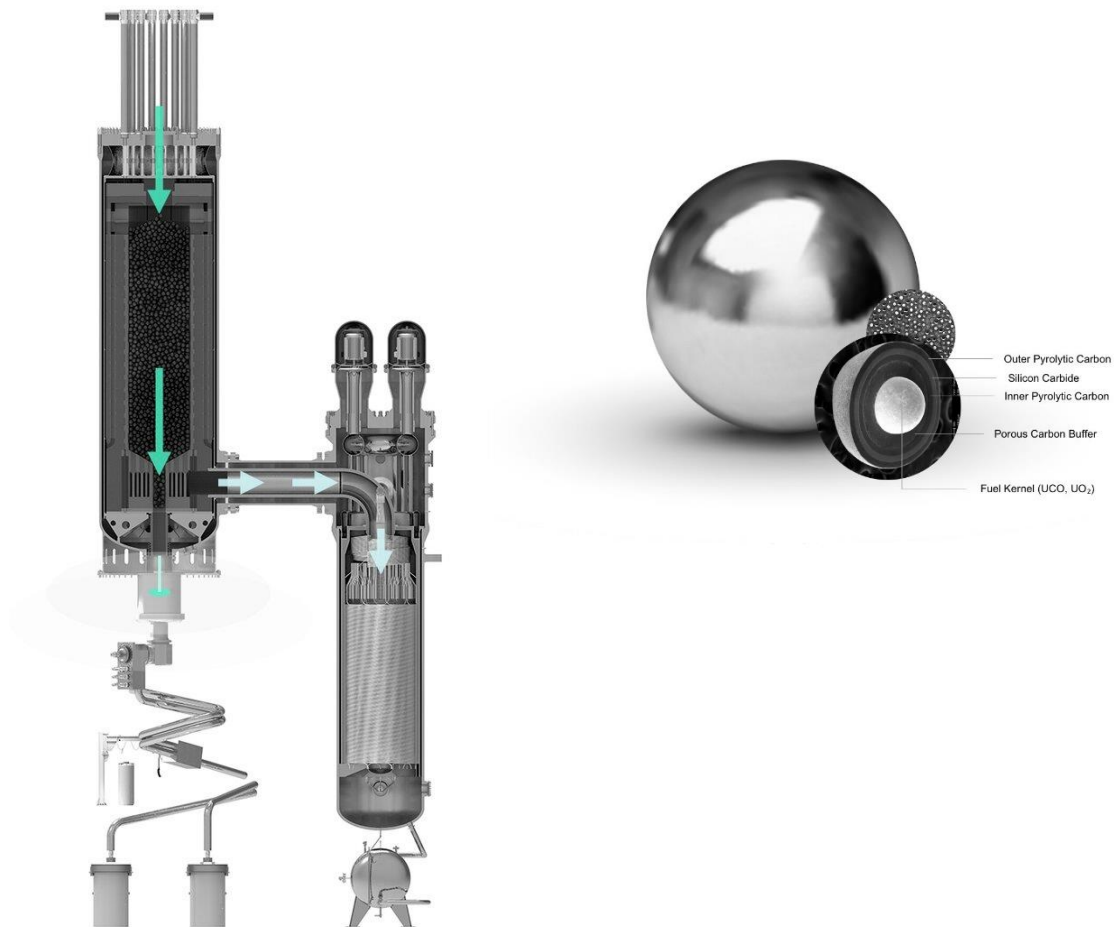
Το κύριο μειονέκτημα σε σχέση με τους *LWR* είναι πως το αέριο πρέπει να ωθείτε με πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα για να επιτυγχάνεται η σωστή ψύξη του πυρήνα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγαλύτερες διαφορές θερμοκρασίας της τάξης των 500 °C σε σχέση με τους 25-50 °C των *LWR*. Είναι προφανές πως αυτή η θερμική καταπόνηση παρακαλεί προβλήματα στις κατασκευαστικές αντοχές του κελύφους του αντιδραστήρα. (Ingersoll & Carelli, 2021)

Τα σχέδια *GCR SMR* χωρίζονται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με το είδος του καυσίμου :

1. Το καύσιμο βρίσκεται μέσα σε σφαιρίδια γραφίτη, περίπου στο μέγεθος μιας μπάλας μπιλιάρδου. Αυτά τα σφαιρίδια εισχωρούν και εκχωρούν από τον πυρήνα, ανάλογα με τις συνθήκες σχάσης για καλύτερη απόδοση.
2. Το καύσιμο είναι μέσα σε ράβδους, που είναι τοποθετημένοι σε ένα δοχείο πρισματικής διατομής από Γραφίτη. Αυτές οι ράβδοι καυσίμου, εισχωρούν στον πυρήνα με παρόμοιο τρόπο όπως στους *LWR* .

##### 4.2.2.1 Η.Π.Α : X-Energy Xe-100

Η *X-Energy* εργάζεται πάνω σε έναν *SMR* με σφαιρίδια καυσίμου και Ήλιο ως ψυκτικό μέσο. Ο *Xe-100* έχει αποδιδόμενη θερμική ισχύ 200 MW και το δοχείο πίεσης έχει κυλινδρικό σχήμα. Η θερμοκρασία λειτουργίας ανέρχεται στους 750 °C και παράγει ηλεκτρική ισχύ 80 MWe. Επίσης μπορούν να τοποθετηθούν συνολικά τέσσερις μονάδες, για συνολική ισχύς 320 Mwe. Ο αντιδραστήρας παράγεται εξ' ολοκλήρου σε εργοστασιακό περιβάλλον και μεταφέρετε στο σημείο τοποθέτησης μέσω οδικού



δικτιού. Υπηρεσιακή διάρκεια ζωής εκτιμάται στα 60 χρόνια. (Ingersoll & Carelli, 2021)

Τα σφαιρίδια καυσίμου, *TRISO* ( *tri-structural isotropic* ) έχουν στο εσωτερικό τους δεκάδες χιλιάδες σφαιρίδια καυσίμου από Καρβίδια και Οξείδια του Ουρανίου ( $UCO$ ,  $UO_2$ ) και υπάρχουν επιπλέον τέσσερις στρώσεις υλικού για την κατάλληλη προστασία από την ραδιενέργεια.

Κατά την λειτουργία του αντιδραστήρα, τα σφαιρίδια καυσίμου εισέρχονται και εξέρχονται συνέχεια από τον πυρήνα ανάλογα με το αν έχουν υποστεί σχάση. Σε όλο το δοχείο πίεσης, περνάει αέριο Ήλιο και προσφέρει κατάλληλη ψύξη. Στη συνέχεια το θερμαινόμενο Ήλιο, περνάει από την γεννήτρια ατμού η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η κρισιμότητα, ελέγχεται με κατάλληλες ράβδους ελέγχου. Έχει παθητικό σύστημα ασφάλειας το οποίο δίνει 7 μέρες περίοδο χάριτος μετά από ατύχημα χωρίς

Εικόνα 36 Αντιδραστήρας XE-100 (X-Energy, χ.χ.)

Εικόνα 35 Σφαιρίδιο καυσίμου TRISO (X-Energy, χ.χ.)

να χρειάζεται κάποια ενέργεια. Η κατασκευή του πρώτου αντιδραστήρα εκτιμάται ότι θα ξεκινήσει το 2025. (x-energy.com, χ.χ.)

#### 4.2.3 Μικροί αντιδραστήρες υγρού μετάλλου / Ταχέων νετρονίων ( *Liquid Metal / Fast Neutron* )

Αυτό το είδος είναι τρίτο σε παγκόσμια χρησιμότητα μετά από τους υδρόψυκτους και αερίοψυκτους αντιδραστήρες. Συνήθως έχουν ως ψυκτικό μέσο Νάτριο , Μόλυβδο ή Μόλυβδο-Βισμούθιο. Έχουν κατασκευαστεί πειραματικοί αντιδραστήρες σε Η.Π.Α, Ρωσία , Γαλλία , Ιαπωνία και Ηνωμένο Βασίλειο.

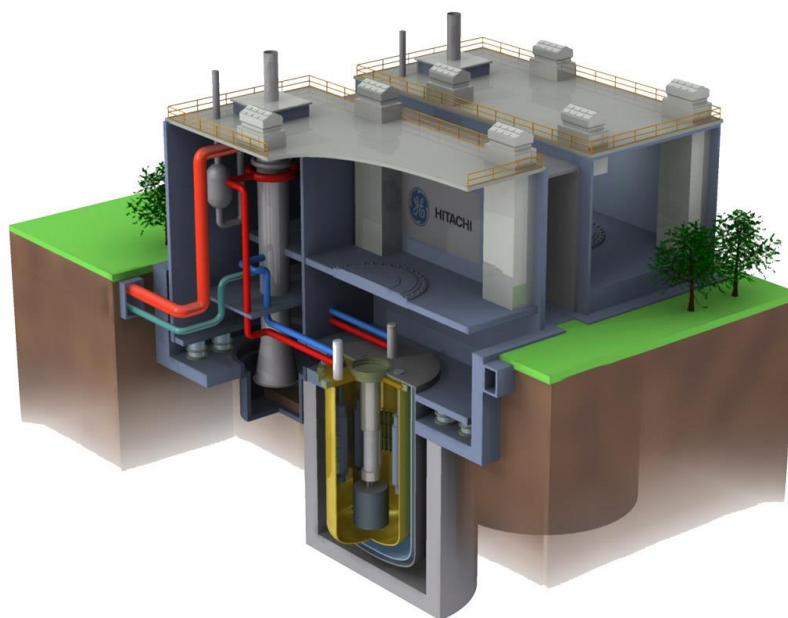
Το υγρό μέταλλο δίνει την ικανότητα να δημιουργήσουμε έναν αντιδραστήρα ταχέων νετρονίων, ο οποίος αξιοποιεί όλη την ενέργεια του ουρανίου κατά την σχάση και όχι μόνο ένα μικρό ποσοστό της. Τα νετρόνια είναι υψηλής ενέργειας, επομένως έχουμε περισσότερα συμβάντα σχάσης σε σχέση με τους υδρόψυκτους. Για αυτό τον λόγο είναι ικανοί να καταναλώσουν ως καύσιμο ήδη χρησιμοποιημένο ουράνιο από υδρόψυκτους αντιδραστήρες, που δεν το αξιοποίησαν 100%. Επιπλέον είναι πιο μικροί και πιο απλοί στην λειτουργία τους από τους και έχουν θερμοκρασία λειτουργίας κοντά στους 500 °C οπότε βρίσκονται ακριβώς αναμεσα στους *LWR* και *GCR* (που φτάνουν 300 °C και 800 °C αντίστοιχα ). (Ingersoll & Carelli, 2021)

##### 4.2.3.1 Η.Π.Α PRISM

Αυτός ο σχεδιασμός προέκυψε από το πρόγραμμα *Advanced Liquid Metal Reactor* στη δεκαετία του 80'. Το αρχικό σχέδιο ήταν αντιδραστήρας ισχύος 160 MWe με Νάτριο για ψυκτικό μέσο. Επίσης προοριζόταν για αναπαραγωγικός αντιδραστήρας δηλαδή να μετατρέπει το καύσιμο του (Ουράνιο ), σε επιπλέον ευσχάσιμο Πλουτόνιο. Τελικά όμως προορίζεται για την κατανάλωση χρησιμοποιημένου καυσίμου από *LWR*, με σκοπό την καλύτερη αξιοποίηση του καυσίμου. Αυτό έχει άμεση επίδραση στην καλύτερη επεξεργασία των πυρηνικών απόβλητων, καθώς επαναχρησιμοποιούνται και έτσι μειώνεται ο χρόνος ημίσειας ζωής.

Στόχος της *General Electric – Hitachi (GEH)* είναι να αξιοποιήσει όλα τα αποθηκευμένα πυρηνικά απόβλητα πλουτωνίου που ήδη υπάρχουν στο Ηνωμένο

Βασίλειο. Έτσι το καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιεί αρκετές φορές και στην συνέχεια όταν φτάσει σημείο να έχει καταναλωθεί πλήρως ( *spent fuel* ), τότε θα πηγαίνει σε ειδικό εργοστάσιο επεξεργασίας και αποθήκευσης πυρηνικών αποβλήτων. (World Nuclear Association, 2022)



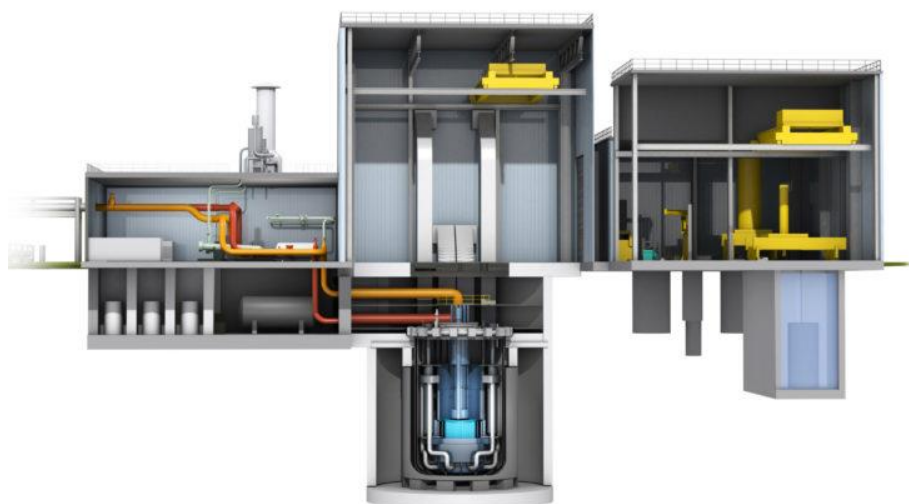
Εικόνα 37 GE-H PRISM (General Electric Power, χ.χ.)

Η φιλοσοφία του σχεδιασμού είναι κοντά στους *LWR*, με την διαφορά πως αντί για εσωτερική γεννήτρια ατμού, έχουμε δυο εσωτερικούς ανάλλακτες θερμότητας, που μεταφέρουν την θερμότητα στο κύκλωμα του νατρίου. Χρησιμοποιεί για καύσιμο U-PU-Zr ( Ουράνιο-Πλουτώνιο-Ζιρκόνιο) και έχει παραγόμενη θερμική ισχύ 840 MW και ηλεκτρική 311 Mwe. Ένα μπλοκ *PRISM* έχει δύο μονάδες *SMR* με συνολική ισχύ 622 MWe .

Τέσσερις ηλεκτρομαγνητικές αντλίες κυκλοφορούν το Νάτριο στο κεντρικό σύστημα τύπου πισίνας, σε θερμοκρασία, 500 °C ( δηλαδή ο πυρήνας βρίσκεται μέσα σε μια πισίνα υγροποιημένου νατρίου ), σε ατμοσφαιρική πίεση. Οι γεννήτριες ατμού βρίσκονται σε δευτερεύον κύκλωμα έξω από την πισίνα Νατρίου. Ο πυρήνας αποτελείται από κράμα μετάλλου και έχει 192 συνδεσμολογίες καυσίμου και ράβδους ελέγχου από Καρβίδιο του Βορίου. Το καύσιμο μένει στον αντιδραστήρα για 4 χρόνια και αφαιρείτε σταδιακά το κάθε ένα τέταρτο του κάθε χρόνο. Καταναλώνει 72g Πλουτωνίου τον χρόνο.

Επιπλέον η *GEH* συνεργάζεται με την *Terra Power* του *Bill Gates* στο *Natrium Project*. Είναι ένας *SMR* βασισμένος στην φιλοσοφία του *PRISM*. Έχει ως κύριο ψυκτικό μέσο το Νάτριο αλλά ως δευτερεύον τετηγμένο αλάτι ( *Molten Salt* ). Έτσι μπορεί να αποδιδόμενη ισχύ, από 345 MWe μέχρι 500 MWe όταν χρησιμοποιεί το τετηγμένο άλας, με την ισχύ να ρυθμίζεται από 30% μέχρι και 150%. ([natriumpower.com/](http://natriumpower.com/), χ.χ.)

Το 2020 το project έλαβε επιχορηγήσει £80 εκ. και η *Terra Power* σκοπεύει να χτίσει έναν δοκιμαστικό αντιδραστήρα στο *Wyoming*, σε ένα παλιό εργοστάσιο γαιανθράκων. Το συνολικό κόστος προβλέπεται να ξεπεράσει τα £1 δις. (Ingersoll & Carelli, 2021)

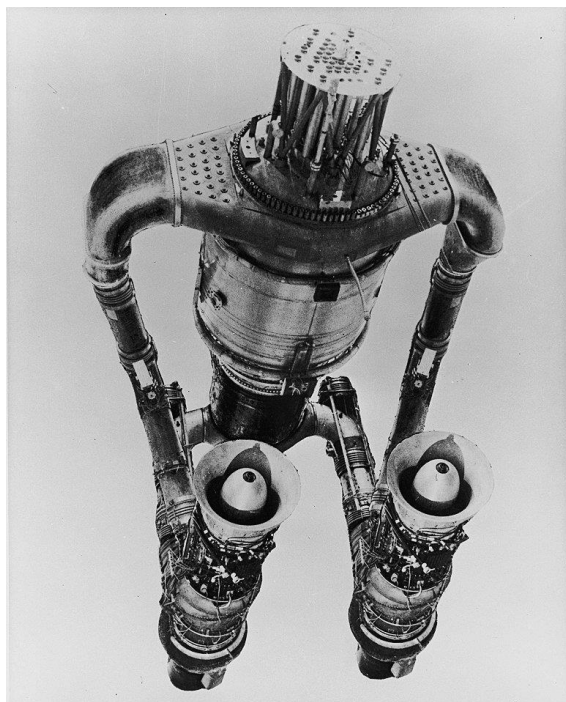


Εικόνα 38 Project NATRIUM (*Natrium Power*, χ.χ.)

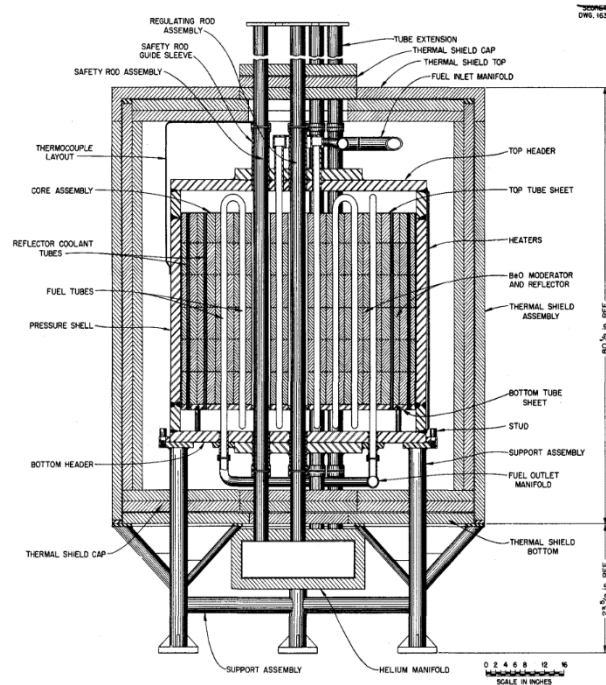
#### 4.2.4 Μικροί αντιδραστήρες τετηγμένου άλατος ( *Molten Salt Reactor* )

Η ιδέα των μικρών *MSR* χρονολογείται από τις δεκαετίες 1960 – 1970 καθώς στις Η.Π.Α είχαν γίνει μελέτες για τον πρώτο αντιδραστήρα σε σύστημα πρόωσης ενός αεροσκάφους. Το *Oak Ridge National Laboratory* έφτιαξε δυο πειραματικούς αντιδραστήρες, που είχαν αναμειγμένο καύσιμο με ψυκτικό μέσο το οποίο μεταφερόταν μέσα από μπλοκ γραφίτη για επιβραδυντή, πετυχαίνοντας έτσι μεγάλη ισχύ και δραστηκότητα σε μια πολύ συμπαγή κατασκευή. Το εγχείρημα βέβαια σταμάτησε καθώς υπήρχαν προβλήματα με την διάβρωση καθώς και τα καυσάερια που

ερχόντουσαν σε άμεση επαφή με τα αντιδραστήρα επομένως ήταν ραδιενεργά. Αργότερα οι MSR μελετήθηκαν και ως αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες αλλά την θέση τους πήραν τελικά οι αντιδραστήρες υγρού μετάλλου με νάτριο.



Εικόνα 40 Heat Transfer Reactor Experiments ( HTRE3 ) (Wikipedia, χ.χ.)



Εικόνα 39 Μέση τομή του MSR (Wikipedia, χ.χ.)

Σήμερα πολλές χώρες μελετάνε την προοπτική των MSR ως αντιδραστήρες 4<sup>ης</sup> γενιάς. Τα υγρά άλατα έχουν σημείο βρασμού πάνω από 1000 °C, επομένως μπορεί να επιτευχθεί υπηρεσιακή λειτουργία μεγαλύτερη από τους LWR. Επίσης τα υγρά άλατα είναι διαφανή, σαν το νερό, οπότε διευκολύνουν και στις διαδικασίες οπτικού ελέγχου.

Υπάρχουν δυο είδη MSR που βρίσκονται υπό μελέτη αυτή τη στιγμή :

1. Το καύσιμό εμπεριέχεται μέσα στο ψυκτικό μέσο, σε υγρή μορφή. ( MSR ). Όπως και στα προηγούμενα σχέδια, το καύσιμό (Ουράνιο ή Θόριο ) είναι διαλυμένο μέσα στο ψυκτικό μέσο ( Λιωμένο Λίθιο και Φθοριούχα άλατα Βηρυλλίου ). Αυτή η μορφή επιτρέπει στα προϊόντα σχάσης να μπορούν να αφαιρεθούν και να γίνει ανεφοδιασμός με νέο καύσιμό, χωρίς να γίνεται διακοπή του αντιδραστήρα. Έχουν γίνει βελτιώσεις σε σχέση με τα καταλληλά υλικά για τον περιορισμό του καυσίμου αλλά αυτή η τεχνολογία είναι στάσιμη τα τελευταία 30 χρόνια.
2. Το καύσιμό είναι μέσα σε σφαιρίδια γραφίτη όπως στους αντιδραστήρες ταχείων νετρονίων (fluoride-salt, high-temperature reactor – FHR). Αυτό το

πιο σύγχρονο είδος, εκμεταλλεύεται τα χαρακτηριστικά του υγρού άλατος ( υψηλό σημείο βρασμού ), για να βελτιώσει τον σχεδιασμό των αντιδραστήρων ταχέων νετρονίων, όπως τα κατασκευαστικά προβλήματα που προκαλεί η υψηλή πίεση. Επίσης τα σφαιρίδια καυσίμου είναι πιο ασφαλή και είναι πιο εύκολο να γίνει αδειοδότηση ως προς τα θέματα της ασφαλείας, σε σχέση με το υγρό καύσιμό, που ελλοχεύει κίνδυνους διαρροών.

Λόγω της πιο μικρής αρχιτεκτονικής τους αυτό το είδος αντιδραστήρα θεωρείται ιδανικό για συστήματα πρόωσης εμπορικών πλοίων, μαζί με τους αντιδραστήρες υγρού μετάλλου. Στην επόμενη ενότητα θα αναλυθούν κάποιοι από αυτούς.

## Κεφάλαιο 5: : Εφαρμογές SMR στη ναυτιλιακή βιομηχανία

### 5.1 Προοπτικές

Με την ανάπτυξη της πυρηνικής τεχνολογίας, το ενδεχόμενο για την ανάπτυξη ενός τέλειου κινητήρα ο οποίος παράγει μηδενικούς ρίπους γίνεται όλο και πιο πιθανό, το οποίο θα επιφέρει επανάσταση στην ναυτιλιακή βιομηχανία. Τα τελευταία χρόνια μέχρι και σήμερα, οι κατασκευαστές αντιδραστήρων κάνουν συνεχώς βελτιώσεις των σχεδίων τους με απώτερο σκοπό την ασφάλεια.

Οι συνέπειες ενός πυρηνικού ατυχήματος είναι καταστροφικές επομένως, η ασφάλεια είναι επιτακτική ανάγκη για την βιωσιμότητα της πυρηνικής πρόωσης. Οι κανονισμοί ασφαλείας του IMO συνήθως βασίζονται σε μεμονωμένα περιστατικά και δεν έχουν μια ολιστική και προληπτική προσέγγιση. Κάθε φορά που συμβαίνει ένα μεγάλο ναυτικό ατύχημα, δημιουργούνται νέοι κανονισμοί ασφαλείας οι οποίοι επιβάλλονται από τον IMO και κατά επέκταση τους νηογνώμονες . Αυτή η προσέγγιση είναι ανεπίτρεπτη όμως για ένα πυρηνικό πλοίο. Για αυτό ένα πυρηνοκίνητο πλοίο θα πρέπει να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε σε κάθε ενδεχόμενο ατυχήματος, το διαμέρισμα του αντιδραστήρα θα παραμείνει ανέπαφο.

### 5.2 SMR σε επίγειες εγκαταστάσεις και λιμένες

Όλα τα είδη των SMR περιεγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, εκτός από εγκαταστάσεις πρόωσης πλοίων, θα μπορούσαν να χρησιμοποιούν και στις εγκαταστάσεις των λιμένων. Εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ένας

SMR μπορεί να χρησιμοποιεί για αφαλάτωση νερού, καθώς και την δημιουργία υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης. Το υδρογόνο με την σειρά του μπορεί να αποθηκευτεί για χρήση σε κυψέλες καυσίμου ή ακόμα και για την παραγωγή μεθανόλης, αιθανόλης ή αμμωνίας.

Επομένως, έχουμε περισσότερες μορφές ενέργειας που προκύπτουν από έναν αντιδραστήρα. Όλα τα παραπάνω, εναλλακτικά καύσιμα, μελετώνται για χρήση στη ναυτιλία. Αυτές οι τεχνολογίες είναι πιο κοντά στην πλήρη εφαρμογή τους, επομένως ένας SMR θα μπορούσε να αξιοποιεί για την υποστήριξη αυτών, μέχρι να ωριμάσει η τεχνολογία για να μπει ο ίδιος μέσα στο μηχανοστάσιο.

Όλη η θερμική ισχύ του αντιδραστήρα μπορεί να αξιοποιηθεί για την θέρμανση κρύων περιοχών. Στο παρελθόν, αυτή η εναλλακτική δεν έχει ληφθεί σοβαρά υπόψη λόγω των χαμηλών τιμών στα ορυκτά καύσιμα. Με την ενεργειακή κρίση και την αύξηση των τιμών όμως, θα αρχίσει να είναι μια πιο ελκυστική εναλλακτική.

Τέλος, ένας SMR μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την φόρτιση μπαταριών στα λιμάνια, οι οποίες με την σειρά τους, να αξιοποιούνται από ηλεκτρικά *Ferries*. Ήδη, σε κάποιες χώρες όπως η Νορβηγία, υπάρχουν περίπου 70 τέτοια πλοία και πολλά βρίσκονται υπό ανάπτυξη (Nkesah & Solvoll, 2022), οπότε αυτή θα ήταν μια ιδανική λύση, ώστε οι μπαταρίες των πλοίων αυτών να φορτίζονται από 100% καθαρή ενέργεια, χωρίς ρίπους.

### 5.3 SMR σε εγκαταστάσεις πρόωσης πλοίου

#### 5.3.1 Marine Reactor X (MRX)

Το 2000 στην Ιαπωνία, η *Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)* είχε δημοσιεύσει ένα επιστημονικό άρθρο με τίτλο ‘*ADVANCED MARINE REACTOR MRX AND ITS APPLICATION FOR ELECTRICITY AND HEAT CO-GENERATION*’, για ένα μικρό integral PWR που προοριζόταν για πρόωση εμπορικού πλοίου ή για πλωτή εξέδρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ισχύς 30 MWe, άλλα και αφαλάτωσης νερού και θέρμανση. (T. ISHIDA, M. OCHIAI, & T. HOSHI, 2000)

Όλη εγκατάσταση θα χτιζόταν σε εργοστασιακό περιβάλλον και τοποθετούνταν αργότερα στο πλοίο/φορηγίδα. Ως καύσιμό έχει Οξειδίο Ουράνιο, 4.3% εμπλουτισμένο και χρειάζεται ανεφοδιασμό κάθε 3.5 χρόνια. Το δοχείο του αντιδραστήρα βρίσκεται ολόκληρο μέσα σε δεξαμενή νερού για επιπλέον ασφάλεια.



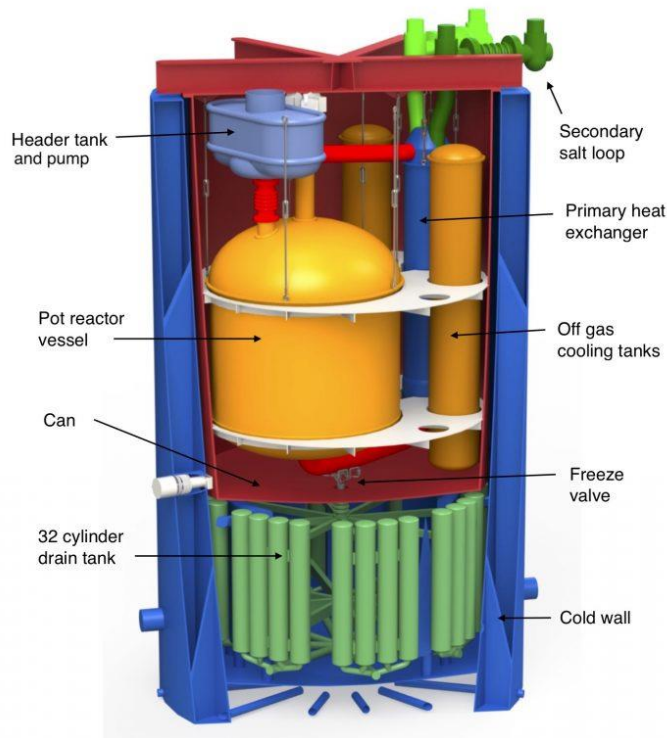
Σήμερα η εταιρία αυτή έχει αφομοιωθεί στην *Japan Atomic Energy Agency*, η οποία μελετάει νέες τεχνολογίες στον κλάδο της πυρηνικής ενέργειας αλλά δεν υπάρχουν προς το παρόν σχέδια για υλοποίηση του *MRX*. (Ingersoll & Carelli, 2021)

### 5.3.2 ThorCon

Το 2020, η εταιρία *ThorCon International* έκανε συμφωνία (*Memorandum of understanding - MOU*), με το Υπουργείο Εθνικής Άμυνας της Ινδονήσιας ώστε να αξιολογήσουν και να κατασκευάσουν ένα μικρό *Thorium Molten Salt Reactor*, ισχύος έως 50 MW, για παραγωγή ενέργειας ή πρόωσης πλωτών μέσων. Η ThorCon θα προσφέρει τεχνική υποστήριξη στο ερευνητικό τμήμα (*R&D*) του υπουργείου.

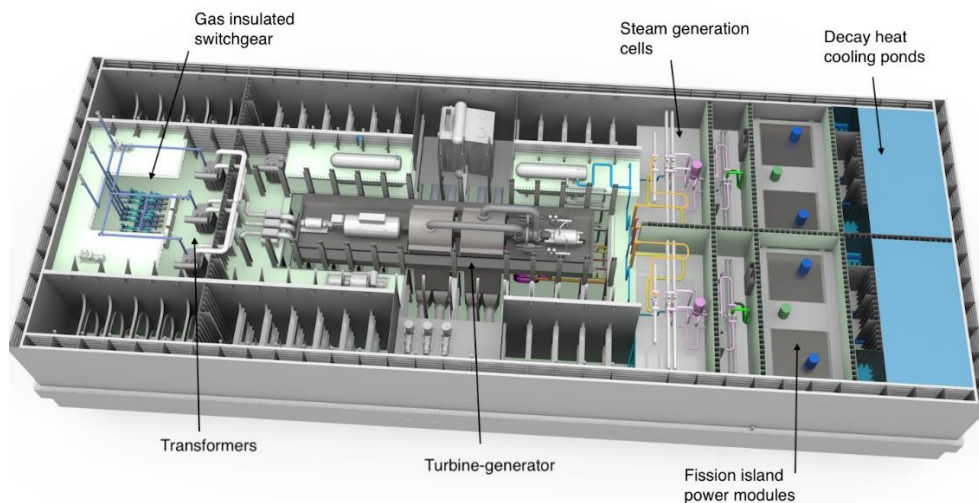
Επίσης γίνονται μελέτες και για έναν *ThorCon MSR* ισχύος 250 MWe. Χρησιμοποιεί ως καύσιμό έναν συνδυασμό, U-233 και Θόριο και χαμηλά εμπλουτισμένο U-235 ( 19.7% ) που είναι διαλυμένο σε Φθοριούχο Νάτριο και Φθοριούχο Βηρύλλιο ( $\text{BeF}_2\text{-NaF}$ ) και έχει γραφίτη για επιβραδυντή. Έχει θερμοκρασία λειτουργίας 700 °C και ένα εργοστάσιο θα αποτελείτε από τουλάχιστον δυο τέτοιες μονάδες. (Ingersoll & Carelli, 2021)

Κάθε αντιδραστήρας είναι μέσα σε ένα κυλινδρικό σφραγισμένο δοχείο, 30 μέτρα κάτω από το έδαφος, μαζί με τον βασικό εναλλάκτη θερμότητας και την αντλία του κύριου δικτύου. Για κάθε δεδομένη στιγμή μόνο το ένα από τα δυο δοχεία παράγει ενέργεια καθώς το άλλο απάγει θερμότητα (*cool down mode*), μέσα σε ειδική δεξαμενή. Ανά τετραετία το δοχείο που κρύωνε, αφαιρείται και προστίθεται νέο δοχείο. Το καύσιμο μεταφέρεται στο νέο δοχείο και πλέον μπαίνει σε κατάσταση *cool down* το αρχικό. Κάτω από κάθε δοχείο υπάρχει μια βαλβίδα αποστράγγισης ώστε σε περίπτωση ατυχήματος, ανοίγει και το υγρό (που αποτελείται από καύσιμο και ψυκτικό μαζί) αφαιρείται από τον πυρήνα και σταματάει η αντίδραση.

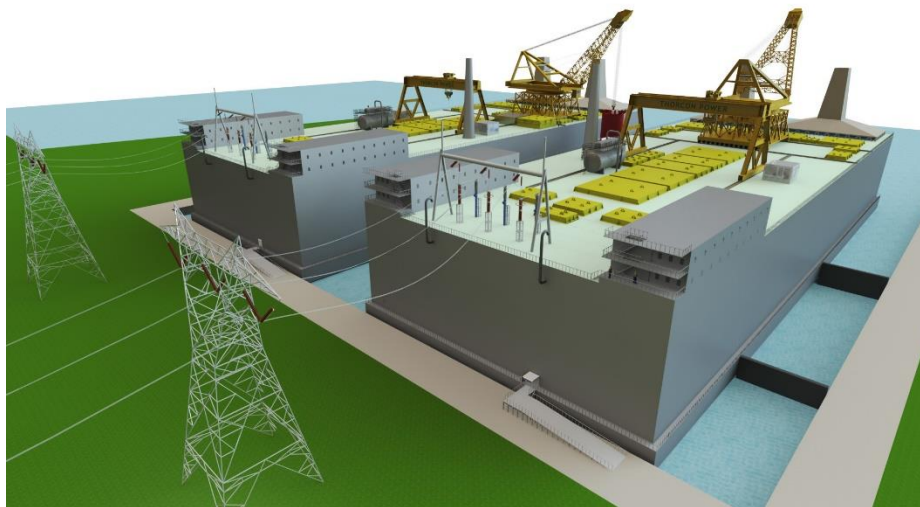


Εικόνα 41 Αντιδραστήρας ThorCon μέσα στο κυλινδρικό δοχείο (ThorCon, χ.χ.)

Από το 2020 η *ThorCon International* σε συνεργασία με την *Daewoo*, εργάζεται να δημιουργήσει ένα εργοστάσιο με τον *TMSR-500* στην Ινδονήσια. Σκοπός τους είναι να αξιοποιήσουν την κατασκευή σε μπλοκ, που γίνεται ήδη στα ναυπηγεία, ώστε να δημιουργήσουν μια γραμμή παραγωγής, μειώνοντας έτσι το κόστος και το χρόνο κατασκευής του αντιδραστήρα. (thorconpower.com, χ.χ.)



Εικόνα 42 Διάταξη μιας μονάδας ThorCon (ThorCon Power, χ.χ.)



Εικόνα 43 TMSR-500, που αποτελείται από δυο μονάδες ThorCon (ThorCon Power, χ.χ.)

### 5.3.3 Ρωσία : RITM-200

Όπως αναφέρθηκε και την [Ενότητα 1](#), αυτή η σειρά αντιδραστήρων προορίζεται για τη νέα σειρά παγοθραυστικών *LK-60* (*Project 22220 icebreakers*) και θα αντικαταστήσουν την σειρά *KLT-40S* άλλα υπάρχουν παραλλαγές και για πλωτά και επίγεια εργοστάσια.

Πρόκειται *integral PWR*, θερμικής ισχύος 175 MW και ηλεκτρικής 50 MWe. Οι γεννήτριες ατμού βρίσκονται εσωτερικά στο δοχείο πίεσης και υπάρχουν εξωτερικές αντλίες για την ανακυκλοφορία του ψυκτικού (το οποίο είναι πεπιεσμένο νερό). Ως καύσιμο χρησιμοποιεί, χαμηλά εμπλουτισμένο Ουράνιο (κάτω από 20%) σε 199 συνδεσμολογίες καυσίμου (ενώ για την έκδοση που εφαρμόζεται σε πλωτό εργοστάσιο έχει 241 συνδεσμολογίες καυσίμου). Η υπηρεσιακή διάρκεια ζωής είναι 60 χρόνια ενώ πάνω στο σκάφος υπάρχουν δυο μονάδες *RITM-200* που ζυγίζουν συνολικά 2600 τόνους, με διαστάσεις 6.8 m × 14.6 m × 16.0 m ύψος και χρειάζονται ανεφοδιασμό κάθε 7 χρόνια.

Έχει παθητικά σύστημα ασφάλειας που λειτουργούν υδραυλικά και δεν χρειάζεται εξωτερική ενέργεια. Σε περίπτωση ατυχήματος και υπερθέρμανσης του αντιδραστήρα

υπάρχουν ψεκασθήρες νερού που ψύχουν τον αντιδραστήρα και δεν υπάρχει διαφυγή ραδιενέργειας.



Εικόνα 44 Κέλυφος του αντιδραστήρα RITM-200, του νέου παγοθραυστικού Yakutia (ROSATOM, 2022)

Αυτή τη στιγμή βρίσκονται σε υπηρεσία τα παγοθραυστικά της σειράς *LK-60 Arktika* και *Sibir*, ενώ υπάρχουν συνολικά 7 παγοθραυστικά που είναι σε διάφορα στάδια ανάπτυξης. Επιπλέον μελετάτε και ο *RITM-400* οποίος θα έχει ισχύς πάνω από 300MW και θα εξοπλίσει την νέα σειρά παγοθραυστικών (*Project 10510*), τα οποία εκτιμάται πως θα ξεπεράσουν σε μέγεθος και ισχύς κατά πολύ όλα τα υπάρχοντα. Μέχρι το 2033 είναι προγραμματισμένα να χτιστούν συνολικά 3 παγοθραυστικά με το πρώτο να είναι το *Leader*.



Εικόνα 45 Μακέτα του παγοθραυστικού “The Leader” του project 10510 (Wikipedia, χ.χ.)

#### 5.3.4 Molten Chloride Fast Reactor

Η *Terra Power* εκτός από το *Sodium* project , εργάζεται και πάνω στον *MCFR*. Σε συνεργασία με την *Southern Company Services* , *Oak Ridge National Laboratory* την *Core Power* και άλλες μεγάλες εταιρίες. Συγκεκριμένα η *Core Power* στο Ηνωμένο Βασίλειο ερευνά κυρίως την εφαρμογή του *MCFR* στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Εκτός από την δημιουργία *MSR* πλοίων, προωθεί και την δημιουργία κατάλληλων κανονισμών ώστε να μπορέσει να εδραιωθεί η τεχνολογία με ασφάλεια και να την αποδεχθεί η βιομηχανία σαν ανταγωνιστική εναλλακτική, μιας είναι η μοναδική πραγματικά καθαρή μορφή ενέργειας. Επιπροσθέτως, η ηλεκτρική πρόωση προσφέρει πολλές εναλλακτικές στην διάταξη της έλικας, καθώς μπορούν να υπάρχουν περισσότερες από μια είλικες, και αντίστροφα περιστρεφόμενες προπέλες ( *Contra Rotating Propellers*, θα γίνει περισσότερη ανάλυση στο [επόμενο κεφάλαιο](#)). (terrapower.com, χ.χ.)

Πιο συγκεκριμένα η *Core Power* μελετάει ενεργά τα ‘All Electric Advanced Atomic Ships’. Πλήρως ηλεκτρικά πλοία, όπου ο πυρηνικός αντιδραστήρας παράγει την ηλεκτρική ενέργεια για το σύστημα πρόωσης άλλα και όλους τους καταναλωτές. Παρόλο που με την ηλεκτρική πρόωση θα υπάρχει απώλεια ενέργειας, λόγω της μετάδοσης από πυρηνική σε ηλεκτρική (μέσω γεννήτριας ατμού), το θετικό είναι πως

πλέον αντιδραστήρας δεν χρειάζεται να είναι στην πρύμνη του πλοίου, οπότε αυτό ανοίγει δρόμους για νέες πιο αποδοτικές σχεδιάσεις πλοίων. (corepower.energy, χ.χ.)



Εικόνα 46 All Electric Advanced Atomic Ships από την Core Power (Core Power, χ.χ.)

Δεν υπάρχουν πολλές πληροφορίες για τον *MCFR*, πάρα μόνο πως θα έχει ενοποιημένο καύσιμο και ψυκτικό μέσο, πιθανότατα με καύσιμο Ουρανιο-238 και Θόριο, καθώς και θα μπορεί να χρησιμοποιεί υπολείμματα καυσίμων από *LWRs*.

Το 2020 το *Department of Energy* έδωσε επιχορήγηση \$113 εκ. (για 7 χρόνια), στην Terra Power για την κατασκευή του *Molten Chloride Reactor Experiment (MCRE)*. Θα είναι ένας αντιδραστήρας 300kW, pool type, πάνω στον οποίο θα βασιστεί ο σχεδιασμός, η αδειοδότηση και η μελέτη της λειτουργίας του αντιδραστήρα. Το *MCRE* εκτιμάται να τεθεί σε λειτουργία το 2026.

#### 5.4 Η περίπτωση του Gen4Energy Hyperion Tanker : Ανάλυση εγκατάστασης

Το 2014 αναρτήθηκε το επιστημονικό άρθρο ‘*Considerations on the potential use of Nuclear Small Modular Reactor (SMR) technology for merchant marine propulsion*’ σε συνεργασία με τον Lloyds Register, το οποίο αφορούσε την προκαταρκτική μελέτη της μετασκευής ενός Suezmax Tanker ώστε να εξοπλιστεί με μια μονάδα Gen4Energy Hyperion SMR.

#### 5.4.1 Αντιδραστήρας

Ο αντιδραστήρας που επιλέχθηκε για την μελέτη, είναι βασισμένος στον Gen4Energy Hyperion. Ανήκει στην κατηγορία ταχέων νετρονίων και έχει ως ψυκτικό μέσο ένα ομογενές μείγμα Μόλυβδου και Βισμούθιου. Αυτός ο αντιδραστήρας χαρακτηρίζεται για τα παρακάτω :

- Σύγχρονη τεχνολογία
- Ευκολία και απλότητα στον χειρισμό του αλλά και την παραγωγή του
- Μεταφέρεται εύκολα
- Δεν χρειάζεται ανεφοδιασμό επιτόπου
- Παρέχει μεγάλη ισχύ και έχει καλό θερμικό βαθμό απόδοσης σε σύγκριση με το μέγεθος του

Είναι σχεδιασμένος για εφαρμογές εγκαταστάσεων στην ξηρά, παρόλα αυτά με κατάλληλες τροποποιήσεις μπορεί να εφαρμοστεί και σε συστήματα πρόωσης πλοίων.

Οι αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, χωρίς ανεφοδιασμό. Αυτό οφείλετε στο γεγονός πως τα προϊόντα σχάσης επηρεάζουν ελάχιστα την αλυσιδωτή αντίδραση.

Παρόλο που ο αντιδραστήρας είναι μοναδικός στο είδος του, η τεχνολογία που τον διέπει έχει εφαρμοστεί για περισσότερο από 10 χρόνια, σε Ρωσικά υποβρύχια *Alfa Class*. Η προσθήκη του αντιδραστήρα ταχέων νετρονίων μειώνει το ρίσκο καθώς είναι απλούστερος, αφού απουσιάζει ο επιβραδυντής.

##### 1.1.1.1 Ψυκτικό μέσο

Το ψυκτικό μέσο είναι υγρό μέταλλο και πιο συγκεκριμένα, ένα μείγμα Μολύβδου-Βισμούθιου (Lead Bismuth Eutectic – LBE). Το LBE επιλέχθηκε αντί για το Μόλυβδο γιατί έχει πολύ μικρότερο σημείο τήξης και έχει περιορισμένη διαστολή κατά την τήξη του. Τα δυο παραπάνω είναι καίριας σημασίας για την απλούστερη μεταφορά του ψυκτικού μέσου αλλά και την γενικότερη αξιοπιστία του συστήματος.

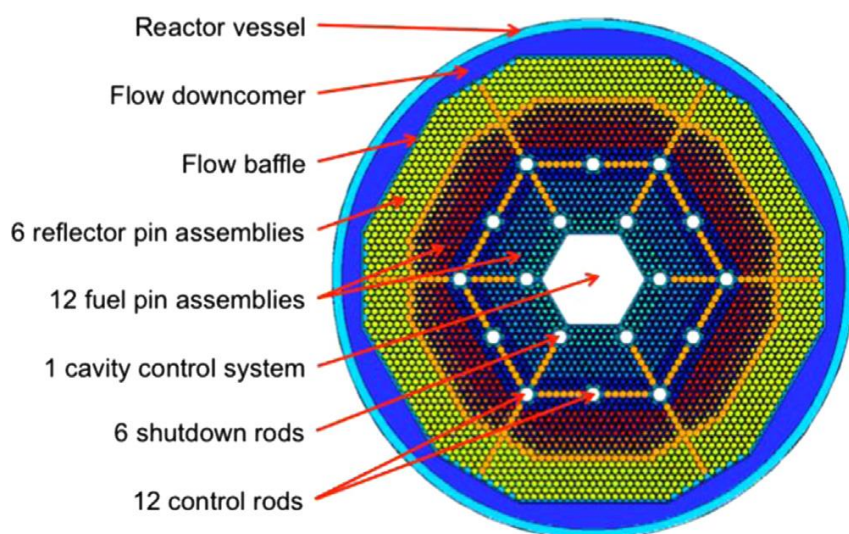
Το Νάτριο απορρίφθηκε λόγω της δραστικότητας του με το νερό και τον αέρα, η οποία χημική αντίδραση θα ήταν προβληματική σε μια πιθανή διαρροή ψυκτικού υγρού.

#### 5.4.1.1 Καύσιμο

Το νιτρικό ουράνιο ως καύσιμο προτιμήθηκε από το απλό ουράνιο ή οξείδιο του ουρανίου, καθώς παρέχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής πυρήνα, μικρή διαστολή καυσίμου καθώς και καλύτερη αντοχή σε ζημιά λόγω ακτινοβολίας, σε μεγάλα χρονικά διαστήματα. Χρησιμοποιεί σφαιρίδια νιτρικού ουρανίου (UN) με εμπλουτισμό 19,75%, που είναι περιτυλιγμένα με κάλυμμά από ανοξείδωτο χάλυβα (HT-9).

#### 5.4.1.2 Ράβδοι ελέγχου

Το σύστημα λειτουργεί με δυο ανεξάρτητους μηχανισμούς απενεργοποίησης της κρισιμότητας του πυρήνα. Ένα σύστημα με 6 εσωτερικές και 12 εξωτερικές ράβδους ελέγχου  $B_4C$  (καρβίδιο του Βορίου) και ένα εφεδρικό σύστημα που αποτελείται από μια κοιλότητα στην οποία εισέρχεται μια ράβδος  $B_4C$ .

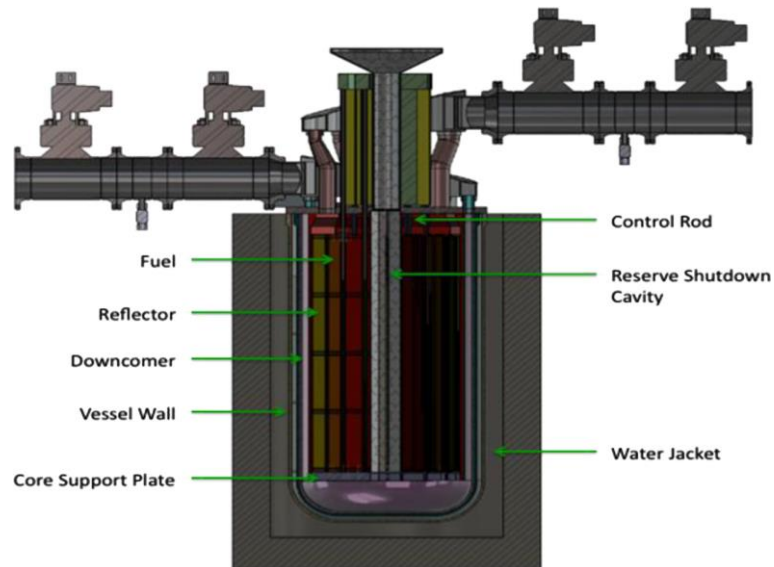


Εικόνα 47 Διάταξη πυρήνα (S.E. Hirdaris, και συν., 2014)

Ο αντιδραστήρας διαθέτει ποικίλα μέσα για αφαιρείτε η θερμότητα αποσύνθεσης υπό όλες τις συνθήκες διακοπής λειτουργίας. Κατά τον τερματισμό λειτουργίας, χρησιμοποιείτε ένα δευτερεύον δίκτυο ανακυκλοφορίας ψυκτικού μέσου, ώστε να μειώνεται η θερμότητα, που καταλήγει στην γεννήτρια ατμού.



Το δεύτερο σύστημα αφαιρεί την θερμοκρασία μέσω της φυσιολογικής κυκλοφορίας ψυκτικού, στο κύριο δίκτυο και από παθητική εξάτμιση του νερού στην επιφάνεια του δοχείου του αντιδραστήρα, το οποίο τίθεται σε λειτουργία σε περίπτωση βλάβης του κυρίου συστήματος ψύξης.



Εικόνα 48 Πρόσωση πυρήνα και δοχείου (S.E. Hirdaris, και συν., 2014)

### Πίνακας 3 Χαρακτηριστικά του SMR

Ισχύς πυρήνα	70 <i>MW</i> <sub>thermal</sub>
Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς	25 <i>MW</i> <sub>electrical</sub>
Διάρκεια ζωής	10 <i>Effective Full Power Years (EFPY)</i>
Μέγεθος (ναυτιλιακή χρήση)	1.5 m διάμετρος x 4 m ύψος (έκδοση για
Βάρος πίεσης, καύσιμο και ψυκτικό	Κάτω από 50 t, συμπεριλαμβανόμενο το δοχείο
Κατασκευαστικό υλικό	Ανοξείδωτος χάλυβας
Ψυκτικό μέσο	<i>PbBi</i>
Καύσιμο	Νιτρικό ουράνιο ( <i>UN</i> )
Εμπλουτισμός	<sup>235</sup> <i>U</i> 20%
Εφοδιασμός επί τόπου	Όχι
Σφραγισμένοι πυρήνας	Ναι
Άδεια	Πιστοποιητικό σχεδιασμού
Παθητική απενεργοποίηση	Ναι
Ενεργητική απενεργοποίηση	Ναι

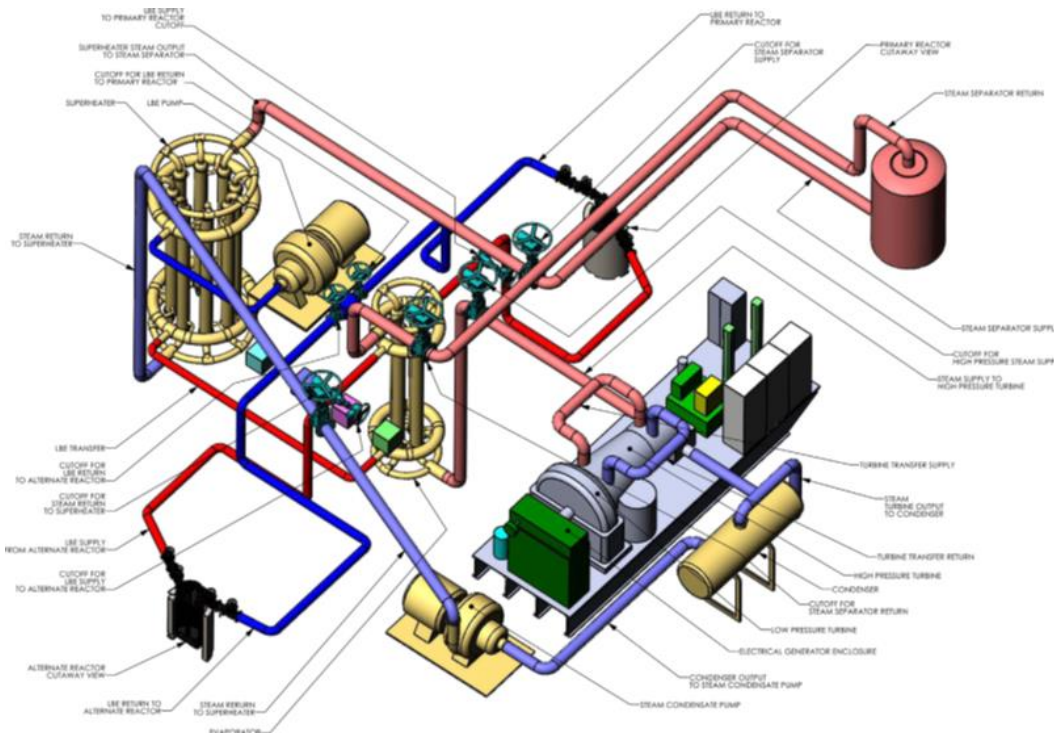
Μεταφορά  
Εργοστασιακά τοποθετημένο καύσιμο  
Ασφάλεια και στοιχεία ελέγχου  
ελέγχου

Ναι, ανέπαφος πυρήνας  
Ναι  
2 εφεδρικά συστήματα απενεργοποίησης, ράβδοι

Το βασικό σύστημα, είναι ένας ενιαίος βρόγχος, που αποτελείται από τον αντιδραστήρα, ο οποίος είναι προστατευμένος από εξωτερικές απειλές, μέσα σε ένα δοχείο. Όταν είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο, το ψυκτικό, αντλείται στον αντιδραστήρα και περνάει από ανάλλακτες θερμότητας που θερμαίνουν το δευτερεύον κύκλωμα υγρού μετάλλου.

Το δευτερεύον σύστημα περιέχει έναν κύκλο παραγωγής ατμού που λειτουργεί σε κύκλο Rankine. Η γεννήτρια ατμού περιέχει :

- Αντλία τροφοδοσίας
- Εξατμιστή
- Υπερθερμαντήρα
- Στρόβιλοι υψηλής και χαμηλής πίεσης
- Συμπυκνωτή



Εικόνα 49 : Αναπαράσταση εγκατάστασης παραγωγής ατμού (S.E. Hirdaris, et al., 2014)

## 5.5 Μελέτη του πλοίου υπό μετασκευή

### 5.5.1 Εισαγωγή

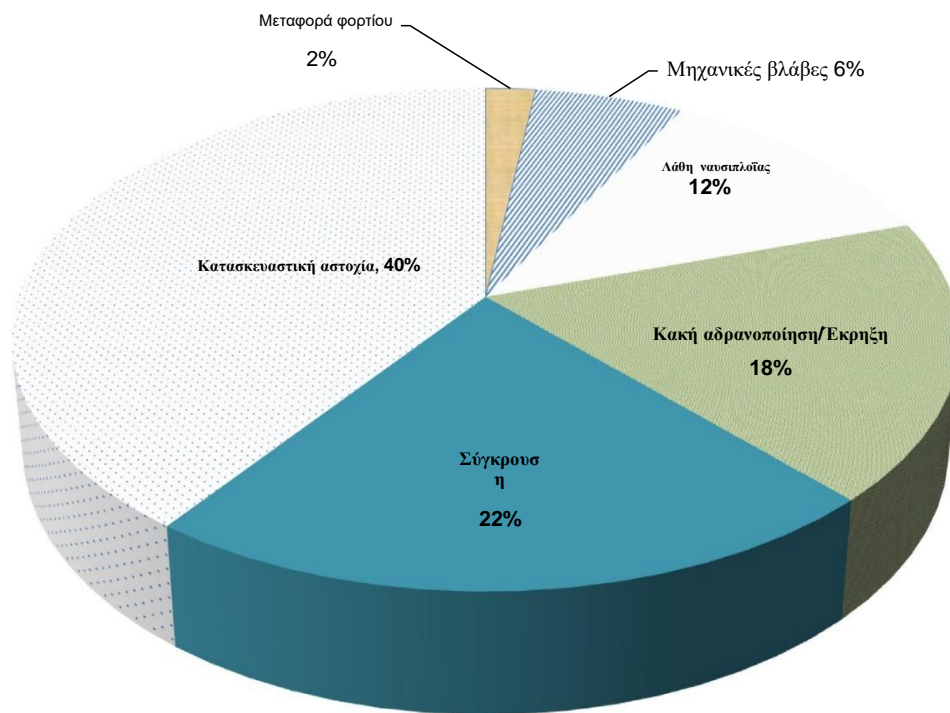
Για την μελέτη που έγινε στο επιστημονικό άρθρο, συνεργάστηκαν σχεδιαστές πλοίων, κατασκευαστές *SMR*, ο πλοιοκτήτης καθώς και ο νηογνώμονας *Lloyds register* που έκανε την μελέτη εκτίμησης κινδύνου ( *risk assessment* ). Οι στόχοι της μελέτης ήταν οι εξής :

- Να οριστούν οι ικανότητες ενός πλοίου με *SMR* στο σύστημα πρόωσης, ως ένα σύστημα το οποίο θα είναι αποδοτικό παρόλες τις πιθανές αλλαγές που θα προκύψουν στα διαφορά στάδια σχεδιασμού.
- Να δημιουργηθεί ένας αναλυτικός σχεδιασμός οπου να είναι ξεκάθαρες οι ανάγκες κάθε στοιχείου της κατασκευής
- Αναλυτική εκτίμηση κίνδυνου που αφορά την ασφάλεια του πλοίου, την λειτουργία της μηχανολογικής εγκατάστασης καθώς και την επιρροή του ανθρωπίνου παράγοντα στα παραπάνω.

Θεωρητικά, η ανάλυση αυτή θα ήταν επαρκής για να γίνει η έγκριση ενός αρχικού σχεδίου, παρόλα αυτά χρειάζονται παραπάνω μελέτες πάνω στην πυρηνική τεχνολογία που διέπει τον αντιδραστήρα. Επίσης θα χρειαστεί τελική έγκριση από ειδικό επιθεωρητή της πυρηνικής τεχνολογίας της εγκατάστασης.

### 5.5.2 Πρώτο στάδιο εκτίμησης κινδύνου ( Risk Assessment )

Σε αυτό το στάδιο μελετήθηκαν διαφορά ναυτικά ατυχήματα πλοίων δεξαμενόπλοιων, υποβρυχίων καθώς και ατυχήματα που αφορούσαν αντιδραστήρες *PWR* γενικότερα. Παρόλο που είναι περιορισμένο το εύρος ατυχημάτων, βοηθάει στην δημιουργία ολοκληρωμένης εικόνας του προβλήματος. Από την βιβλιογραφία που μελετήθηκε από τους συντάκτες του άρθρου, παρατηρείται ότι το 40% των ατυχημάτων αποδίδεται σε κατασκευάστηκε αστοχίες.



Εικόνα 50 Στατιστικά ατυχημάτων δεξαμενόπλοιων (S.E. Hirdaris, et al., 2014)

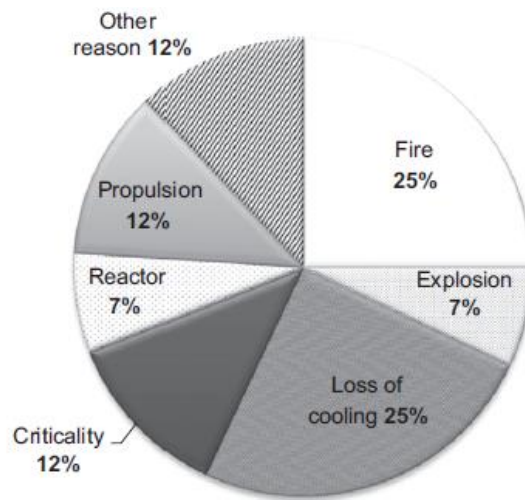
Όσον αφορά τα ατυχήματα πυρινοκίνητων εμπορικών πλοίων ξεχώρισαν τα παρακάτω:

- Το 1970 κατά την πρώτη λειτουργία του *NS Mutsu* μετρήθηκαν μεγάλα επίπεδα ακτινοβολίας γάμμα και νετρονίων, τα οποία αποδοθήκαν σε ένα κενό μεταξύ στον αντιδραστήρα και το δοχείο προστασίας του.
- Το 1965, λόγω ανθρωπίνου σφάλματος, ο αντιδραστήρας του *NS Lenin* είχε μείνει χωρίς ψυκτικό, το οποίο οδήγησε σε μεγάλες μηχανολογικές βλάβες.
- Το 1967, οι σωληνώσεις ενός κυκλώματος του *NS Lenin* ξεκίνησαν μια διαρροή, μετά τον ανεφοδιασμό με φρέσκο πυρηνικό καύσιμο. Ο αντιδραστήρας υπέστη περαιτέρω βλάβη όταν άνοιξαν το διαμέρισμα του, για να εντοπίσουν την διαρροή.

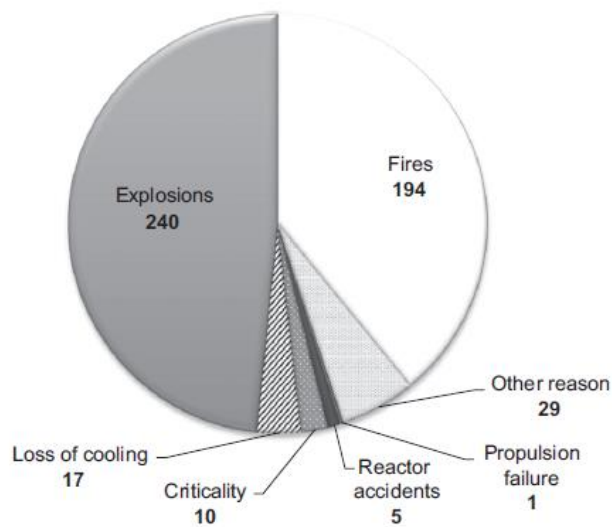
Στην συνέχεια μελετήθηκαν 58 ατυχήματα υποβρυχίων που διέθεταν *PWR* στο σύστημα πρόωσης τους, τα 19 από τα οποία δεν συμπεριελήφθησαν καθώς ήταν αμφιλεγόμενα και δεν ήταν ξεκάθαρο αν το λάθος ήταν στον αντιδραστήρα. Τα σημαντικότερα πορίσματα της ερευνάς είναι τα εξής :

- Οι τραγικές επιπτώσεις τις διαρροής ραδιενέργειας, όπως παρατηρήθηκε από τους θανάτους του πληρώματος, Σοβιετικού υποβρυχίου *K-27* που λειτουργούσε με έναν πειραματικό αντιδραστήρα *VT-1*.

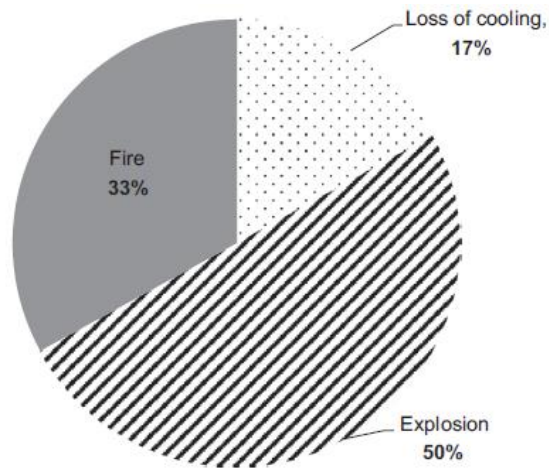
- Η θάνατος των 118 ναυτικών λόγω έκρηξης το 2000, που μετέβησαν στο Ρωσικό υποβρύχιο *Kursk*.



Εικόνα 51 Τα στατιστικά των αιτιών ατυχημάτων υποβρυχίων. (S.E. Hirdaris, et al., 2014)



Εικόνα 52 Στατιστικά αιτιών απώλειας ζωής σε υποβρύχια. (S.E. Hirdaris, et al., 2014)



Εικόνα 53 Στατιστικά από ναυάγια υποβρυχίων (S.E. Hirdaris, et al., 2014)

Παρακάτω ακολουθούν τα βασικά συμπεράσματα του πρώτου σταδίου εκτίμησης κινδύνου :

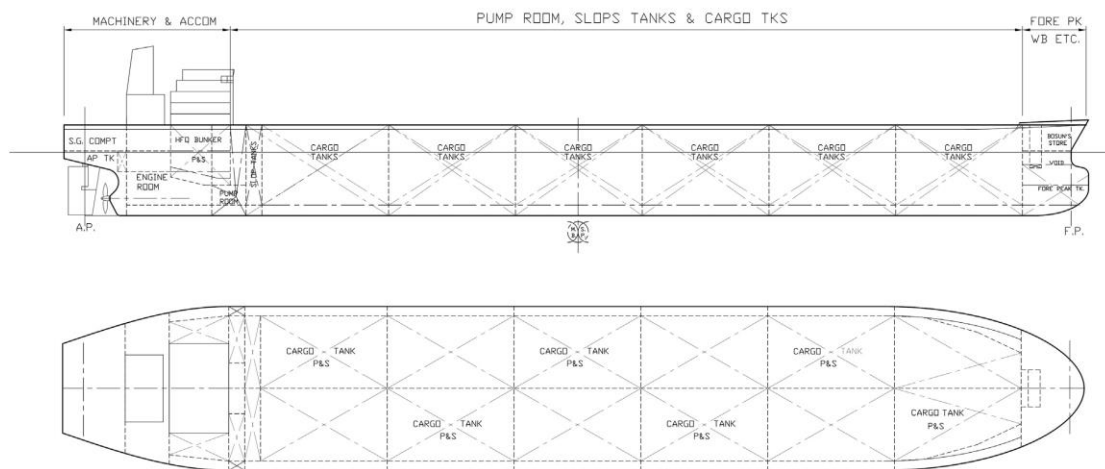
- Παρόλο που στα περισσότερα ατυχήματα λειτουργούσαν παλαιότερα μοντέλα αντιδραστήρων πεπιεσμένου ύδατος, έπρεπε να συμπεριληφθούν εξίσου στην μελέτη ασφάλειας, καθώς αφορά τα εμπορικά πλοία γενικότερα.
- Αν εξαιρεθεί το ατύχημα με τον πειραματικό αντιδραστήρα VT1 στο ρωσικό υποβρύχιο K-27, δεν υπάρχουν πληροφορίες για ατυχήματα με χρήση SMR τεχνολογιών. Παρόλα αυτά επειδή η τεχνολογία των αντιδραστήρων στα υποβρύχια έχει την μορφή μπαταρίας, η μελέτη αυτή προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες.
- Όσον αφορά τα πυρηνικά υποβρύχια, τα πιο επικίνδυνα ατυχήματα για το πλήρωμα είναι η πυρκαγιά και οι εκρήξεις. Αυτά όμως δεν αφορούν την μονάδα αντιδραστήρα εκτός αν αναφερθούμε σε ατυχήματα απώλειας ψυκτικού ή κρισιμότητας πυρήνα.
- Παρόλο που η ασφάλεια των δεξαμενόπλοιων έχει αυξηθεί, οι κατασκευαστικές αστοχίες δεν μπορούν να αγνοηθούν. Ο κυριότερος κίνδυνος είναι η ανάπτυξη υψηλών φορτίων λόγω σφαλμάτων. Το οποίο υποστηρίζεται και από το ατύχημα της πλωτής εξέδρας *Deepwater Horizon* οπού η φωτιά που δημιουργήθηκε ξεπέρασε τους 1300°C, και κατάφερε να λιώσει την χαλύβδινη κατασκευή.
- Ο αντιδραστήρας *SMR* που εφαρμόστηκε μελέτη, είχε πολύ μικρότερο ρίσκο σε σχέση με τους *PWR* στην ξηρά, παρόλα αυτά, μένει να αποδειχθεί και στην πράξη.

### 5.5.3 Πρώιμη τεχνική εκτίμηση

Το σκάφος προς μετασκευή της μελέτης ήταν ένα Suezmax δεξαμενόπλοιο, που κατασκευάστηκε το 2005. Ήταν ένα τυπικό διπύθμενο σκάφος με μονό κατάστρωμα και πρόστεγο. Ακολουθεί ο πίνακας με τα γενικά χαρακτηριστικά του :

Principal particulars	Value	Units
$L_{OA}$	274.48	m
$L_{PP}$	264.00	m
$B$ (moulded)	48.00	m
$D$ (moulded)	23.10	m
$T_{design}$ (moulded)	16.00	m
$T_{scantling}$ (moulded)	17.05	m
Summer freeboard	6069	mm
$T_{summer\ load}$ (moulded)	17.05	m
$\nabla$	182 617	t
P at 100% MCR (16.7 knots)	18,881	kW
P at 100% MCR (14.0 knots)	10,754	kW
V (85% Power) Design Condition	15.7	knots
Auxiliary load – Sea Going	750	kW
Auxiliary load – Unloading	1300	kW

Εικόνα 54 Γενικά χαρακτηριστικά σκάφους (S.E. Hirdaris, και συν., 2014)



Εικόνα 55 Φωτογραφία και σχέδιο του, υπό μετασκευή πλοίου (S.E. Hirdaris, και συν., 2014)

Για τη μελέτη του μηχανοστάσιου του σκάφους, έδωσαν ιδιαίτερη έμφαση στον πλεονασμό στην ικανότητα πρόωσης, ώστε να γίνει κατανοητό στο κοινό πως ένα πυρνοκίνητο πλοίο μπορεί να είναι ασφαλέστερο από ένα τυπικό πλοίο.

Σε μια πραγματική περίπτωση για να διασφαλιστεί η τήρηση των κανονισμών θα έπρεπε ο εκάστοτε νηογνώμονας να κατάθεση την έγκριση του, σε έναν εξειδικευμένο επιθεωρητή για την πυρηνική τεχνολογία, ο οποίος στην συνέχεια θα ενέκρινε τον SMR καθώς και την εκτίμηση κινδύνου.

Το όγδοο κεφάλαιο της *SOLAS* αναφέρει τα παρακάτω για την εκτίμηση κινδύνου πυρνοκίνητων πλοίων

1. Εκπονείται αξιολόγηση ασφάλειας για να επιτρέψει την αξιολόγηση του πυρηνικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής και της ασφάλειας του πλοίου, για να διασφαλιστεί ότι δεν υπάρχουν αδικαιολόγητες ακτινοβολίες ή άλλοι κίνδυνοι, στη θάλασσα ή στο λιμάνι, στο πλήρωμα, τους επιβάτες ή το κοινό ή στις



πλωτές οδούς ή τροφίμων ή υδάτινων πόρων. Η Αρχή, όταν ικανοποιηθεί, θα εγκρίνει την εν λόγω αξιολόγηση ασφάλειας η οποία θα διατηρείται πάντα ενημερωμένη.

2. Η αξιολόγηση ασφάλειας διατίθεται εκ των προτέρων, στις συμβαλλόμενες κυβερνήσεις των χωρών τις οποίες προτίθεται να επισκεφθεί ένα πυρηνικό πλοίο, ώστε να μπορούν να αξιολογήσουν την ασφάλεια του πλοίου. (Statutory Documents - IMO Publications and Documents - International Conventions - SOLAS - International Convention for the Safety of Life at Sea - Chapter VIII - Nuclear ships).

Πίνακας 4 Εκτίμηση αλλαγών του Tanker κατά την μετασκευή.

Parent ship	SMR tanker
<p> <math>L_{cargo\ tanks} = 78\% \times L_{OA}</math>  <math>L_{stern\ section\ to\ fwd\ bulkhead} = 16\% \times L_{OA}</math>  <math>L_{bow\ section\ fwd\ of\ cargo\ tanks} = 6\% \times L_{OA}</math>  <math>A_{wetted\ surface} = 1006\ m^2</math> </p>	<p>SMR integration may imply change of principal particulars. Suez Canal Authority design restrictions should apply:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>B_{max} &lt; 77.5\ m</math></li> <li>• <math>T_{air\ max} &lt; 68\ m</math></li> <li>• <math>T_{max} &lt; 12.192\ m</math> in way of <math>B_{max}</math> (in ballast)</li> <li>• <math>T_{max} &lt; 20.12\ m</math> if <math>B_{max} &gt; 50\ m</math> (full load)</li> <li>• <math>A_{wetted\ surface}</math> should be constant</li> <li>• No length extension restrictions</li> </ul>
<p> <math>LCG_{cargo\ tanks} = 5\%</math> fwd amidships <math>Weight_{cargo} &gt; Weight_{lightship}</math> </p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Achieve level trim at all times</li> <li>• Cargo carrying capacity of reference vessel to be maintained</li> <li>• Hull form and weight should balance around the weight and LCG of the cargo tanks</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• The main cargo tanks longitudinal bulkhead is sub-divided into 6 pairs of main, side and bottom tanks for water ballast</li> <li>• 2 slop tanks are aft the main cargo area</li> </ul>	<p>Current Suezmax features should be maintained to comply with damage stability standards</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Slow speed diesel engine</li> <li>• Power = 18,881 kW at 91 rpm</li> <li>• Direct coupling to a fixed pitch 8.2 m diameter propeller</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modification in the specific choice of propulsion equipment may be necessary</li> <li>• Manoeuvring, propulsion &amp; powering requirements should be maintained</li> </ul>
<p>No redundancy for propulsion, steering and essential systems</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emergency could disable propulsion, steering or other essential systems</li> <li>• Consider redundancy arrangements</li> </ul>
<p>Cargo handling by centrifugal pumps installed in a pump room (powered by steam driven pumps) co-located foreword of the machinery space. Crew accommodation in a deckhouse above the engine room, separated from the funnel casing to reduce noise &amp; vibration</p>	<p>Risk mitigation measures associated with both of these features should be considered. Pump motive power could be electric or steam dependent on the power train configuration</p>

Πίνακας 5 Κανονισμοί που πληροί το SMR Tanker

Rules & Regulations	Parent vessel	SMR tanker	
		Ship	SMR
Classification	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Lloyd's Register 2012b</li> <li>● IACS Ltd. (2010)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Lloyd's Register 2012b</li> <li>● IACS Ltd. (2010)</li> <li>● Lloyd's Register (2011)</li> </ul>	Class Approval would be devolved to a Nuclear Inspectorate
Statutory	<ul style="list-style-type: none"> <li>● IMO SOLAS (2009)</li> <li>● IMO MARPOL (2011)</li> <li>● IMO ICLL (2009)</li> <li>● IMO (1981)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● IMO SOLAS (2009)</li> <li>● IMO MARPOL Annex I (2011)</li> <li>● IMO ICLL (2009)</li> <li>● IMO (1981)</li> </ul>	A Nuclear Inspectorate would approve the SMR and then the safety case for specific application to a vessel
Propulsion redundancy	None	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Return to a Safe Haven according to IMO MARPOL (2011) Annex I damage scenario</li> <li>● Lloyd's Register (2012b) PSMR requirements</li> </ul>	Not applicable

5.5.4 Επιλογές για το σημείο τοποθέτησης του *SMR* και λεπτομέρειες του συστήματος πρόωσης.

#### 5.5.4.1 Τοποθεσία του *SMR*

Για την σωστή τοποθέτηση του *SMR* στο πλοίο έπρεπε να γίνει η κατάλληλη εκτίμηση κινδύνου ως προς όλα τα κρίσιμα σημεία του πλοίου. Έλαβαν υπόψιν τα εξής επικίνδυνα σενάρια :

1. Πρόσκρουση με άλλο πλοίο
2. Πυρκαγιά στο μηχανοστάσιο
3. Οι κινήσεις του πλοίου καθώς και οι ταλαντώσεις που δημιουργούνται.

Με βάση τα παραπάνω η πιο ασφαλή θέση είναι στο πρυμναίο κομμάτι του πλοίου, πίσω από τις δεξαμενές φορτιού καθώς :

1. Η πιθανότητα πρόσκρουσης στο πίσω μέρος του πλοίου είναι αρκετά μικρή.
2. Ο κίνδυνος ζημίας λόγω έκρηξης φορτίου είναι χαμηλός αλλά όχι απίθανος.
3. Οι δονήσεις του πλοίου σε εκείνο το σημείο είναι λιγότερο πιθανό να προκαλέσουν επιβλαβείς καταπονήσεις.

Παρακάτω ακολουθεί ο συγκριτικός πίνακας με την σύγκριση κινδυνολογίας σε τέσσερις πιθανές θέσεις του *SMR* :

Πίνακας 6 Εκτίμηση κινδύνου για 4 τοποθεσίες του *SMR* πάνω στο πλοίο (S.E. Hirdaris, και συν., 2014)

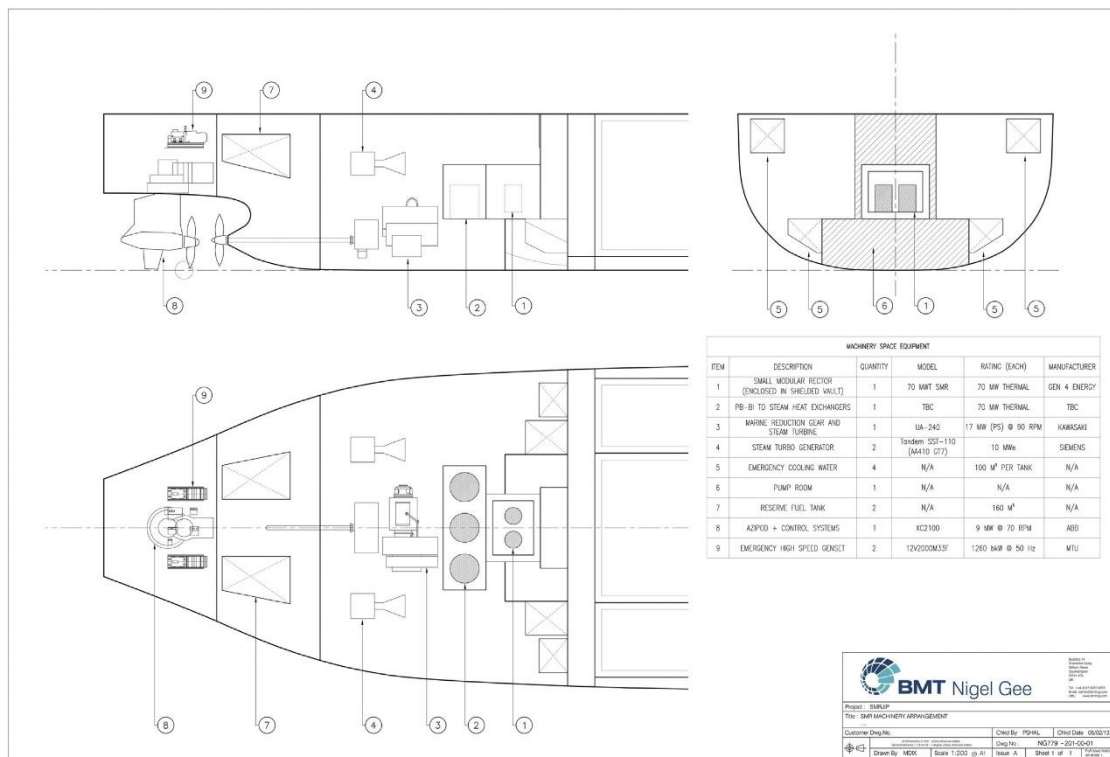
Option	SMR Location	Qualitative vulnerability realisations		
		Collision Damage	Cargo Tanks & Fire/Explosion	Motions & vibrations
A	Aft end – Under Funnel	High	Low	Medium
B	Aft of Cargo Tanks	Low	Medium	Medium
C	Amidships	Medium	High	Low
D	Forward of Cargo Tanks	High	Medium	High

Στον βασικό χώρο του μηχανοστασίου θα βρίσκονται επίσης οι γεννήτριες ατμού, ο μειωτήρας στροφών, μαζί με δυο εφεδρικές γεννήτριες ατμού και όλοι οι σχετικοί συμπίεστες. Για να διατηρηθεί η πρόωση στην χειρότερη κατάσταση σύγκρουσης χρειάζονται, δυο φράκτες σε απόσταση 14,5m μεταξύ τους.

Στο διαμέρισμα του *SMR* υπάρχουν δυο αποθήκες. Η πρώτη περιέχει τον ίδιο τον αντιδραστήρα και η δεύτερη θα είναι χώρος αποθήκευσης του χρησιμοποιημένου πυρήνα ώστε να κρυώσει με ασφάλεια ενώ το πλοίο βρίσκεται σε λειτουργία.

#### 5.5.4.2 Επιπρόσθετα μέτρα ασφαλείας

1. Ένα σύστημα έκτακτης ανάγκης για την ψύξη του αντιδραστήρα διασφαλίζει πως σε κάθε κατάσταση του πλοίου θα μπορεί να παρέχεται στον πυρήνα επαρκεί ψύξη για τουλάχιστον 30 μέρες ώστε να μπορεί να αποσυνδεθεί αυτός, με ασφάλεια.
2. Η τοποθέτηση του αντιδραστήρα βρίσκεται στην κεντρική γραμμή του πλοίου και με επαρκεί κατακόρυφη απόσταση από το διπύθμενο ώστε να υπάρχει ασφάλεια σε περίπτωση προσάραξης.
3. Για την προστασία από ραδιενέργεια υπάρχουν τοιχώματα από χάλυβα 0.05 m στον αντιδραστήρα, καθώς και σε απόσταση 1 μέτρο, θα τοποθετηθεί συνδυασμός από τοιχώματα μολυβδου πάχους 0.15 m και 0.8 m πολυαιθυλενίου.
4. Πρέπει να ληφθούν κατάλληλα μετρά για την προστασία από τις παραγόμενες ταλαντώσεις. Στην θεωρία, με την χρήση του *CRP* (θα αναλυθεί στο [κεφάλαιο παρακάτω](#)), το κύριο αξονικό σύστημα θα χρειάζεται να δώσει μόνο το 70% της απαιτούμενης ισχύς, το οποίο θα ισοδυναμεί με μικρότερες ταλαντώσεις.

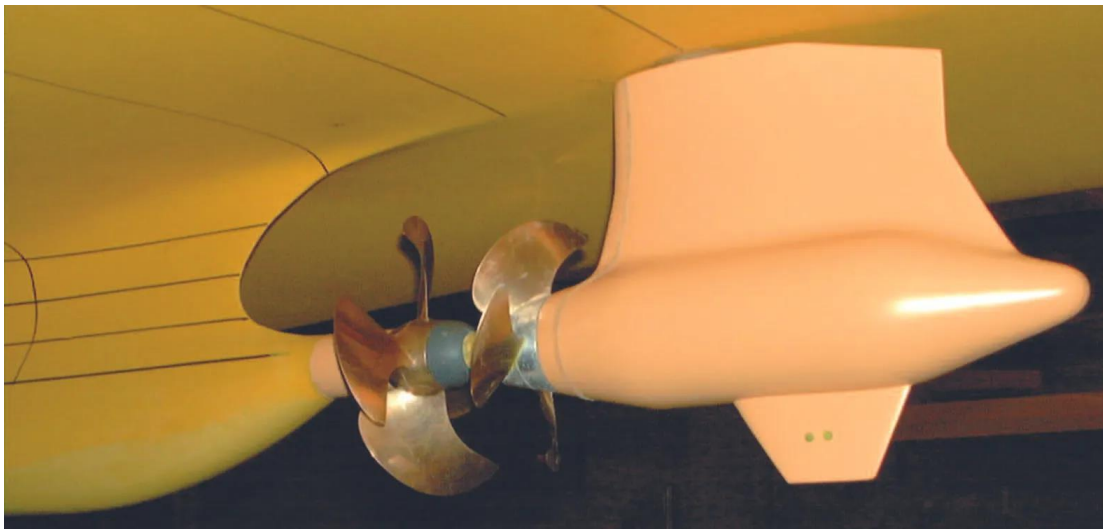


Εικόνα 56 Γενική διάταξη του μηχανοστασίου (S.E. Hirdaris, και συν., 2014)

### 5.5.5 Σύστημα πρόωσης CRP

Η μελέτη εκείνη πρότεινε, ένα συνδυασμός ενός αξονικού συστήματος προπέλας που συνδέεται με την γεννήτρια παραγωγής ατμού του *SMR* και ένα σύστημα με *Azimuth thruster* με *Contra Rotating Propellers (CRP)* το οποίο συνδέεται με μια ηλεκτρομηχανή πετρελαίου ντίζελ εναλλασσόμενου ρεύματος.

Το σύστημα αυτό, (γνωστό και ως *CRP Azipod*) περιλαμβάνει δυο προπέλες, τοποθετημένες η μια απέναντι από την άλλη. Ουσιαστικά η μια διάταξη προπέλας αντικαθιστά το πηδάλιο. Η μια είναι σταθερού βήματος και η άλλη ελεγχόμενου ενώ κατά την λειτουργία τους περιστρέφονται αντίστροφα μεταξύ τους. Αυτός ο σχεδιασμός αρχικά μελετήθηκε για πολύ μεγάλα πλοία εμπορευματοκιβωτίων αλλά μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση μας με κάποιες παραλλαγές. Κατά τα sea trials ενός πλοίου με τον μηχανισμό αυτό, παρατηρήθηκε μέχρι και 20% οικονομία καυσίμου καθώς και βελτίωση στην ελκτική ικανότητα του πλοίου ιδιαίτερα σε λιμάνι.

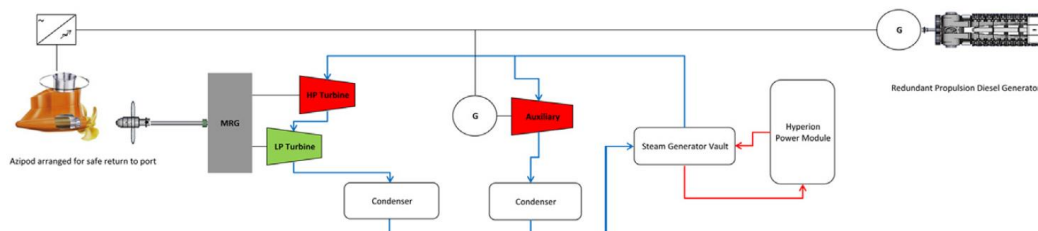


Εικόνα 57 Σύστημα azipod (Wartsila, χ.χ.)

Υπό κανονική λειτουργία το *azimuth thruster* περιστρέφεται αντίθετα από την προπέλα του άξονα ώστε να μπορεί να κάνει ελιγμούς το πλοίο. Το αξονικό σύστημα χρησιμοποιεί 85% της συνολικής ισχύς πρόωσης, ενώ σε περίπτωση βλάβης σε οποιοδήποτε σημείο του βασικού συστήματος, το *azimuth thruster* μπορεί να λειτουργεί ανεξάρτητα με απόδοση περίπου 30% σε σχέση με την ολική ισχύς πρόωσης.

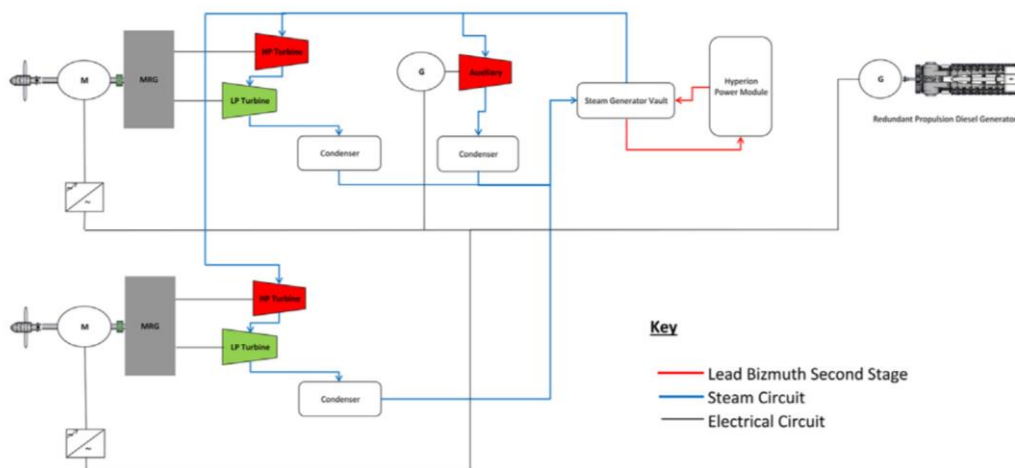
Εκτός από το γεγονός ότι είναι η πιο αποδοτική λύση, η επιλογή αυτή έχει και το μικρότερο αντίκτυπο στην απαιτούμενη επιμήκυνση του πλοίου κατά την μετασκευή καθώς υπολογίστηκε πως χρειάζεται περίπου 10% ή 30 μέτρα. Αυτή η επιμήκυνση είναι 20 m στην πρύμνη του πλοίου ώστε να χωρέσουν τα νέα μηχανήματα και 10 m στην πλώρη του πλοίου ώστε να έχει κατάλληλη διαγωγή.

Για τον εφοδιασμό καυσίμων του εφεδρικού συστήματος υπάρχουν δυο δεξαμενές καυσίμου που περιέχουν αρκετό καύσιμο ώστε το πλοίο να μπορεί να επιστρέψει σε ασφαλή λιμένα από το κέντρο του Ατλαντικού. Επίσης παρέχει στο πλοίο υπηρεσιακή ταχύτητα τουλάχιστον 6-8 κόμβους σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης.



Εικόνα 58 Σχέδιο διάταξης συστήματος πρόωσης (S.E. Hirdaris, και συν., 2014)

Μια εναλλακτική επιλογή ήταν, ένα σύστημα πρόωσης με διπλή έλικα ώστε το δεύτερο αξονικό σύστημα να ήταν διαθέσιμο σε περίπτωση βλάβης ή κατακλυσμού του διαμερίσματος. Σε αυτή την περίπτωση γινόταν αποσύμπλεξη από τους μειωτήρες στροφών και μέσω εφεδρικής γεννήτριας ατμού είχε την κατάλληλη ηλεκτρική ισχύς για να κινηθεί ο άξονας. Αυτή η επιλογή όμως είχε χαμηλότερη απόδοση και ήταν περιπλοκότερη η εγκατάσταση καθώς θα καταλάμβανε μεγαλύτερο χώρο.



Εικόνα 59 : Εναλλακτικό σχέδιο διάταξης με διπλό αξονικό σύστημα (S.E. Hirdaris, και συν., 2014)

#### 5.5.6 Ο ανθρώπινος παράγοντας στην εκτίμηση κίνδυνου

Ο ανθρώπινος παράγοντας είναι μια αβέβαιη μεταβλητή. Για αυτό στο στάδιο σχεδίασης έπρεπε να μπορούν να καταμετρηθούν οι ζημιές που μπορούν να προκληθούν από τους ανθρώπους, καθώς και η σοβαρότητα αυτών, όσον αφορά το πλοίο αλλά και τον αντιδραστήρα. Χωρίστηκαν στις εξής κατηγορίες :

1. Λάθη κατά την συντήρηση. Δεν αναφέρονται απαραίτητα στην διάταξη του SMR αλλά γενικότερα στην συντήρηση του σκάφους.
2. Εσφαλμένη χρήση κάποιων τεχνολογιών η οποία τελικά μπορεί να επηρεάσει άμεσα τον SMR ( π.χ. Εσφαλμένη διαχείριση του φορτίου ή εσφαλμένη διαχείριση της εγκατεστημένης ισχύς η οποία οδηγεί σε μεγαλύτερη καταπόνηση της εγκατάστασης )
3. Γενικές κακοήθεις ενέργειες όπως τρομοκρατικές επιθέσεις και πειρατεία είναι ρεαλιστικές απειλές για τα εμπορικά πλοία που περνούν από περιοχές όπως Σομαλία και Νιγηρία. Θα πρέπει να ληφθούν κατάλληλα αντίμετρα ώστε τέτοιες επιθέσεις να μην αποτελούν απειλή για τον SMR.
4. Το λογισμικό και η διεπαφή χρήστη στην μονάδα SMR πρέπει να είναι τελείως απλοποιημένα ώστε να μειώνεται η πιθανότητα οποιουδήποτε χειριστικού λάθους. Συγκεκριμένα, ο έλεγχος της ισχύς του αντιδραστήρα να είναι εξ ολοκλήρου αυτοματοποιημένος ώστε να μην υπάρχει πιθανότητα λάθους χειρισμού.



## 5.6 Ναυπηγική επισκόπηση της μετασκευής

Ωστε να αντιμετωπισθούν τυχόν πρόσθετοι κίνδυνοι που σχετίζονται με τον ναυπηγικό σχεδιασμό της μετασκευής, εξέτασαν, την επίδραση των επιλογών πρόωσης στη γενική διαρρύθμιση του σκάφους, αλλαγές στην κατανομή των βαρών και την διαγωγή, την ευστάθεια καθώς και την ισχύ του SMR σε σχέση με την εκτίμηση της ζωής του αντιδραστήρα.

Πίνακας 7 Χαρακτηριστικά του δεξαμενόπλοιου SMR σε σχέση με το πατρικό σκάφος (S.E. Hirdaris, και συν., 2014)

Principal Particulars	Parent ship	SMR tanker
$L_{OA}$ (m)	274.48	304.25
$L_{PP}$ (m)	264.00	287.03
B (moulded) (m)	48.00	48.00
D (moulded) (m)	23.10	23.10
$T_{scantling}$ (moulded) (m)	17.05	15.84
Summer freeboard (m)	6.07	7.26
$T_{summer\ load}$ (moulded) (m)	17.05	15.84
Lightship weight (tonnes)	23,528	29,870
$\nabla$ (t)	182,617	185,371
Deadweight (t)	159,090	155,501
P at 100% MCR (kW)	18,881	23,515 <sup>a</sup>
V (knots)	14	14
%MCR at V <sup>b</sup>	54	42

<sup>a</sup> Based on full 70 MW<sub>T</sub> being delivered to the propulsive steam turbines.

<sup>b</sup> At design trial condition.

Μπροστά από τις δεξαμενές φορτίου τοποθέτησαν προσθετή πλευστότητα ώστε η διαγωγή να παραμείνει σταθερή. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα το τελικό μήκος σκάφους να είναι 305 m.

Το lightship του πλοίου υπολογίστηκε στα 29,890 τόνους, με βάση τα προσθετά και τα αναιρούμενα βάρη της κατασκευής. (βλ. Εικόνα 61 )

Με βάση το βιβλίο ευστάθειας (*trim and stability booklet*) του σκάφους, υπολογίστηκε η διαγωγή, για δυο ακραίες καταστάσεις φόρτωσης :

1. Για αναχώρηση σε κατάσταση ερματισμού ( *ballast condition* )
2. Για πλήρη ομοιογενή φόρτωση στο βύθισμα σχεδίασης

Δεδομένου ότι το δεξαμενόπλοιο SMR προορίζεται να μεταφέρει το ίδιο φορτίο με το πατρικό σκάφος, εξήχθη το συμπέρασμα ότι η εκτόπισή του αυξήθηκε κυρίως λόγω τροποποιήσεων στο *lightweight*. Όσον αφορά την ευστάθεια, δεδομένου ότι η γεωμετρία και η χωρητικότητα των δεξαμενών φορτίου δεν είχαν αλλάξει, εφάρμοσαν τη διόρθωση ελεύθερων επιφανειών, που καταγράφηκε για το πατρικό σκάφος σε κατάσταση φόρτωσης σκάφους που προαναφέρθηκαν και τα αποτελέσματα βρέθηκαν εντός του εύρους του σχετικού IMO (1981) Resolution A. 491 (XII)

*Πίνακας 8 Κριτήρια ευστάθειας IMO (S.E. Hirdaris, και συν., 2014) (IMO (1981) Resolution A. 491 (XII))*

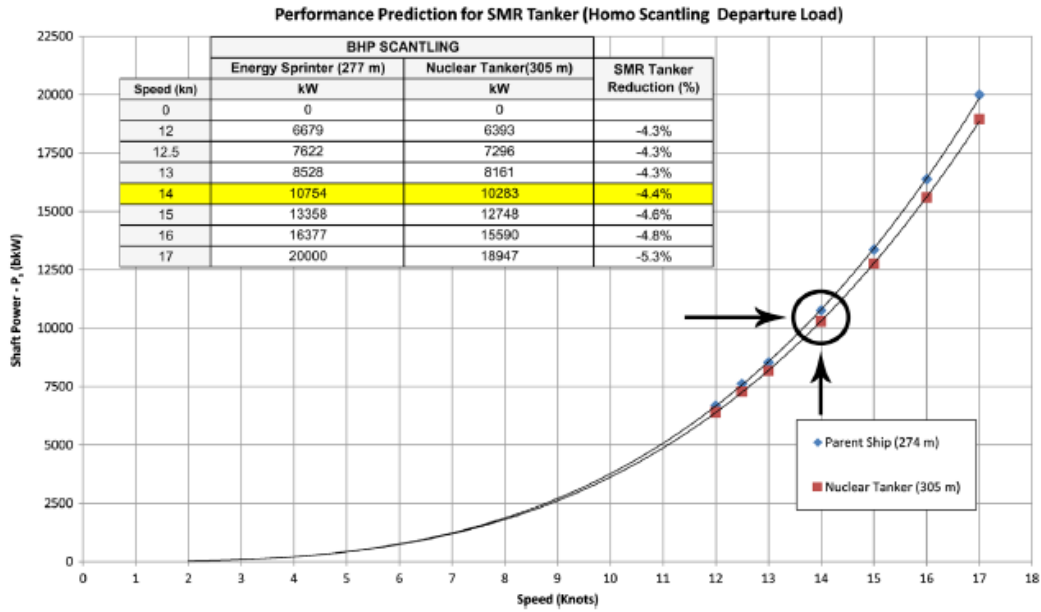
**Stability criteria according to IMO RES.A749(18) (Note: Flooding angle  $\theta_f \geq 40^\circ$  so  $40^\circ$  is adopted).**

<b>Criteria</b>	<b>Requirement</b>
Area under curve up to $30^\circ$	0.055 mrad
Area under curve up to $40^\circ$ or $\theta_f$ whichever is less	0.09 mrad
Area between $30^\circ$ and $40^\circ$ or $\theta_f$ whichever is less	0.03 mrad
GZ at angle of equal to or greater than $30^\circ$	0.20 m
The angle at which the max. GZ occurs	$25^\circ$
The initial metacentric height GM	0.15 m

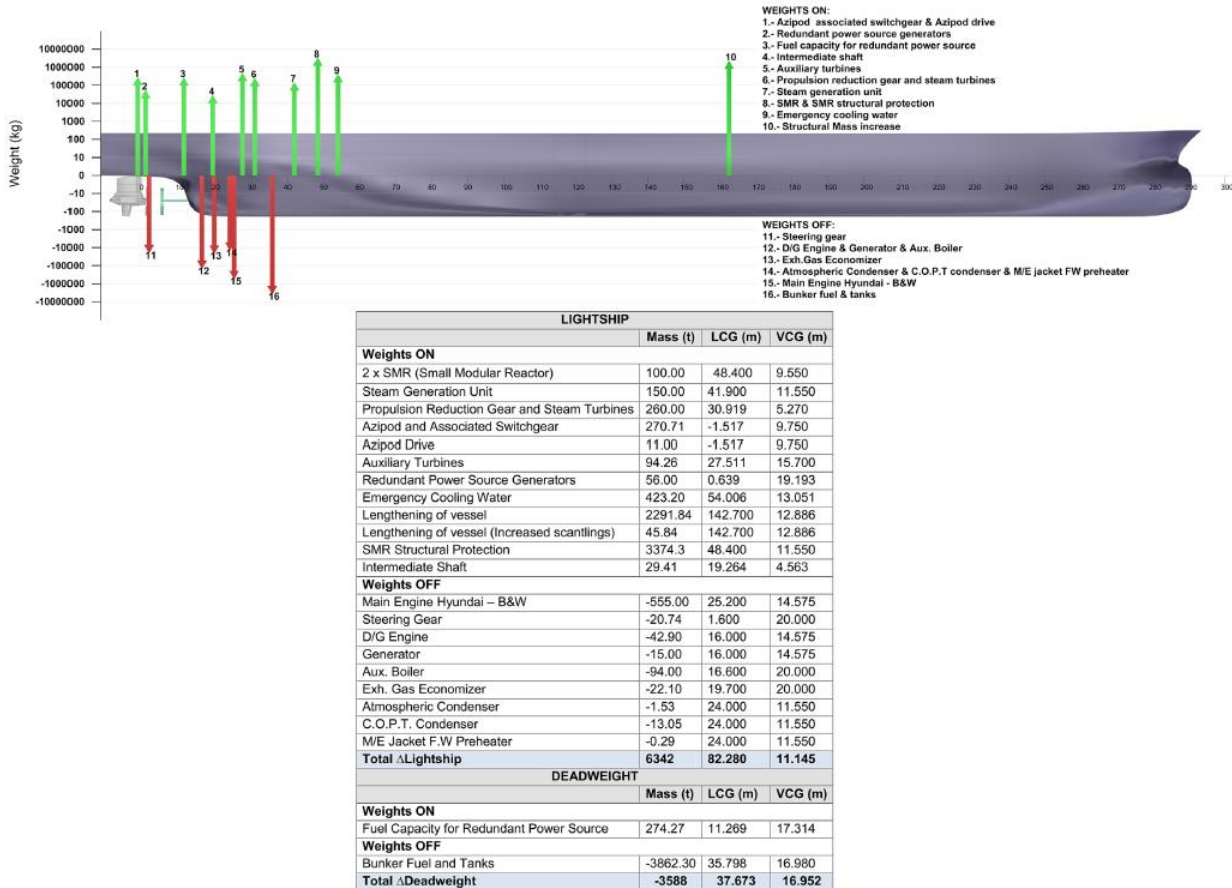
Συζητήσεις με κατασκευαστές εξοπλισμού SMR απέδειξαν πως η προβλεπόμενη απόδοση του δεξαμενόπλοιου SMR αυξήθηκε κατά 8% σε σύγκριση με το πατρικό σκάφος. Ως εκ τούτου, με βάση το βύθισμα σχεδίασης, το οποίο μειώνεται κατά 4.4%, η ισχύς πρόωσης που απαιτείται για το SMR *Suezmax* σε 14 κόμβους εκτιμήθηκε πως θα είναι 10.283 kW.

Με την απαισιόδοξη υπόθεση ότι το πλοίο, θα λειτουργεί με πλήρες φορτίο μόνο το 60% του έτους και θα είναι σε κατάσταση έρματος το υπόλοιπο έτος, εξήχθη το συμπέρασμα ότι κατά μέσο όρο η ισχύς στον άξονα ήταν περίπου 8860 kW.

Δεδομένου ότι ο πυρήνας του αντιδραστήρα είναι σχεδιασμένος να αντέξει για 10 χρόνια σε πλήρη ισχύς, η οποία είναι 70 MWt, εκτιμήθηκε πως μπορεί να παρέχει ισχύς πρόωσης για 25 χρόνια..



Εικόνα 60 Διάγραμμα έλικας SMR Tanker και πατρικού σκάφους (S.E. Hirdaris, et al., 2014)



Εικόνα 61 Κατανομή βαρών σκάφους μετά την μετασκευή (S.E. Hirdaris, et al., 2014)

## Κεφάλαιο 6: : Περιβαλλοντικό αποτύπωμα

### 6.1 Εκπομπές καυσαερίων στη ναυτιλιακή βιομηχανία

Η ναυτιλιακή βιομηχανία προσφέρει έναν αποτελεσματικός τρόπος μεταφοράς και είναι υπεύθυνη για το 90% του παγκόσμιου εμπορίου, ωστόσο με αυτόν τον τρόπο συνέβαλε το 2,89% των παγκόσμιων εκπομπών CO<sub>2</sub> το 2018. Η ναυτιλιακή βιομηχανία αναμένεται να συνεχίσει να αναπτύσσεται και χωρίς μέτρα ελέγχου για τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, μέχρι το 2050, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> εκτιμάται ότι θα είναι έως και 50% περισσότερες από ότι ήταν το 2018 . (IMO, 2020)

Πίνακας 9 : Εκπομπές CO<sub>2</sub> της ναυτιλιακής βιομηχανίας 2012-2018 (IMO, 2020)

Year	Global anthropogenic CO <sub>2</sub> emissions	Total shipping CO <sub>2</sub>	Total shipping as a percentage of global	Voyage-based International shipping CO <sub>2</sub>	Voyage-based International shipping as a percentage of global	Vessel-based International shipping CO <sub>2</sub>	Vessel-based International shipping as a percentage of global
2012	34,793	962	2.76%	701	2.01%	848	2.44%
2013	34,959	957	2.74%	684	1.96%	837	2.39%
2014	35,225	964	2.74%	681	1.93%	846	2.37%
2015	35,239	991	2.81%	700	1.99%	859	2.44%
2016	35,380	1,026	2.90%	727	2.05%	894	2.53%
2017	35,810	1,064	2.97%	746	2.08%	929	2.59%
2018	36,573	1,056	2.89%	740	2.02%	919	2.51%

### 6.2 Εναλλακτικά καύσιμα για συστήματα πρόωσης

Η πλέον εφαρμοσμένες λύσεις είναι

1. Η χρήση καυσίμου απόσταξης χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο αντί για Heavy Fuel Oil δηλαδή VLSFO (Very-low sulfur fuel oil) και ULSFO (Ultra-low sulfur fuel oil ), τα οποία έχουν περιεκτικότητα σε θείο 0.5% και 0.1% αντίστοιχα.
2. Η χρήση συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων (Scrubbers). Αυτά απομακρύνουν τους ρύπους κατά την έξοδο των καυσαερίων προς την ατμόσφαιρα. Παρόλα αυτά είναι, δαπανηρή και μεγάλη εγκατάσταση που καταλαμβάνει σημαντικό χώρο στο μηχανοστάσιο.

Οι μειώσεις NO<sub>x</sub> επιτυγχάνονται μέσω βελτιστοποίησης της διαδικασίας καύσης ή / και δαπανηρών τεχνολογιών ελέγχου NO<sub>x</sub>, όπως συστήματα ανακυκλοφορίας καυσαερίων.

Εάν τα πλοία συνεχίσουν να βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, οι μειώσεις των εκπομπών μπορούν να επιτευχθούν μέσω τεχνολογικών και επιχειρησιακών εξελίξεων μαζί με την εφαρμογή του δείκτη σχεδιασμού ενεργειακής απόδοσης του IMO (EEDI- Energy Efficiency

Design Index) και του σχεδίου διαχείρισης ενεργειακής απόδοσης πλοίων (SEEMP- Ship Energy Efficiency Management Plan). Επίσης βελτιώσεις στο σχεδιασμό του κύτους και της έλικας καθώς και η υβριδική πρόωση θα μπορούσαν να μειώσουν την κατανάλωση καυσίμου.

Το φυσικό αέριο είναι μια εναλλακτική λύση που μειώνει σημαντικά τις εκπομπές. Αυτό φυσικά έχει μειονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένης της περιορισμένης διαθεσιμότητας λόγω της χερσαίας ζήτησης και της χαμηλότερης ογκομετρικής ενεργειακής πυκνότητας. Το φυσικό αέριο απαιτεί υγροποίηση για αποθήκευση και θα απαιτούσε τέσσερις φορές το χώρο αποθήκευσης από αυτό του συμβατικού πετρελαίου. Σήμερα είναι πολύ καλή εφαρμογή για τα πλοία LNG τα οποία αξιοποιούν το φορτίο τους (Boil off gas), για να καλύπτουν σημαντικό ποσοστό της απαιτούμενης ενέργειας τους.

Η ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η αιολική ενέργεια και η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμες σε πολλά διαφορετικά συστήματα. Ωστόσο, η συμβολή τους στην ισχύ που απαιτείται για την πρόωση είναι μικρή και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες. Επομένως, μπορούν να προσφέρουν μόνο μείωση της κατανάλωσης καυσίμου με την επιλογή παροχής βοηθητικής ισχύος. Οι Κύριες Μηχανές ντίζελ θα πρέπει να παραμείνουν, ο κύριος τρόπος παραγωγής ενέργειας για την πρόωση.

Οι κυψέλες καυσίμου είναι ένας εξαιρετικά αποτελεσματικός τρόπος παραγωγής ενέργειας με υδρογόνο. Το υδρογόνο ως καύσιμο για την παραγωγή θαλάσσιας ενέργειας στην εμπορική ναυτιλία είναι, απίθανο, να εφαρμοστεί βραχυπρόθεσμα. Μια κυψέλη καυσίμου θα απαιτούσε συμβατικό πετρέλαιο ή φυσικό αέριο που θα μετατρεπόταν σε υδρογόνο με πολύ χαμηλότερη απόδοση. Αυτό θα καθιστούσε την κυρία μηχανή πολύ μεγαλύτερη και πιο περίπλοκη και δεν επιλύει το πρόβλημα των εκπομπών. Επί του παρόντος, οι κυψέλες καυσίμου δεν αποτελούν βιώσιμη λύση, αλλά σιγουρά θα εξελιχθούν μακροπρόθεσμα. (Gravina, Blake, Prof Ajit Shenoι, Prof Stephen Turnock, & Hirdaris, 2012)

Ο πίνακας παρουσιάζει μια λίστα με τις διαθέσιμες τεχνολογίες που προσφέρουν μείωση των εκπομπών. Είναι σαφές ότι δεν υπάρχει λύση που να εξαλείφει όλες τις εκπομπές και καμία δεν μπορεί να προσφέρει σημαντική μείωση του CO<sub>2</sub> (εκτός από το υδρογόνο, ωστόσο αυτό δεν είναι έτοιμο για εγκαταστάσεις πρόωσης πλοίων). Η πυρηνική ενέργεια μπορεί να αντικαταστήσει πλήρως αυτές τις εκπομπές και για το λόγο αυτό θεωρείται βιώσιμη επιλογή και αναπτύσσονται αρκετές μελέτες σκοπιμότητας και βασικά σχέδια .

Πίνακας 10 Μέτρα μείωσης εκπομπών (S.E. Hirdaris, και συν., 2014)

Κατηγορία	Τεχνολογία/Μέτρο	Μείωση καυσαερίων (%)			
		NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	PM
Πριν την καύση	Υγρασία στον αέρα του κινητήρα	70	0	0	0
	Ανακυκλοφορία καυσαερίων	35	0	0	0
	Νερό στα καύσιμα (μέγ. 20%)	20	0	0	40
	Καύσιμο χαμηλής περεκτικότητας σε	0	80	0	20
	ΥΦΑ	60	90	25	72
	Υδρογόνο	20	100	100	0
Κατά την καύση	Άμεση έγχυση νερού	50	0	0	50
	Βασική τροποποίηση κινητήρα	20	0	0	0
	Προηγμένη τροποποίηση κινητήρα	30	0	0	0
Μετά την καύση	Επιλεκτική καταλυτική αναγωγή	90	0	0	0
	Υποβοηθούμενη από πλάσμα καταλυτική	90	0	0	0
	Καθαριστής θαλασσινού νερού	0	75	0	25
Πυρηνική	Σχάση	100	100	100	100
	Σύντηξη	Πρώμο στάδιο μελέτης			

### 6.3 Πλεονεκτήματα πυρηνικής πρόωσης.

Οι κανονισμοί για τις εκπομπές, η αύξηση της τιμής του πετρελαίου και η μείωση των πόρων ορυκτών καυσίμων μπορούν να καταστήσουν την πυρηνική ενέργεια ελκυστική και οικονομικά βιώσιμη εναλλακτική λύση. Τα πυρηνικά πλωτά μέσα, λειτουργούν εδώ και πάνω από 50 χρόνια και από το πρώτο πυρηνικό υποβρύχιο, περίπου 700 πυρηνικοί αντιδραστήρες λειτουργούν στη θάλασσα σε διάφορα πλοία (κυρίως στρατιωτικά). Σήμερα υπάρχουν περίπου 200 πυρηνικοί αντιδραστήρες που εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται.

Εξαιρώντας το προφανές πλεονέκτημα των μηδενικών εκπομπών η πυρηνική ενέργεια έχει επίσης τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

1. Η τιμή του πυρηνικού καυσίμου είναι σταθερή και προβλέψιμη, σε αντίθεση με τις διακυμάνσεις των τιμών των ορυκτών καυσίμων.
2. Μπορεί να είναι δυνατή η αύξηση της ταχύτητας των πλοίων έτσι ώστε ένας μικρότερος στόλος πλοίων να μεταφέρει την ίδια ποσότητα φορτίου σε δεδομένο χρονικό διάστημα. Επίσης, δεν θα χρειάζεται ανεφοδιασμό το πλοίο για πολλά χρόνια. Αυτό σημαίνει πως δεν θα έχει νεκρούς χρόνους οπότε θα μπορεί να εκτελεί ταξίδια αδιάκοπα.
3. Η πυρηνική ενέργεια μπορεί να προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση χώρου στο μηχανοστάσιο, λόγω της συμπαγούς πηγής ισχύος. Δεν απαιτεί αποθήκευση για χιλιάδες τόνους καυσίμου πετρελαίου, κατά συνέπεια, αυτά τα σκάφη θα ζυγίζουν λιγότερο και θα έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα. Με καταλληλά εκπαιδευμένο προσωπικό, το καύσιμο θα είναι πιο απλό στην χρήση του σε σχέση με τα σημερινά καύσιμα. Κάθε είδος καυσίμου που χρησιμοποιείτε σήμερα στο πλοίο ( HFO , MGO , VLSFO , ULSFO ,

Biofuels ) , έχει ιδιαιτερότητες και υπάρχει κίνδυνος για παρουσία προβλημάτων με την λάθος διαχείριση του.

4. Τα πυρηνικά πλοία θα μπορούσαν να σχεδιαστούν ώστε να έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, δεδομένου, ότι ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής, δεν θα υπόκειται σε φθορές αντίστοιχες με αυτές των ορυκτών καυσίμων.
5. Η αξιοπιστία των πυρηνικών αντιδραστήρων είναι πολύ υψηλή. Με βάση τη ναυτική εμπειρία, η αξιοπιστία του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, συμπεριλαμβανομένων των εργασιών ανεφοδιασμού, είναι μεγαλύτερη από 95% .
6. Η πυρηνική ενέργεια είναι μια αποδεδειγμένη τεχνολογία θαλάσσιας πρόωσης που είχε περίπου 700 πυρηνικούς σταθμούς που επιχειρούσαν στην θάλασσα, χωρίς σοβαρά ατυχήματα, που να οφείλονται στον αντιδραστήρα. (Gravina, Blake, Prof Ajit Shenoι, Prof Stephen Turnock, & Hirdaris, 2012) (S.E. Hirdaris, και συν., 2014)

## Κεφάλαιο 7: : Πυρηνική ενέργεια στη ναυτιλία - Οικονομική ανάλυση και προκλήσεις

### 7.1 Οικονομική βιωσιμότητα

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύθηκαν πολλά ήδη *SMR* που βρίσκονται σε προχωρημένα και μη, στάδια ανάπτυξης. Σχεδόν όλα τα *Project* αποτελούν συνεργασία μεταξύ ιδιωτικού και δημοσίου τομέα καθώς έχουν δοθεί αρκετές επιχορηγήσεις. Κάποια από αυτά τα *Project* για κατασκευή πρωτότυπων/πειραματικών μονάδων *SMR* ξεπερνούν το συνολικό *budget* του \$1 δις και διαρκούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς να είναι σίγουρο το πότε και αν, θα ολοκληρωθούν.

Όσον αφορά τα επίγεια πυρηνικά εργοστάσια, αυτή τη στιγμή το μεγαλύτερο αρνητικό τους είναι, οι μεγάλοι χρόνοι κατασκευής (5-7 χρόνια ) και το μεγάλο κόστος κεφαλαίου, καθώς το κόστος κατασκευής είναι πάνω από το 80% του συνολικού κόστους του εργοστασίου.

Οι *SMR* στοχεύουν να εξαλείψουν αυτά τα προβλήματα, καθώς λόγω της εργοστασιακής κατασκευής τους θα έχουν πιο συντόμους χρόνους υλοποίησης. Επίσης ένα εργοστάσιο θα έχει πολλαπλές μονάδες *SMR* αναλόγως με τις ανάγκες του δικτύου. Αυτό σημαίνει όμως πως όταν μπει σε λειτουργία έστω και η πρώτη μονάδα ( η οποία δεν θα χρειαστεί 7 χρόνια να μπει σε λειτουργία σε σχέση με το παραδοσιακό εργοστάσιο ), θα ξεκινήσει προσφέρει εισόδημα μειώνοντας το κόστος των υπολοίπων μονάδων. Επομένως αυτομάτως, αποτελεί μια πιο ασφαλή επένδυση σε σχέση με ένα παραδοσιακό σταθμό, που θέλει πολλά χρόνια για να κάνει οικονομική απόσβεση στον επενδυτή.

Στην ναυτιλιακή βιομηχανία όμως, πολλές φορές, οι εφοπλιστές και οι επενδυτές γενικότερα, έχουν την τάση να περιμένουν να ωριμάσει ή να εφαρμοστεί πρώτα μια τεχνολογία μέχρι να τους πείσει ότι είναι καλή επένδυση. Επομένως θα πρέπει πρώτα να ωριμάσει η τεχνολογία στις επίγειες εφαρμογές ώστε να μπορέσει να γίνει ελκυστική πρόταση. Για να γίνει μια τέτοια επένδυση χρειάζεται προσεκτική μελέτη της αγοράς.

Όταν η ωριμάσει η τεχνολογία και θα ανεβεί η ζήτηση για μικρούς αντιδραστήρες , τότε το κόστος και οι χρόνοι παραγωγής θα μειωθούν. Καθώς ο SMR θα είναι εργοστασιακά έτοιμος, θα χρειάζεται πάρα μόνο απλή τοποθέτηση στο μηχανοστάσιο ενός νεότευκτου πλοίου. Μια γραμμή παραγωγής θα μπορούσε να βοηθήσει και στην δημιουργία αδερφών πλοίων με τους ίδιους αντιδραστήρες χωρίς αυτό να επηρεάζει το χρονικό πλαίσιο της κατασκευής.

Σε αυτό το στάδιο δεν είναι εύκολο να συγκριθεί το κόστος κατασκευής και συντήρησης ενός μικρού αντιδραστήρα σε σχέση με μια κυριά μηχανή ντίζελ ενός πλοίου. Τα έξοδα ενός SMR θα είναι :

1. Συνολικό κόστος κατασκευής ή αγοράς. Εφόσον μιλάμε για έναν, πλήρως, εργοστασιακά φτιαγμένο αντιδραστήρα τότε θα είναι σιγουρά εξασφαλισμένος για τις ανάγκες του πλοίου που θα τοποθετηθεί. Αργότερα όταν εδραιωθεί περισσότερο η πυρηνική ενέργεια τότε ενδεχομένως, να υπάρχουν έτοιμοι αντιδραστήρες για κάθε μορφή γάστρας και οι κατασκευαστές να έχουν ανάλογες προτάσεις, όπως είναι σήμερα με τις κυρίες μηχανές ντίζελ.
2. Το υπηρεσιακό κόστος και το κόστος συντήρησης. Αυτή τη στιγμή είναι αδύνατο να υπολογιστεί με ακρίβεια. Θα παίξει όμως καθοριστικό ρολό στην τελική απόφαση των επενδυτών, για την πυρηνική ενέργεια. Υπάρχει πάντα το ενδεχόμενο, η λειτουργία ενός τέτοιου πλοίου να αποδειχθεί οικονομικά ανυπόφορη, ειδικά στα πρώτα στάδιά της, σε σχέση με άλλα εναλλακτικά καύσιμα
3. Το κόστος καυσίμου καθώς και όλων των υλικών που χρειάζονται στον αντιδραστήρα.
  - a. Αυτά είναι, τα ευσχάσιμα υλικά όπως υψηλού ή χαμηλού εμπλουτισμού Ουράνιο και μεικτά καύσιμα όπως Ουράνιο με Θόριο.
  - b. Το κόστος της διαδικασίας του εμπλουτισμού του καυσίμου.
  - c. Το κόστος άλλων υλικών που χρησιμοποιούνται στον αντιδραστήρα όπως Γραφίτης και Ζιρκόνιο
  - d. Καθώς και όλα τα περιφερειακά κότσοι γύρω από την συνολική διαχείριση του καυσίμου όπως η παραγωγή, η μεταφορά , εξόρυξη καθώς και η επεξεργασία των απόβλητων του χρησιμοποιημένου καυσίμου.
4. Το κόστος παροπλισμού του αντιδραστήρα στο τέλος της διάρκειας ζωής του. Σε πολλές περιπτώσεις το καύσιμο μπορεί να επαναχρησιμοποιείται σε άλλα είδη αντιδραστήρων, οπότε να υπάρχει κάποιο κέρδος κατά τον παροπλισμό. Θα πρέπει να υπάρχουν κατάλληλες εκστάσεις που να επεξεργάζονται, να ανακυκλώνουν και να αποθηκεύουν με ασφάλεια τα πυρηνικά απόβλητα, ανάλογα με την περίπτωση. Θα



παίζουν καθοριστικό ρολό οι νέες νομοθεσίες καθώς θα πρέπει να τηρούνται κάποια στάνταρ ( ISO ) σε θέματα ασφάλειας όλων των παραπάνω διαδικασιών. (Ingersoll & Carelli, 2021)

Όλα τα παραπάνω κότσοι αποτελούν καίριους παράγοντες που θα κρίνουν το αν τελικά η πυρηνική ενέργεια θα είναι ανταγωνιστική εναλλακτική. Αν σκεφτούμε όμως πως είναι η μοναδική 100% καθαρή μορφή ενέργειας, ίσως να αξίζει το παραπάνω κόστος καθώς έτσι οι πλοιοκτήτες θα διασφαλίζουν ότι τα πλοία τους είναι αυτομάτως στα όρια των κανονισμών, οι οποίοι όλο γίνονται πιο αυστηρή όσον αφορά την μείωση των ρίπων αέριων θερμοκηπίου.

Από 1<sup>η</sup> Ιανουάριου 2023 τίθενται σε ισχύ τα νέα μέτρα του IMO για το Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI). Η ενεργειακή αποδοτικότητα ενός πλοίου θα βαθμολογείται από A,B,C,D,E, όπου A είναι το υψηλότερο. Αν ένα πλοίο έχει βαθμολογία D για τρία συνεχόμενα χρόνια ή E τότε θα υποχρεούται να φτιάξει και παραδώσει ένα διορθωτικό πλάνο. Μια μετασκευή σαν αυτή που περιεγράφηκε στην [Ενότητα 6](#), με προσθήκης SMR σε υπάρχον πλοίο, στο μέλλον μπορεί να αποτελεί μια ρεαλιστική λύση σε παρομοίους και ακόμα και αυστηρότερους κανονισμούς.

## 7.2 Νομοθετικό πλαίσιο

Είναι προφανές πως πριν εφαρμοστεί αυτή η τεχνολογία θα πρέπει πρώτα να υποστηριχτεί από τους Νομοθετικούς οργανισμούς όπως τον IMO. Είδη υπάρχει παράρτημα για πυρηνικά πλοία ( Nuclear Ships ) στο Chapter VIII της SOLAS.

Πριν εφαρμοστούν οι SMR στη ναυτιλία, θα πρέπει πρώτα να γίνει η σωστή αδειοδότηση για την δημιουργία αντιδραστήρων σε παγκόσμιο επίπεδο. Η τεχνολογία LWR έχει εφαρμοστεί για περισσότερα χρόνια, στα πυρηνικά υποβρύχια και στα σύγχρονα Ρωσικά παγοθραυστικά. Επομένως αυτή η τεχνολογία είναι πιο κοντά στο να υλοποιηθεί σε μικρούς αντιδραστήρες. Όλα τα υπόλοιπα *project* είναι σε ερευνητικό στάδιο και έχουν αρκετά χρόνια μπροστά τους μέχρι να αποδείξουν την αξία τους.

Μόλις η τεχνολογία αποδειχθεί αξιόπιστη, τότε θα είναι δυνατό να γίνουν παραπάνω μελέτες για πλοία με SMR, το οποίο θα οδηγήσει στην υποστήριξη του IMO και στην δημιουργία κατάλληλου νομοθετικού πλαισίου, ώστε αυτές οι τεχνολογίες να εφαρμοστούν αποδοτικά και με ασφάλεια. Θα πρέπει να υπάρξει στενή συνεργασία μεταξύ IMO και IAEA και ίσως άλλους οργανισμούς πυρηνικής ενέργειας για την υλοποίηση αυτή.

### 7.3 Ανάπτυξη υποδομών

Για να εφαρμοστεί σωστά η τεχνολογία SMR στη ναυτιλία θα πρέπει να γίνει σε παγκόσμια κλίμακα. Εάν τέτοιο πλοίο για να λειτουργήσει αποδοτικά θα πρέπει να έχει τεχνική υποστήριξη σε αρκετά λιμάνια του κόσμου.

Αυτό σημαίνει πως θα πρέπει να υπάρχουν ειδικά πιστοποιημένα ναυπηγεία ή τεχνικά συνέργεια, που να μπορούν να κάνουν τον ανεφοδιασμό του αντιδραστήρα. Αν σκεφτούμε πως ένα ρεαλιστικό διάστημα ανεφοδιασμού κυμαίνεται από 3-7 χρόνια τότε αυτό θα μπορούσε να προγραμματιστεί στα πλαίσια του δεξαμενισμού ενός πλοίου μαζί με της υπόλοιπες εργασίες. Αλλιώς ο ανεφοδιασμός θα πρέπει να γίνεται σε ειδικές εγκαταστάσεις που θα μπορούν να επεξεργαστούν και να αποθηκεύσουν το χρησιμοποιημένο καύσιμο.

### 7.4 Εργασιακές αλλαγές και εκπαίδευση προσωπικού

Με τις αλλαγές αυτές θα πρέπει να υπάρχει και καταλληλά εκπαιδευμένο και πιστοποιημένο προσωπικό πάνω στο πλοίο, παρόλο που οι τεχνολογίες SMR έχουν πολλά σύστημα ασφάλειας τα οποία τους καθιστούν αξιόπιστους.

Όπως συμβαίνει μέχρι σήμερα, οι ναυτικοί θα παρακολουθούν τα καταλληλά σεμινάρια ώστε να μπορούν να ανταπεξέλθουν στις αλλαγές. Είναι πιθανό ένα πλοίο με SMR στο μηχανοστάσιο, να χρειάζεται λιγότερους μηχανικούς από ότι ένα πλοίο με κινητήρα Diesel, καθώς υπάρχουν πολλά αυτοματοποιημένα συστήματα στον αντιδραστήρα. Αυτό βέβαια θα είναι αρνητικό καθώς θα μειωθούν οι θέσεις εργασίας στα πλοία, ενώ ταυτόχρονα η δουλειά θα γίνεται πιο απαιτητική.

### 7.5 Ανταγωνιστικό περιβάλλον

Η ναυτιλιακή βιομηχανία βρίσκεται σε ένα μεταβατικό στάδιο καθώς προσπαθεί να μειώσει τους ρίπους της. Υπάρχουν πολλές τεχνολογίες που βρίσκονται υπό ανάπτυξη με σκοπό να δώσουν μια απάντηση στον αγώνα αυτό. Η πυρηνική ενέργεια, αν και είναι δεδομένο πως είναι η μοναδική καθαρή πηγή ενέργειας, χωρίς ρίπους, είναι πιο μακριά στην υλοποίηση της από όλες. Αν εξαιρέσουμε το μονοπωλείτο της Ρωσίας με τα παγοθραυστικά της, δεν υπάρχουν σχέδια για άμεση υλοποίηση των RITM σε άλλα πλοία.

Τα υπόλοιπα εναλλακτικά καύσιμα, όπως τα Βιοκάυσιμα, Μεθανόλη, Αμμωνία και Υδρογόνο βρίσκονται σε πιο προχωρημένα στάδια ανάπτυξης και κάποια από αυτά θα εφαρμοστούν άμεσα σε νεότευκτα πλοία. Παρόλο που όλα αυτά έχουν κάποια μορφή ρίπων

στα καυσαέρια τους, αποτελούν μια πιο ασφαλή επένδυση για το άμεσο μέλλον. Για αυτό τον λόγο ίσως οι SMR στη Ναυτιλία να μην γίνουν ποτέ ευρέως διαδεδομένη, όσο θα ωριμάζουν οι υπόλοιπες τεχνολογίες.

Πιο πάνω αναλυθήκαν πολλά είδη SMR κάποιον από τους οποίους θα τεθούν σε ισχύ μέχρι το 2030. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, ένας SMR μπορεί να βοηθήσει στην παραγωγή άλλων εναλλακτικών καυσίμων, κι ας μην είναι ο ίδιος μέσα στο μηχανοστάσιο του πλοίου. Αυτό τον καθιστά άμεσα ένα πολύ σημαντικό τεχνολογικό άλμα το οποίο μπορεί να δώσει λύσεις τόσο επίγειες εγκαταστάσεις όσο και την ναυτιλιακή βιομηχανία.

## Κεφάλαιο 8: : Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν σφαιρικά όλες οι πτυχές τις πυρηνικής ενέργειας και το πως αυτή έχει εφαρμοστεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας άλλα και όχι μόνο. Είναι προφανές σε όλη την επιστημονική κοινότητα πως η ενέργεια του ατόμου αν αξιοποιηθεί σωστά μπορεί να δώσει τεράστια ποσά ενέργειας.

Δυστυχώς μόλις 3 πυρηνικά ατυχήματα (Three Mile Island 1979, Chernobyl 1986, Fukushima 2011 ) , ήταν αρκετά για στιγματίσουν την πυρηνική ενέργεια ως ‘την πιο επικίνδυνη και καταστροφική μορφή ενέργειας’. Αυτά τα ατυχήματα ανήκουν στο παρελθόν και οι τεχνολογίες που τα προκάλεσαν πλέον θεωρούνται ξεπερασμένες. Η απάντηση σε αυτό τον φόβο είναι αδιαμφισβήτητα οι αντιδραστήρες 4<sup>ης</sup> Γενιάς και συγκεκριμένα η τεχνολογία των μικρών αντιδραστήρων ή Small Modular Reactors.

Με αυτή την τεχνολογία, τα ατυχήματα του παρελθόντος δεν είναι δυνατό να ξανασυμβούν καθώς ένας τυπικός SMR έχει συστήματα ασφάλειας που περιορίζουν αυτόματα την υπερφόρτωση του, χωρίς να χρειάζεται ο ανθρώπινος παράγοντας.

Αυτό το είδος αντιδραστήρα είναι κατάλληλο για μικρά δίκτυα καθώς, σε ένα εργοστάσιο μπορούν να τοποθετηθούν όσες μονάδες SMR χρειάζονται ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου. Η εργοστασιακή γραμμή παραγωγής μειώνει το κεφαλαιουχικό κόστος και τους κάνει πιο προσιτούς ακόμα και σε λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες. Αυτή την στιγμή υπάρχουν πολλές παγκόσμιες προσπάθειες για να φέρουν την πυρηνική ενέργεια σε όλο τον πλανήτη.

Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην εφαρμογή των SMR στη ναυτιλία καθώς ο συμπαγής σχεδιασμός του καθιστά ιδανικούς για την τοποθέτηση σε εμπορικά πλοία. Αναλύθηκε μια

μελέτη του Lloyds Register για μετασκευή ενός υπάρχοντος Seuzmax Tanker, η οποία αποτελεί απόδειξη πως η πυρηνική ενέργεια είναι εφαρμόσιμη, αρκεί να γίνουν οι κατάλληλες μελέτες

Με την περάτωση της παρούσας εργασίας εξάγεται το συμπέρασμα πως ένας μελλοντικός πυρινοκίνητο στόλος πλοίων, με πραγματικά μηδενικές εκπομπές, πλέον δεν αποτελεί επιστημονική φαντασία. Υπάρχουν πολλά εμπόδια ( Τεχνολογικά και Οικονομικά ), που πρέπει να ξεπεραστούν άλλα πλέον είναι θέμα χρόνου να δούμε το πρώτο εμπορικό πλοίο με έναν αντιδραστήρα 4<sup>ης</sup> γενιάς.

Στον παγκόσμιο αγώνα για την μείωση των ρύπων και την διαφύλαξη της ακεραιότητας του πλανήτη μας, δεν πρέπει να σκεφτόμαστε με κινδυνολογίες και φόβο την πυρηνική ενέργεια. Η ενέργεια σχάσης και σύντηξης, είναι ένα στοίχημα πολλών δισεκατομμυρίων δολαρίων, το οποίο όμως αν πετύχει μπορεί να έχει τεράστιο θετικό αντίκτυπο στην μελλοντική ανθρώπινη ποιότητα ζωής.

## Κεφάλαιο 9: Βιβλιογραφία

- ADVANCES IN SMALL MODULAR REACTOR TECHNOLOGY DEVELOPMENTS. (2020). Στο I. D. Energy. Ανάκτηση ΜΑΙΟΣ 19, 2022, από <https://aris.iaea.org/sites/Publications.html>
- Argentina.gob.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 1, 2022, από <https://www.argentina.gob.ar/cnea/carem/la-construccion-del-carem-en-fotos>
- Carbon Free Power Project.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 1, 2022, από <https://www.cfpllc.com/location>
- cdn.theatlantic.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ 1, 2022, από [https://cdn.theatlantic.com/thumbor/0rlczhnJ2cqDSZadiejfYvARzDs=/1200x836/media/img/photo/2014/01/the-national-ignition-facility/n01\\_20918050/original.jpg](https://cdn.theatlantic.com/thumbor/0rlczhnJ2cqDSZadiejfYvARzDs=/1200x836/media/img/photo/2014/01/the-national-ignition-facility/n01_20918050/original.jpg)
- Core Power.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 4, 2022, από [https://core-power-media.s3.amazonaws.com/images/electric-ships-1.webp?X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIA3GAGXKLGHK62HCK2%2F20221021%2Ffeu-west-2%2Fs3%2Faws4\\_request&X-Amz-Date=20221021T113654Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=hos](https://core-power-media.s3.amazonaws.com/images/electric-ships-1.webp?X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIA3GAGXKLGHK62HCK2%2F20221021%2Ffeu-west-2%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20221021T113654Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=hos)
- corepower.energy.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2022, από <https://corepower.energy/>
- General Electric Power.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟ 3, 2022, από <https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/prism1>
- Gravina, M. J., Blake, D. J., Prof Ajit Sheno, Prof Stephen Turnock, & Hirdaris, D. S. (2012). CONCEPTS FOR A MODULAR NUCLEAR POWERED CONTAINERSHIP. *17th International Conference on Ships and Shipping Research*. doi:10.13140/RG.2.1.1096.3288
- IMO.* (2020). Ανάκτηση ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 5, 2022, από <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>
- Ingersoll, D. T., & Carelli, M. D. (2021). *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors*. Woodhead Publishing. Ανάκτηση ΜΑΡΤΙΟΣ 25, 2022

- large.stanford.edu*. (χ.χ.). Ανάκτηση ΑΠΡΙΛΙΟΣ 15, 2022, από <https://large.stanford.edu/courses/2015/ph241/zarubin1/images/fl1big.png>
- LLNL*. (2021, ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 18). Ανάκτηση ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 1, 2022, από [www.llnl.gov](http://www.llnl.gov): <https://www.llnl.gov/news/national-ignition-facility-experiment-puts-researchers-threshold-fusion-ignition>
- Natrium Power*. (χ.χ.). Ανάκτηση ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 3, 2022, από <https://natriumpower.com/>
- natriumpower.com*. (χ.χ.). Ανάκτηση ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 5, 2022, από [natriumpower: https://natriumpower.com/](https://natriumpower.com/)
- New Scientist*. (2022, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 7). Ανάκτηση ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 1, 2022, από [www.newscientist.com](http://www.newscientist.com): <https://www.newscientist.com/article/2336385-korean-nuclear-fusion-reactor-achieves-100-millionc-for-30-seconds/>
- Nkesah, S., & Solvoll, G. (2022, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ 26). Implementing zero emission vessels in ferry operations in Norway . NORWAY. doi:<https://doi.org/10.54337/ojs.td.v29i1.7441>
- NuScale Power*. (χ.χ.). Ανάκτηση ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 1, 2022, από <https://www.nuscalepower.com/projects/current-projects>
- Rolls-Royce SMR*. (χ.χ.). Ανάκτηση ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2, 2022, από <https://www.rolls-royce-smr.com/why-rolls-royce-smr>
- ROSATOM*. (2022, ΜΑΙΟΣ 17). Ανάκτηση ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 5, 2022, από [rosatom-europe.com](http://rosatom-europe.com): <https://rosatom-europe.com/press-centre/news/rosatom-finished-the-first-ritm-200-reactor-for-the-yakutia-icebreaker/>
- S.E. Hirdaris, Y.F.Cheng, P.Shallcross, J.Bonafoux, D.Carlson, B.Prince, & G.A.Sarris. (2014, January 28). Considerations on the potential use of Nuclear Small Modular Reactor (SMR) technology for merchant marine propulsion. *Ocean Engineering*, σσ. 101-130. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.10.015>
- Statutory Documents - IMO Publications and Documents - International Conventions - SOLAS - International Convention for the Safety of Life at Sea - Chapter VIII - Nuclear ships*. (χ.χ.).
- T. ISHIDA, M. OCHIAI, & T. HOSHI. (2000). Advanced marine reactor MRX and its application for electricity and heat co-generation. *SPECIFIC NUCLEAR REACTORS*

- AND ASSOCIATED PLANTS* (σ. 22). International Atomic Energy Agency (IAEA).  
Ανάκτηση ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 17, 2022, από [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:31058473](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:31058473)
- terrapower.com.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2022, από <https://www.terrapower.com/our-work/molten-chloride-fast-reactor-technology/>
- ThorCon.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 3, 2022, από <https://thorconpower.com/wp-content/uploads/2019/03/ColdWallLoopAnnotated2.jpg>
- ThorCon Power.* (χ.χ.). Ανάκτηση από <https://thorconpower.com/>
- ThorCon Power.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 3, 2022, από [https://thorconpower.com/wp-content/uploads/2019/03/20180911\\_26\\_Isle\\_plan\\_at\\_TG\\_deckAnnotated.jpg](https://thorconpower.com/wp-content/uploads/2019/03/20180911_26_Isle_plan_at_TG_deckAnnotated.jpg)
- thorconpower.com.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2022, από [thorconpower: https://thorconpower.com/](https://thorconpower.com/)
- wartsila.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΙΟΥΛΙΟΣ 28, 2022, από <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/crp-azipod-propulsion-of-the-ferries-akashia-and-hamanasu>
- Wartsila.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΙΟΥΛΙΟΣ 28, 2022, από [https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/azipod-\(azimuthing-podded-drive\)](https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/azipod-(azimuthing-podded-drive))
- Wikipedia.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΜΑΡΤΙΟΣ 22, 2022, από <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d9/SS-571-Nautilus-trials.gif>
- Wikipedia.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΜΑΡΤΙΟΣ 2, 2022, από [https://en.wikipedia.org/wiki/USS\\_Enterprise\\_\(CVN-65\)#/media/File:USS\\_Enterprise\\_\(CVN-65\)\\_underway\\_in\\_the\\_Atlantic\\_Ocean\\_on\\_14\\_June\\_2004\\_\(040614-N-0119G-020\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/USS_Enterprise_(CVN-65)#/media/File:USS_Enterprise_(CVN-65)_underway_in_the_Atlantic_Ocean_on_14_June_2004_(040614-N-0119G-020).jpg)
- Wikipedia.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΜΑΡΤΙΟΣ 22, 2022, από [https://en.wikipedia.org/wiki/USS\\_Long\\_Beach\\_\(CGN-9\)#/media/File:USS\\_Long\\_Beach\\_\(CGN-9\)\\_underway\\_of\\_f\\_Oahu\\_on\\_9\\_May\\_1973.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/USS_Long_Beach_(CGN-9)#/media/File:USS_Long_Beach_(CGN-9)_underway_of_f_Oahu_on_9_May_1973.jpg)

- Wikipedia.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΜΑΡΤΙΟΣ 3, 2022, από [https://en.wikipedia.org/wiki/HMS\\_Dreadnought\\_\(S101\)#/media/File:HMS\\_Dreadnought\\_\(S101\)\\_after\\_launch\\_1960.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/HMS_Dreadnought_(S101)#/media/File:HMS_Dreadnought_(S101)_after_launch_1960.jpg)
- Wikipedia.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΜΑΡΤΙΟΣ 28, 2022, από [https://en.wikipedia.org/wiki/Lenin\\_\(1957\\_icebreaker\)#/media/File:RUS-2016-Murmansk-Icebreaker\\_Lenin\\_01.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Lenin_(1957_icebreaker)#/media/File:RUS-2016-Murmansk-Icebreaker_Lenin_01.jpg)
- Wikipedia.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΑΠΡΙΛΙΟΣ 1, 2022, από [https://en.wikipedia.org/wiki/Lenin\\_\(1957\\_icebreaker\)#/media/File:RUS-2016-Murmansk-Icebreaker\\_Lenin\\_01.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Lenin_(1957_icebreaker)#/media/File:RUS-2016-Murmansk-Icebreaker_Lenin_01.jpg)
- Wikipedia.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΑΠΡΙΛΙΟΣ 1, 2022, από [https://en.wikipedia.org/wiki/Otto\\_Hahn\\_\(ship\)#/media/File:Bundesarchiv\\_B\\_145\\_Bild-F031999-0006,\\_Frachter\\_NS\\_Otto\\_Hahn.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Otto_Hahn_(ship)#/media/File:Bundesarchiv_B_145_Bild-F031999-0006,_Frachter_NS_Otto_Hahn.jpg)
- Wikipedia.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΑΠΡΙΛΙΟΣ 1, 2022, από [https://en.wikipedia.org/wiki/RV\\_Mirai#/media/File:RV\\_Mirai\\_\(2007-12-27\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/RV_Mirai#/media/File:RV_Mirai_(2007-12-27).jpg)
- Wikipedia.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΑΠΡΙΛΙΟΣ 5, 2022, από [https://en.wikipedia.org/wiki/50\\_Let\\_Pobedy#/media/File:50letPob\\_pole.JPG](https://en.wikipedia.org/wiki/50_Let_Pobedy#/media/File:50letPob_pole.JPG)
- Wikipedia.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΑΠΡΙΛΙΟΣ 1, 2022, από [https://en.wikipedia.org/wiki/Yamal\\_\(icebreaker\)#/media/File:Yamal\\_2009.JPG](https://en.wikipedia.org/wiki/Yamal_(icebreaker)#/media/File:Yamal_2009.JPG)
- Wikipedia.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΑΠΡΙΛΙΟΣ 1, 2022, από [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1e/%D0%90%D1%80%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0\\_%D0%B2\\_%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%B5\\_%D0%B8%D0%BC.\\_%D0%92%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D1%89%D0%B8%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1e/%D0%90%D1%80%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0_%D0%B2_%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%B5_%D0%B8%D0%BC._%D0%92%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D1%89%D0%B8%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE.jpg)
- Wikipedia.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 1, 2022, από [https://en.wikipedia.org/wiki/National\\_Ignition\\_Facility#/media/File:Fusion\\_microcapsule.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/National_Ignition_Facility#/media/File:Fusion_microcapsule.jpg)
- Wikipedia.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 1, 2022, από [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CF%8C%CE%BA%CE%B1%CE%BC%CE%B1%CE%BA#/media/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Tcv\\_int.jpg](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CF%8C%CE%BA%CE%B1%CE%BC%CE%B1%CE%BA#/media/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Tcv_int.jpg)



- Wikipedia.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 1, 2022, από [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CF%8C%CE%BA%CE%B1%CE%BC%CE%B1%CE%BA#/media/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%B F:Tcv\\_int.jpg](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CF%8C%CE%BA%CE%B1%CE%BC%CE%B1%CE%BA#/media/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%B F:Tcv_int.jpg)
- Wikipedia.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 3, 2022, από [https://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft\\_Nuclear\\_Propulsion#/media/File:HTRE-3.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft_Nuclear_Propulsion#/media/File:HTRE-3.jpg)
- Wikipedia.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 3, 2022, από [https://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft\\_Reactor\\_Experiment#/media/File:Aircraft\\_Reactor\\_Experiment\\_cross\\_section.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Aircraft_Reactor_Experiment#/media/File:Aircraft_Reactor_Experiment_cross_section.png)
- Wikipedia.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 4, 2022, από [https://en.wikipedia.org/wiki/Project\\_10510\\_icebreaker#/media/File:%D0%9C%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82\\_%D0%BB%D0%B5%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B0\\_%22%D0%9B%D0%B8%D0%B4%D0%B5%D1%80%22.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Project_10510_icebreaker#/media/File:%D0%9C%D0%B0%D0%BA%D0%B5%D1%82_%D0%BB%D0%B5%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B0_%22%D0%9B%D0%B8%D0%B4%D0%B5%D1%80%22.png)
- Wikipedia.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 15, 2022, από Nuclear-powered icebreaker: [https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear-powered\\_icebreaker](https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear-powered_icebreaker)
- Wikipedia.* (2022, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 22). Ανάκτηση από [https://en.wikipedia.org/wiki/Akademik\\_Lomonosov#/media/File:%D0%A1%D0%BF%D1%83%D1%81%D0%BA\\_%D0%9F%D0%90%D0%A2%D0%AD%D0%A1\\_%D0%BD%D0%B0\\_%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%83\\_20190823.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Akademik_Lomonosov#/media/File:%D0%A1%D0%BF%D1%83%D1%81%D0%BA_%D0%9F%D0%90%D0%A2%D0%AD%D0%A1_%D0%BD%D0%B0_%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%83_20190823.jpg)
- Wikipedia/Akademik Lomonosov.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 23, 2022, από wikipedia: [https://en.wikipedia.org/wiki/Akademik\\_Lomonosov](https://en.wikipedia.org/wiki/Akademik_Lomonosov)
- Wolfson, R. (2020). *ΘΕΜΕΛΙΩΔΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΗ ΦΥΣΙΚΗ*. (Μ. ΚΑΤΣΙΚΙΝΗ, Π. Π. ΚΟΥΝΑΒΗΣ, Κ. ΚΟΥΣΟΥΡΗΣ, Επιμ., Γ. Γ. ΖΑΧΑΡΙΟΥ, & Φ. ΠΙΝΑΚΙΔΟΥ, Μεταφρ.) ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΕ.
- World Nuclear Association.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΑΠΡΙΛΙΟΥ 24, 2022, από <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/appendices/rbmk-reactors.aspx>
- World Nuclear Association.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2, 2022, από world-nuclear.org: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>

*World Nuclear Association.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΜΑΡΤΙΟΣ 9, 2022, από [world-nuclear.org](https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx):  
<https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx>

*World Nuclear Association.* (2022, ΜΑΥ). Ανάκτηση JUNE 1, 2022, από Small Nuclear Power Reactors: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>

*world nuclear news.* (2014, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 27). Ανάκτηση ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 25, 2022, από [www.world-nuclear-news.org](https://www.world-nuclear-news.org): <https://www.world-nuclear-news.org/NN-Helical-steam-generator-passes-test-2702147.html>

*X-Energy.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2, 2022, από <https://x-energy.com/reactors/xe-100>

*X-Energy.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2, 2022, από <https://x-energy.com/fuel/triso-x>

*x-energy.com.* (χ.χ.). Ανάκτηση ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 5, 2022, από x-energy: <https://x-energy.com/>

YOUNG, H. D. (1994). *ΦΥΣΙΚΗ* (Τόμ. Β). (Ο. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΩΝ, Επιμ., & Ο. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΩΝ, Μεταφρ.) ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΖΗΣΗ.

*IMO (1981) Resolution A. 491 (XII).* (χ.χ.).