

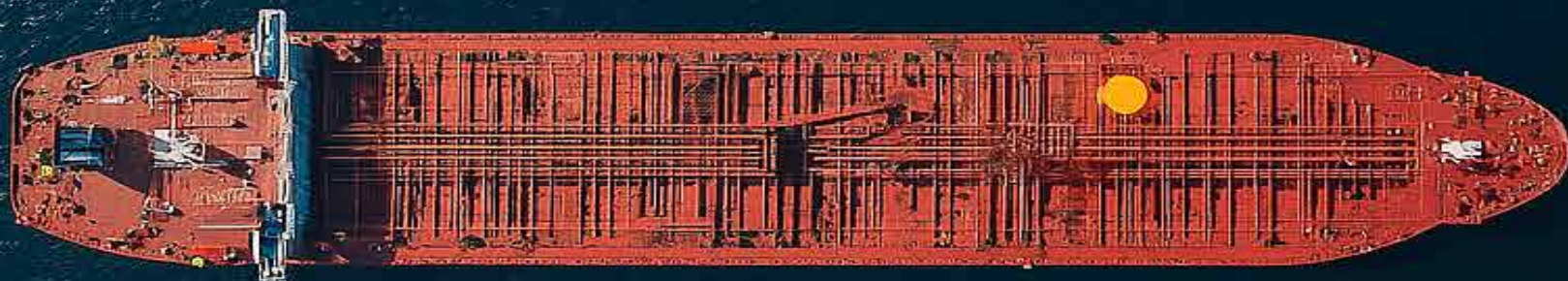
Πυρηνική Ενέργεια στη Ναυσιπλοΐα

Μια Νέα Τεχνολογική
Επανάσταση στη Ναυτιλία
και ο Ρόλος της Ελλάδας

Γ. Λάσκαρης, Ι. Κουράσης,
Σ. Χειρδάρης, Α. Πλατιάς



Deon Policy
Institute



ΙΟΥΝΙΟΣ 2025

ΣΥΓΓΡΑΦΕΙΣ

Γ. Λάσκαρης: Ο Γιώργος Λάσκαρης είναι Πυρηνικός Φυσικός και Πρόεδρος του Ινστιτούτου Πολιτικής Δέον με έδρα την Βοστώνη των ΗΠΑ. Σπούδασε Φυσική (MEng) στη ΣΕΜΦΕ του ΕΜΠ. Πραγματοποίησε το διδακτορικό του στην Πυρηνική Φυσική (M.A. και Ph.D) στο Πανεπιστήμιο Duke στη Βόρεια Καρολίνα και τα δύο μεταδιδακτορικά του στα Πανεπιστήμια Stanford στην Καλιφόρνια και MIT στη Μασαχουσέτη των ΗΠΑ.

Ι. Κουράσης: Ο Ιωάννης Κουράσης είναι επικεφαλής Πυρηνικός Μηχανικός της CORE POWER UK, εταιρείας που αναπτύσσει εμπορικές πυρηνικές εφαρμογές Ναυσιπλοΐας. Είναι απόφοιτος (MEng) της ΣΕΜΦΕ του ΕΜΠ και υποψήφιος διδάκτωρ του τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας των Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Σ. Χειρδάρης: Ο Σπύρος Χειρδάρης είναι ο Διευθυντής του Παγκόσμιου Κέντρου Ναυτικών Συστημάτων (Global Ship Systems Center) του Αμερικανικού Νηογνώμονα (American Bureau of Shipping - ABS). Είναι διδάκτωρ Ναυπηγικής του Πανεπιστημίου Southampton και ορκωτός μηχανικός. Εκπροσωπεί τον ABS στον Οργανισμό Πυρηνικής Ενέργειας και Ναυτιλίας (NEMO), είναι μέλος του Συνδέσμου Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών των Η.Π.Α και του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας.

Α. Πλατιάς: Ο Αθανάσιος Πλατιάς είναι Καθηγητής Στρατηγικής στο Τμήμα Διεθνών και Ευρωπαϊκών Σπουδών του Πανεπιστημίου Πειραιά και Πρόεδρος του Συμβουλίου Διεθνών Σχέσεων. Είναι απόφοιτος του τμήματος Δημοσίου Δικαίου και Πολιτικών Επιστημών της Νομικής Σχολής του Πανεπιστημίου Αθηνών και διδάκτωρ (M.A. και Ph.D) στις Διεθνείς Σχέσεις και τις Στρατηγικές Σπουδές στο Department of Government του Πανεπιστημίου Cornell. Έχει διατελέσει μεταδιδακτορικός ερευνητής στα Πανεπιστήμια Harvard και MIT των ΗΠΑ.

Ερευνητική Επιμέλεια: Αφροδίτη Ξύδη

Δήλωση Σύγκρουσης Συμφερόντων:

Η παρούσα δημοσίευση συμμορφώνεται με την Πολιτική Σύγκρουσης Συμφερόντων του Ινστιτούτου Πολιτικής Δεον όπως ίσχυε κατά την ημερομηνία έκδοσής της και δεν απαιτεί συγκεκριμένες αποκαλύψεις. Όλο το περιεχόμενο αντικατοπτρίζει τις ατομικές απόψεις του/των συγγραφέα/έων.

©2025 Deon Policy Institute. Όλα τα δικαιώματα διατηρούνται.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σύνοψη	4
Εισαγωγή	7
Ιστορική αναδρομή	8
Εμπορικές Πυρηνικές Εφαρμογές Ναυσιπλοΐας (ΕΠΕΝ)	10
Πλωτοί Πυρηνικοί Σταθμοί Παραγωγής Ενέργειας	10
Πυρηνοκίνητα Εμπορικά Πλοία	14
Τεχνολογία	16
Διαθεσιμότητα: Κύκλος Καυσίμου, Συχνότητα Ανεφοδιασμού και Συντήρησης	20
Ισχύς	20
Μέγεθος	21
Ζώνες Σχεδιασμού Έκτακτης Ανάγκης και Εμπορική Ασφάλιση	22
Μέγιστη Παραγόμενη Θερμοκρασία	22
Αριθμός Απαιτούμενων Χειριστών και Προσωπικού	23
Θαλάσσιο Περιβάλλον	23
Κόστος και Επιχειρηματικό Μοντέλο	24
Κόστος	24
Επιχειρηματικό Μοντέλο	25
Ρυθμιστικό Πλαίσιο	27
Διεθνές πλαίσιο	27
Κανονιστικό πλαίσιο Νηογνώμονα	28
Ασφάλεια, Προστασία, Διασφαλίσεις και Πυρηνικά Απόβλητα	30
Ασφάλεια	30
Προστασία	31
Διασφαλίσεις	32
Πυρηνικά Απόβλητα	32
Η Θέση της Ελλάδας	34
Πυρηνική Ενέργεια και Εθνική Ενεργειακή Στρατηγική	34
Ο Ρόλος της Ελλάδας σε ένα Ταχέως Μεταβαλλόμενο Διεθνές Περιβάλλον	35

Σύνοψη

Εισαγωγή

Η ναυτιλιακή βιομηχανία βρίσκεται σε μια καμπή, καθώς η ανάγκη για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου οδηγεί σε αναζήτηση εναλλακτικών μορφών πρόωσης. Η πυρηνική ενέργεια αναδύεται ως μία από τις υποσχόμενες τεχνολογίες, παρέχοντας υψηλή ενεργειακή απόδοση, μειωμένα λειτουργικά κόστη και μηδενικές εκπομπές άνθρακα. Η Ελλάδα, ως κορυφαία ναυτιλιακή δύναμη, έχει την ευκαιρία να διαδραματίσει πρωταγωνιστικό ρόλο στη μετάβαση προς τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας στη ναυσιπλοΐα.

Ιστορική Αναδρομή

Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας στη ναυτιλία ξεκίνησε τη δεκαετία του **1950**. Παρόλο που η τεχνολογία δεν επικράτησε εμπορικά, λόγω υψηλού κόστους και ρυθμιστικών εμποδίων, η πυρηνική ενέργεια τροφοδοτεί κατά κύριο λόγο **υποβρύχια** και **πολεμικά πλοία** επιφανείας, και λίγα εμπορικά πλοία, καθώς έχει αποδειχτεί ανταγωνιστική και αξιόπιστη πηγή ενέργειας προσφέροντας υψηλή αυτονομία.

Εμπορικές Πυρηνικές Εφαρμογές Ναυσιπλοΐας (ΕΠΕΝ)

Πλωτοί Πυρηνικοί Σταθμοί

Οι Πλωτοί Πυρηνικοί Σταθμοί μπορούν να παρέχουν ενέργεια σε απομακρυσμένες περιοχές, λιμάνια και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν:

- (1) Ηλεκτροδότηση παράκτιων περιοχών, λιμένων ή αρωγής σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών,
- (2) Αξιοποίηση της θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή πράσινων καυσίμων (υδρογόνου, αμμωνίας και μεθανόλης)
- (3) Ηλεκτροδότηση βιομηχανικών εγκαταστάσεων αφαλάτωσης και κέντρων δεδομένων
- (4) Ηλεκτροδότηση για υπεράκτιες εφαρμογές εξόρυξης ορυκτών καυσίμων

Πυρηνοκίνητα Εμπορικά Πλοία

Τα πυρηνοκίνητα εμπορικά πλοία έχουν μπει στο προσκήνιο τα τελευταία χρόνια, εξαιτίας των απαιτήσεων του IMO για μηδενικές εκπομπές στη ναυτιλία μέχρι το 2050. Έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- **Αυξημένη ταχύτητα πλεύσης:** Η πυρηνική πρόωση επιτρέπει υψηλότερες ταχύτητες χωρίς σημαντική αύξηση κόστους, αυξάνοντας τη συχνότητα δρομολογίων. Πλοίο 15K CNTR με πυρηνικό αντιδραστήρα μπορεί να ταξιδεύει με 25 κόμβους αντί για 20, μειώνοντας τον χρόνο ταξιδιού και αυξάνοντας τα ετήσια ταξίδια από 10-12 σε 15-17.
- **Μικρότερο βάρος εξοπλισμού:** Η απουσία δεξαμενών καυσίμου και μηχανής εσωτερικής καύσης επιτρέπει τη μεταφορά περισσότερου φορτίου. Για παράδειγμα, σε πλοίο 15K CNTR, η εξοικονόμηση χώρου οδηγεί σε αύξηση χρήσιμου φορτίου κατά 800 TEU.
- **Μειωμένη συχνότητα ανεφοδιασμού:** Τα πυρηνοκίνητα πλοία λειτουργούν χωρίς ανεφοδιασμό για 5-7 χρόνια, ενώ νέες τεχνολογίες υπόσχονται έως και 20 χρόνια.
- **Μηδενικά τέλη διοξειδίου του άνθρακα:** Τα πυρηνοκίνητα πλοία έχουν μηδενικές εκπομπές CO₂, προσφέροντας μια βιώσιμη λύση για την απανθρακοποίηση της ναυτιλίας.

Αν και η πυρηνική ενέργεια δεν αναμένεται να είναι η κατάλληλη λύση για όλα τα είδη θαλάσσιου εμπορίου, **φαίνεται ότι για τις υπερπόντιες μεταφορές με μεγάλο φορτίο, η πυρηνική πρόωση θα είναι μια ενεργειακή λύση ανταγωνιστική προς τις μηχανές εσωτερικής καύσης**. Σε αυτό το νέο πλαίσιο, κράτη όπως οι ΗΠΑ, Κορέα, Ρωσία, Κίνα κ.ά., ναυτιλιακές εταιρείες όπως οι Maersk,

NYK Line κ.ά., ναυπηγεία όπως η Hyundai KSOE κ.ά., νηογνώμονες όπως Lloyd's Register, ABS κ.ά. και νεοβλαστοί τεχνολογίας όπως η CORE POWER, η Seaborg και η Copenhagen Atomics έχουν ήδη αρχίσει να εργάζονται εντατικά για τη μετάβαση στη νέα εποχή της πυρηνικής πρόωσης.

Τεχνολογία

Η εμπειρία λειτουργίας αντιδραστήρων στη θάλασσα έχει αποκτηθεί κυρίως με **αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος** (Pressurized Water Reactor - PWR). Νέες τεχνολογίες αντιδραστήρων που βρίσκονται υπό ανάπτυξη, υπόσχονται ακόμα πιο ανταγωνιστικά χαρακτηριστικά από τις υπάρχουσες τεχνολογίες όπως μικρότερη συχνότητα ανεφοδιασμού και υψηλές θερμοκρασίες. Αυτή τη στιγμή στην αγορά συγκεντρώνουν επενδύσεις νέες τεχνολογίες όπως οι **αντιδραστήρες τηγμένου άλατος** (Molten Salt Reactor - MSR) και **αντιδραστήρες ψύξης μολύβδου** (Lead cooled Fast Reactors - LFR).

Κόστος και Επιχειρηματικό Μοντέλο

Παρόλο που η πυρηνική ενέργεια απαιτεί υψηλό αρχικό κεφαλαιουχικό κόστος, η εξοικονόμηση από τα καύσιμα **μπορεί να αντισταθμίσει την επένδυση** κάνοντάς την κερδοφόρα κυρίως για μεγαλύτερα είδη πλοίων όπως ULCC και ULCV. Δεδομένου ότι η πυρηνική ενέργεια θεωρείται **πράσινη**, τα πυρηνοκίνητα πλοία δεν θα υπόκεινται σε φόρου διοξειδίου του άνθρακα.

Παράλληλα, το επιχειρηματικό μοντέλο των πυρηνικών πλοίων ενδέχεται να μοιάζει σε αυτό των κινητήρων αεροσκαφών Rolls-Royce, με εξειδικευμένες τρίτες εταιρείες να διαχειρίζονται τη λειτουργία και συντήρηση των αντιδραστήρων.

Ρυθμιστικό Πλαίσιο

Η αδειοδότηση της πυρηνικής ενέργειας στη θάλασσα απαιτεί συνεργασία ναυτικών και πυρηνικών ρυθμιστικών αρχών. Οι συζητήσεις για τον εκσυγχρονισμό του κανονισμού A.491(XII) (1981) του IMO (International Maritime Organization - Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός) που διέπει την ασφάλεια των πυρηνοκίνητων πλοίων στα διεθνή ύδατα έχουν ξεκινήσει. Η ίδρυση του οργανισμού NEMO (2024), η ανάπτυξη του προγράμματος ATLAS της IAEA (International Atomic Energy Agency - Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας) και η έκδοση οδηγιών Νηογνώμονα για Πλωτούς Πυρηνικούς Σταθμούς από την ABS (2024) αποδεικνύουν τη **διεθνή κινητοποίηση για τη διαμόρφωση ενιαίου ρυθμιστικού πλαισίου**.

Ασφάλεια, Προστασία, Διασφαλίσεις και Πυρηνικά Απόβλητα

Σήμερα, η πυρηνική ενέργεια είναι μια από τις ασφαλέστερες μορφές παραγωγής ενέργειας. Η πυρηνική ενέργεια έφτασε σε αυτόν τον εξαιρετικό βαθμό ασφαλείας κυρίως χάρις των μαθημάτων της από μικρά και μεγάλα ατυχήματα που έθεσαν την ασφάλεια στο επίκεντρο της πυρηνικής βιομηχανίας με εξελιγμένη και αυστηρή ρύθμιση, καθώς και έμφαση στην ασφάλεια από νωρίς στον σχεδιασμό (Safety by Design). Οι εμπορικές εφαρμογές της πυρηνικής ενέργειας στη θάλασσα πρέπει να τηρούν αυστηρά πρωτόκολλα ασφαλείας, προστασίας και διασφαλίσεων, λαμβάνοντας υπόψη το ναυτικό περιβάλλον, την ύπαρξη φραγμών σε περίπτωση ατυχήματος ή βύθισης και τις πιθανές απειλές όπως η πειρατεία. Επιπλέον, απαιτείται συμμόρφωση με διεθνείς διασφαλίσεις, εξασφαλίζοντας ότι το πυρηνικό υλικό δεν θα χρησιμοποιηθεί για στρατιωτικούς σκοπούς. Η διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων εν γένει είναι ένα κρίσιμο και πολύπλοκο στάδιο του κύκλου των πυρηνικών καυσίμων, που μπορεί να διευθετηθεί και για τις ΕΠΕΝ με βάση την εκτενή εμπειρία που έχει αποκτηθεί σε αυτόν τον τομέα από την πυρηνική βιομηχανία.

Η Θέση της Ελλάδας

Η Ελλάδα καλείται να διαμορφώσει ένα σύγχρονο θεσμικό πλαίσιο που θα ενσωματώνει την πυρηνική ενέργεια στην εθνική ενεργειακή στρατηγική, τόσο στη στεριά όσο και στη θάλασσα. Η επιτυχής ενσωμάτωση απαιτεί **ενημέρωση της κοινής γνώμης, στρατηγικό σχεδιασμό, κατάλληλο ρυθμιστικό καθεστώς και ανάπτυξη εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού**. Η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας θα πρέπει να ενισχυθεί θεσμικά και επιχειρησιακά, ώστε να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις αδειοδότησης και εποπτείας των πυρηνικών εφαρμογών, κατά τα πρότυπα διεθνών αρχών όπως η NRC των ΗΠΑ.

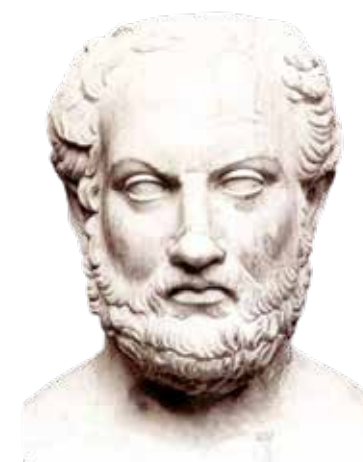
Στο διεθνές πλαίσιο, μετά την έγκριση από τον ΙΜΟ του Πλαισίου Μηδενικών Εκπομπών, η Ελλάδα θα μπορούσε **να αναλάβει ηγετικό ρόλο στη διαμόρφωση κανόνων για τα πυρηνοκίνητα πλοία και τις πλωτές πυρηνικές μονάδες** μέσα από τη συμμετοχή της στην Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος. Η εκλογή Έλληνα Επιτρόπου για τις Βιώσιμες Μεταφορές στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή και η πρόοδος στα έργα απανθρακοποίησης λιμένων (Πειραιάς, Ηράκλειο) δημιουργούν στρατηγικά πλεονεκτήματα για την **προώθηση ευρωπαϊκού πλαισίου υποδοχής πυρηνοκίνητων πλοίων και χρήσης πλωτών πυρηνικών αντιδραστήρων για λιμενική ηλεκτροδότηση**. Παράλληλα, πρέπει να ανταποκριθεί στις προκλήσεις που βάζει η πολιτική της Ευρωπαϊκής Επιτροπής **για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από την ξηρά (onshore power supply) στα πλοία που δένουν στα λιμάνια της** από την 1η Ιανουαρίου 2030 (αν τα πλοία αυτά δεν χρησιμοποιούν εναλλακτικές τεχνολογίες μηδενικών εκπομπών), κάτι που σε βάθος χρόνου θα μπορούσε να λύσει η χρήση της πυρηνικής ενέργειας στη θάλασσα.

Παράλληλα, οι γεωπολιτικές εξελίξεις –όπως **η επαναβιομηχάνιση των ΗΠΑ στον ναυπηγικό τομέα** και η στοχευμένη απεξάρτηση από τα κινεζικά ναυπηγεία– **δημιουργούν ευκαιρίες για την ανάκαμψη της ελληνικής ναυπηγικής βιομηχανίας**. Ήδη παρατηρείται αύξηση της επισκευαστικής δραστηριότητας και της χωρητικότητας στα ελληνικά ναυπηγεία, με δυνατότητα μελλοντικής ενσωμάτωσης στην παγκόσμια πυρηνική εφοδιαστική αλυσίδα.



Εισαγωγή

Ο Περικλής, απαριθμώντας τα πλεονεκτήματα της Αθήνας σε σχέση με την Σπάρτη, αναφέρει την κυριαρχία της Αθήνας στην Θάλασσα: «Μέγα τὸ τῆς θαλάσσης κράτος» («Μεγάλη είναι η δύναμη του κράτους που ελέγχει την Θάλασσα», Θουκυδίδης. Ι 143, 5). Η Ελλάδα που είναι μικρή στη στεριά, κυριαρχεί μέσω του εμπορικού της στόλου στους ωκεανούς του πλανήτη. Είναι ενδεικτικό ότι ο ελληνικός εφοπλισμός ελέγχει περίπου το 20% του παγκόσμιου εμπορικού στόλου σε ολική χωρητικότητα φορτίου (deadweight tonnage - DWT).¹ Η κυριαρχία της Ελλάδας στη Θάλασσα πρέπει να διαφυλαχθεί αλλά και να ενισχυθεί, αφού τουλάχιστον το 7% του ελληνικού ΑΕΠ και 150.000 καλά αμειβόμενες θέσεις εργασίας προέρχονται από δραστηριότητες συνδεδεμένες άμεσα με τη ναυτιλία.²



Τα τελευταία χρόνια ο τομέας της ναυτιλίας βρίσκεται σε διαδικασία απανθρακοποίησης. Είναι χαρακτηριστικό ότι μέχρι το 2040 η ναυτική βιομηχανία πρέπει να έχει μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 70%. Σήμερα 7.000 πλοία από τα 65.000 που κυκλοφορούν στις παγκόσμιες θάλασσες καταναλώνουν το 50% των καυσίμων (heavy fuel oil)³ και πολλά από αυτά βρίσκονται σε ελληνικά χέρια.

Παρ' όλες τις παγκόσμιες προσαγές για απανθρακοποίηση, τα εναλλακτικά καύσιμα, όπως η αμμωνία και το υδρογόνο, έχουν ακόμα υψηλό κόστος, ενώ για την παραγωγή τους απαιτούν άλλες αξιόπιστες πηγές ενέργειας. Η πυρηνική ενέργεια φαντάζει ως μία εναλλακτική, αν όχι η μόνη, χάρη στην υψηλή ενεργειακή της πυκνότητα και τους εκτεταμένους επιχειρησιακούς της κύκλους, προσφέροντας μια βιώσιμη μακροπρόθεσμη λύση. Παράλληλα, το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη εμπορικών πυρηνοκίνητων πλοίων και Πλωτών Πυρηνικών Σταθμών Παραγωγής Ενέργειας (Floating Nuclear Power Plants - FNPPs) έχει επίσης αυξηθεί σημαντικά.

Η παρούσα μελέτη αναλύει την πυρηνική ενέργεια στη ναυτική βιομηχανία, εξετάζοντας τις τεχνολογικές εφαρμογές, το κόστος, το ρυθμιστικό πλαίσιο, την ασφάλεια και τη στρατηγική σημασία για την Ελλάδα. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη χρήση πυρηνοκίνητων εμπορικών πλοίων και πλωτών πυρηνικών σταθμών παραγωγής ενέργειας ως βιώσιμων και καινοτόμων λύσεων στη ναυτιλία.



«Μέγα τὸ τῆς θαλάσσης κράτος»
(«Μεγάλη είναι η δύναμη του
κράτους που ελέγχει την Θάλασσα»,
Θουκυδίδης. Ι 143, 5).

Η παρούσα μελέτη αναλύει την πυρηνική ενέργεια στη ναυτική βιομηχανία, εξετάζοντας τις τεχνολογικές εφαρμογές, το κόστος, το ρυθμιστικό πλαίσιο, την ασφάλεια και τη στρατηγική.

¹ Martinis, Dennis, et al. "Greek Shipping: Success Factors and Opportunities." McKinsey, 30 July 2024.

<https://www.mckinsey.com/industries/logistics/our-insights/greek-shipping-success-factors-and-opportunities>

² MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE. "2023 IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS | ANNEX 1 RESOLUTION MEPC.377(80)." IMO, 7 July 2023.

<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/PressBriefings/Documents/Clean%20version%20of%20Annex%201.pdf>

³ Core Power. "Maritime Civil Nuclear Propulsion." CORE POWER, www.corepower.energy/maritime-applications/nuclear-propulsion

Ιστορική αναδρομή

Η πυρηνική ενέργεια στη θάλασσα μπορεί να ακούγεται ως κάτι καινοτόμο, όμως, στην πραγματικότητα, η ανθρωπότητα έχει εκτενή εμπειρία με πάνω από 160 πλοία με περισσότερους από 200 αντιδραστήρες.

Από τη δεκαετία του '50 μέχρι και σήμερα, η πυρηνική ενέργεια τροφοδοτεί υποβρύχια και πολεμικά πλοία επιφανείας διαφόρων χωρών, καθώς έχει αποδειχτεί ανταγωνιστική και αξιόπιστη πηγή ενέργειας προσφέροντας υψηλή αυτονομία (Πίνακας 1)⁴. Πρόσφατα και άλλες χώρες, όπως η Τουρκία⁵, ετοιμάζονται να μπουν δυναμικά στην κατασκευή πυρηνοκίνητων υποβρυχίων.

Πίνακας 1

Συνολικός αριθμός Πολεμικών Πυρηνικών Πλοίων Επιφανείας & Υποβρυχίων σε Λειτουργία (2023)

Χώρα	Πολεμικά Πλοία Επιφανείας & Υποβρύχια
 Ρωσία	1 Θωρακισμένο Καταδρομικό & 21 Υποβρύχια
 ΗΠΑ	11 Αεροπλανοφόρα & 73 Υποβρύχια
 Ηνωμένο Βασίλειο	10 Υποβρύχια
 Γαλλία	1 Αεροπλανοφόρο & 9 Υποβρύχια
 Κίνα	14 Υποβρύχια
 Ινδία	1 Υποβρύχιο

Οι μη στρατιωτικές χρήσεις της πυρηνικής ενέργειας στη ναυσιπλοΐα ξεκίνησαν το 1959, όταν, στο πλαίσιο της εκστρατείας «Άτομο για την Ειρήνη», οι ΗΠΑ κατέλκυσαν το **NS Savannah**. Το πρώτο εμπορικό πυρηνικό πλοίο τροφοδοτούνταν από αντιδραστήρα ισχύος 74 MW, με συνολικό κόστος 46,9 εκατομμύρια δολάρια. Το NS Savannah έκανε περιοδεία σε 45 διεθνείς λιμένες, συμπεριλαμβανομένου του Πειραιά [2 Φεβρουαρίου 1965 (Εικόνα 1)],⁶ για να επιδείξει την ασφάλεια και τις πιθανές μη πολεμικές χρήσεις της πυρηνικής ενέργειας.



⁴ “Nuclear-Powered Ships.” World Nuclear Association, 4 Feb. 2025, world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.

⁵ Interview of Admiral Ercument Tatlioglu, Warships International Fleet Review, May 2025, page 37.

⁶ “Ν.Σ. ΣΑΒΑΝΝΑ ΕΝΑΣ ΙΣΤΟΡΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ. Η ΑΤΟΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΙΣ ΤΗΝ ΕΜΠΟΡΙΚΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑΝ.” Ναυτικά Χρονικά, 15 Aug. 1959, Αρ. Φύλλου 581/340, σελ. 15. https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/marechron/issues/issues_0775.pdf

**ΕΓΕΝΟΝΤΟ ΑΙ ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΑΙ ΠΡΟΣΜΕΤΡΗΣΕΙΣ
ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΙΣ ΠΕΙΡΑΙΑ ΔΙΑ ΤΟ «ΣΑΒΑΝΝΑ»**

Δύτης του ΟΛΠ ἐπραγματοποίησε προχθὲς κατάδυσιν εἰς τὸν λιμένα Πειραιῶς καὶ ἀκριβῶς εἰς τὸν θαλάσσιον χώρος τῆς προβλήτος Βασιλέως Κωνσταντίνου, ὅπου εἶχε πλευρίσει τὸ ἀμερικανικὸν πυρηνοκίνητον ἐμπορικὸν σκάφος «Σαβάννα» καὶ ἔλαβε δείγματα ἰλύος τοῦ θυθοῦ, τὰ ὅποια παρέδωκεν εἰς ἐκπρόσωπον τῆς Ἑλληνικῆς Ἐπιτροπῆς Ἀτομικῆς Ἑνεργείας. Σκοπὸς τῆς λήψεως τῶν δειγμάτων εἶναι ἡ διαπίστωσις ἂν ὑπέστη ἡ ἔχι ραδιενεργὸν ἐπίδρασιν ὁ θυθὸς τοῦ πειραϊκοῦ λιμένος ἀπὸ τὴν παραμονὴν τοῦ πυρηνοκίνητου σκάφους. Ἐξ ἄλλου ἐμπειρογνώμονες τοῦ Κέντρου Ἑρευνῶν «Δημόκριτος» ἤρχισαν νὰ μελετοῦν τὰ στοιχεῖα τὰ ὅποια συνεκέντρωσεν ὁ εἰδικὸς μετρητὴς ραδιενεργείας ὁ ὁποῖος εἶχεν ἐγκατασταθῇ ἐπὶ τῆς ταράτσας τοῦ Τελωνείου Πειραιῶς, κατὰ τὴν διάρκειαν τῆς παραμονῆς τοῦ «Σαβάννα» εἰς τὸν λιμένα.

Ἐκ τῆς Ἑλληνικῆς Ἐπιτροπῆς Ἀτομικῆς Ἑνεργείας ἀνεκοινώθη ὅτι αἱ εἰς τὸν Τύπον ἀναγραφείσαι πληροφορίαι περὶ μετρήσεων τῆς ραδιενεργείας τοῦ περιβάλλοντος πρὸ τοῦ κατὰπλου, κατὰ τὴν διάρκειαν τῆς παραμονῆς του εἰς τὸν λιμένα ὡς καὶ μετὰ τὸν ἀπόπλου τοῦ ἀτομοκίνητου σκάφους «Σαβάννα» ἐγένοντο ὑπὸ τῆς ἀρμοδίας ὑπηρεσίας ἐν συνεργασίᾳ μετὰ τῆς ἀντιστοίχου ὑπηρεσίας τοῦ ὡς ἄνω σκάφους. Αἱ ἐν λόγω μετρήσεις προβλέπονται ὑπὸ τῶν ἐν ἰσχύϊ κανονισμῶν ἀκτινοπροστασίας καὶ διεξήχθησαν ἐντελὲς οὐδεμίαν μυστικότητος.

Αἱ μετρήσεις ραδιενεργείας περιβάλλοντος εἰς τὸν λιμένα τοῦ Πειραιῶς πρὸ τοῦ κατὰπλου, κατὰ τὴν διάρκειαν παραμονῆς τοῦ πλοίου ὡς καὶ μετὰ τὸν ἀπόπλου τούτου οὐδεμίαν διαφορὰν παρουσίασαν.



Τὸ «ΣΑΒΑΝΝΑ» εἰς τὸν Πειραιᾶ

Τὸ πυρηνοκίνητον σκάφος ρυμουλκεῖται ἐντὸς τοῦ λιμένος. (Σχετικὴ εἰδησεογραφία εἰς τὴν 7ην σελίδα).

Εικόνα 1: «N.S. SAVANNA ΕΝΑΣ ΙΣΤΟΡΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ. Η ΑΤΟΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΙΣ ΤΗΝ ΕΜΠΟΡΙΚΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑΝ»⁷

Η **Δυτική Γερμανία** καὶ ἡ **Ιαπωνία** ναυπήγησαν ἐπίσης πυρηνοκίνητα ἐμπορικὰ πλοία, τὸ **Otto Hahn** (1968-1982) καὶ τὸ **Mutsu** (1972-1996). Ἡ **Σοβιετικὴ Ἑνωση** ἀνέπτυξε ἀπὸ νωρὶς τὸν πυρηνικὸ στόλο παγοθραυστικῶν, με πρῶτο τὸ **Lenin** τὸ 1959, ἐξασφαλίζοντας συνεχὴ ναυσιπλοΐα σε ἀκραίες καιρικὲς συνθήκες. Σήμερα, ἡ **Ρωσία** διαθέτει στόλο, τὸν μοναδικὸ στὸν κόσμον, πυρηνοκίνητων παγοθραυστικῶν, ὁ ὁποῖος ἀποτελεῖται ἀπὸ 5 κλάσεις πλοίων ἐπιφανείας. Ἐπίσης, ἀπὸ τὸ 1988 ἡ Ρωσία λειτουργοῦσε καὶ ἓνα πυρηνοκίνητο ἐμπορικὸ πλοίο -τὸ **Sevmorput**- τὸ ὁποῖο ἀποσύρθηκε τὸ 2024.

Τα πυρηνοκίνητα ἐμπορικὰ πλοία μπορεῖ νὰ μὴν ἐδραιώθηκαν τὸν 20ό αἰῶνα, ἀλλὰ, σήμερα, τὸ ἐνδιαφέρον γιὰ τὴν χρῆση τῆς πυρηνικῆς ἐνέργειας γιὰ τὴν πρόωση ἐμπορικῶν πλοίων καὶ ἄλλες ἐμπορικὲς ἐφαρμογές στὴ θάλασσα ἔχει αὐξηθεῖ ἐκθετικά, ἐξαιτίας τῆς παγκόσμιας πολιτικῆς γιὰ τὴ μείωση ἐκπομπῶν διοξειδίου τοῦ ἀνθράκα καὶ τὴν ἐξέλιξη τῆς πυρηνικῆς τεχνολογίας.

⁷ MLP. ΤΟ ΠΡΩΤΟ ΠΥΡΗΝΟΚΙΝΗΤΟ ΕΜΠΟΡΙΚΟ ΠΛΟΙΟ "SAVANNA" ΣΤΟΝ ΠΕΙΡΑΙΑ [1965]. 6 May 2016. Το Blog Του MLP Από Το 2009, <https://mlp-blo-g-spot.blogspot.com/2016/05/nssavannah.html>.

Εμπορικές Πυρηνικές Εφαρμογές Ναυσιπλοΐας (ΕΠΕΝ)

Ο όρος ΕΠΕΝ χρησιμοποιείται για να περιγράψει δύο ευρείες κατηγορίες εφαρμογών, τους Πλωτούς Πυρηνικούς Σταθμούς Παραγωγής Ενέργειας (Floating Nuclear Power Plants - FNPP) και τα εμπορικά πυρηνοκίνητα πλοία (Nuclear Merchant Ships).

Πλωτοί Πυρηνικοί Σταθμοί Παραγωγής Ενέργειας



Εικόνα 2: Ο εν ενεργεία πλωτός πυρηνικός σταθμός παραγωγής ενέργειας Akademik Lomonosov στη Ρωσία.⁸ © Copyright Rosenergoatom

Τα πλεονεκτήματα της ναυπήγησης των πλωτών πυρηνικών σταθμών έχουν αναγνωριστεί εδώ και πολλές δεκαετίες. Από το 1967, ο πλωτός πυρηνικός σταθμός MH-1A Sturgis, του πολεμικού ναυτικού των ΗΠΑ, τροφοδοτούσε το κανάλι του Παναμά⁹. Το 1970, η Westinghouse επιχείρησε να κατασκευάσει πλωτούς πυρηνικούς σταθμούς, αλλά το έργο εγκαταλείφθηκε λόγω της πετρελαϊκής κρίσης και του ατυχήματος του Three Mile Island.¹⁰

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των πλωτών έναντι των χερσαίων σταθμών παραγωγής είναι τα εξής:

1. **Μετακίνηση του σταθμού παραγωγής** και χρήση του μακριά από την τοποθεσία κατασκευής του.
2. Τοποθέτηση σε **απομακρυσμένες παράκτιες περιοχές** και χρήση τους σε υπεράκτιες εφαρμογές.
3. **Οικονομικότερη κατασκευή** υποδομών και συστημάτων υποστήριξης (Balance of Plant - BoP), χάρη στη δυνατότητα κατασκευής τους σε ναυπηγεία.
4. Άμεση **πρόσβαση σε νερό** για ψύξη - απαραίτητο για την ασφαλή λειτουργία πυρηνικών σταθμών.

⁸ "Over 5 Years, Akademik Lomonosov Prevented 390,000 Tons of Greenhouse Gas Emissions." AKADEMIK LOMONOSOV, 13 Sept. 2024, fnpp.info/latest-news/over-5-years-akademik-lomonosov-prevented-390000-tons-of-greenhouse-gas-emissions.

⁹ Honerlah, Hans B, and Brian P. Hearty. "WM'02 Conference, February 24-28, 2002, Tucson, AZ." <https://archivedproceedings.econference.io/wmsym/2002/Proceedings/44/168.pdf>

¹⁰ Touran, Nick. "Offshore Nuclear Power Plants – That Time We Almost Built 8 GW-Scale Floating Reactors." What Is Nuclear?, 29 Dec. 2020, whatisnuclear.com/offshore-nuclear-plants.html.

Το ενδιαφέρον για τους πλωτούς πυρηνικούς σταθμούς αναζωπυρώθηκε λόγω των πιθανών εφαρμογών τους όπως:

A. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την ηλεκτροδότηση παράκτιων περιοχών, λιμένων ή αρωγής σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών. Από την 1η Ιανουαρίου 2030, πλοία στα λιμάνια της Ευρωπαϊκής Ένωσης θα υποχρεούνται, κατά τη διάρκεια του ελλιμενισμού τους, να χρησιμοποιούν παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από ξηράς (on-shore power supply) ή εναλλακτικές τεχνολογίες μηδενικών εκπομπών¹¹. Παράλληλα, υπάρχουν 36 λιμένες παγκοσμίως με τουλάχιστον μία θέση ελλιμενισμού κρουαζιερόπλοιων με παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από τη στεριά, ενώ σε 23 λιμάνια έχουν χρηματοδοτηθεί τέτοια έργα και σε 16 έχουν ήδη δρομολογηθεί.¹² Οι εκτιμήσεις δείχνουν ότι έως το 2035, η απαιτούμενη ζήτηση ισχύος για το λιμάνι του Los Angeles και το λιμάνι του Long Beach θα μπορούσε να φτάσει περίπου τα 400,4 έως 446,1 MW, και έως το 2040, μεταξύ 452,3 και 475,2 MW, ανάλογα με τα επιχειρησιακά σενάρια.¹³

B. Αξιοποίηση της θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή πράσινων καυσίμων μέσω αφαλάτωσης και ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή υδρογόνου, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή συνθετικών καυσίμων, όπως αμμωνία και μεθανόλη. Ο όγκος πράσινων καυσίμων που θα χρειαστεί για να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα για τον παγκόσμιο στόλο υπολογίζεται ότι είναι πάνω από 500 εκατομμύρια τόνους ανά έτος (Million Tonnes Per Annum - mtpa), κάτι που θα απαιτούσε το 80% της σημερινής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) για την παραγωγή τους.¹⁴

Γ. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τροφοδότηση βιομηχανικών εγκαταστάσεων αφαλάτωσης, κέντρα δεδομένων κ.ά. Τα κέντρα δεδομένων σήμερα καταναλώνουν το 1%-2%¹⁵ της παγκόσμιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η εκτιμώμενη ισχύς που θα χρειαστεί για τα κέντρα δεδομένων παγκοσμίως μέχρι το 2030 είναι περίπου 300 GW¹⁶. Το μέγεθος αυτού του οικονομικού τομέα εκτιμάται ότι θα φτάσει την ίδια περίοδο στα \$0,5 τρισ.¹⁷ Παράλληλα, η ζήτηση ενέργειας για αφαλάτωση υπολογίζεται ότι θα φτάσει τις 345 TWh έως το 2040 (σε σύγκριση με 40 TWh το 2014)¹⁸.

Δ. Παραγωγή ενέργειας για χρήση σε υπεράκτιες εφαρμογές εξόρυξης ορυκτών καυσίμων κ.ά. Για να συμβάλει στους παγκόσμιους στόχους μείωσης διοξειδίου, ο τομέας του πετρελαίου και του φυσικού αερίου πρέπει να μειώσει τις εκπομπές του κατά τουλάχιστον 3,4 γιγατόνους ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (GtCO_{2e}) ετησίως έως το 2050.¹⁹ Η πυρηνική ενέργεια, συγκεκριμένα οι πλωτοί πυρηνικοί σταθμοί που μπορούν να εγκατασταθούν κοντά σε υπεράκτιες πετρελαϊκές εφαρμογές, εμφανίζεται σαν μια ελκυστική λύση που μπορεί να προσφέρει ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα για τις διεργασίες της βιομηχανίας του πετρελαίου, κεντρίζοντας το ενδιαφέρον αυτών των εταιρειών παγκοσμίως.²⁰

¹¹ **European Commission.** "Reducing Emissions from the Shipping Sector." Climate Action, European Commission, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector_en

¹² **Cruise Lines International Association.** "Environmental Sustainability." Cruise Lines International Association, <https://cruising.org/en/environmental-sustainability>

¹³ **Villa, Natasha.** "Electrification of California Ports Technical Memorandum." Pacific Merchant Shipping Association, 11 June 2024, www.pmsaship.com/maritime-insights-blog/electrification-of-california-ports-technical-memorandum.

¹⁴ **CORE POWER** "Floating Nuclear: The Route to Economic e-Fuels." CORE POWER. <https://www.corepower.energy/fact-sheets>

¹⁵ **IEA.** "Data Centres & Networks." IEA, 11 July 2023, www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks.

¹⁶ **Srivathsan, Bhargs, et al.** "AI Power: Expanding Data Center Capacity to Meet Growing Demand." McKinsey, 29 Oct. 2024. <https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/ai-power-expanding-data-center-capacity-to-meet-growing-demand>

¹⁷ "Global Data Centre Market Confident about AI Fuelled Growth, despite Power Supply Concerns." DLA Piper, 26 Nov. 2024, www.dlapiper.com/en/news/2024/11/global-data-centre-market-confident-about-ai-fuelled-growth.

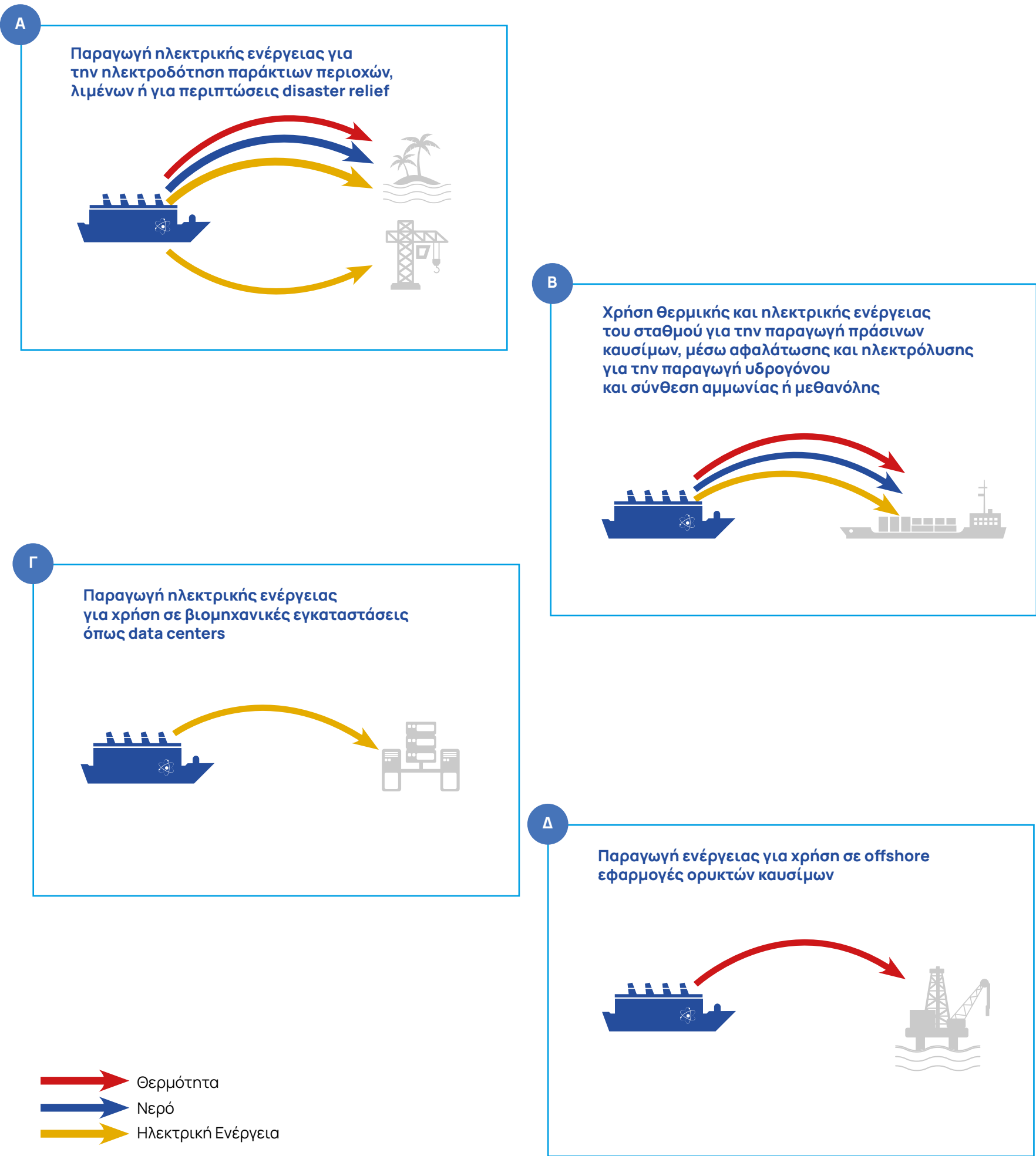
¹⁸ "The Desalination of Seawater through Nuclear Energy, an Option for the Future." Foro Nuclear, 22 Mar. 2023, www.foronuclear.org/en/updates/in-depth/the-desalination-of-seawater-through-nuclear-energy-an-option-for-the-future/.

¹⁹ Beck, Chantal, et al. "The Future Is Now: How Oil and Gas Companies Can Decarbonize." McKinsey & Company, McKinsey & Company, 7 Jan. 2020, www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-future-is-now-how-oil-and-gas-companies-can-decarbonize

²⁰ "Viaro Partners with Newcleo to Decarbonise Oil and Gas Assets." World Nuclear News, 5 Mar. 2024, www.world-nuclear-news.org/Articles/Viaro-partners-with-Newcleo-to-decarbonise-oil-and

Εικόνα 3

Τρόποιι χρήσης των FNPP, απεικόνιση παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας, ή νερό προϊόν αφαλάτωσης



Σήμερα, η Ρωσία συνεχίζοντας την παράδοσή της, λειτουργεί με επιτυχία από το 2019 έναν FNPP, για την ηλεκτροδότηση και θέρμανση της πόλης Riviek στη Σιβηρία (Εικόνα 2). Παράλληλα, κατασκευάζει περισσότερους με το ενδεχόμενο πώλησής τους σε άλλα κράτη-πελάτες στα πλαίσια της πυρηνικής διπλωματίας.²¹

Η παγκόσμια αγορά για τους πλωτούς πυρηνικούς σταθμούς μπορεί να είναι ευρεία, ξεκινώντας από κέντρα δεδομένων, λιμένες, υπεράκτιες εφαρμογές εξόρυξης αερίου και πετρελαίου, μέχρι και ακριτικές περιοχές που χρειάζονται καθαρό νερό, θέρμανση και ενέργεια. Το 2023, το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (Department of Energy - DOE), σε συνεργασία με το Εθνικό Ερευνητικό Κέντρο του Idaho (Idaho National Laboratory), τον Αμερικάνικο Νηογνώμονα (American Bureau of Shipping - ABS) και το Εθνικό Κέντρο Καινοτομίας Αντιδραστήρων (National Reactor Innovation Center), δημοσίευσε έρευνα²², η οποία υπολόγισε τις ανάγκες των ΗΠΑ για ΕΠΕΝ μέχρι το 2050, όπως συνοψίζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2
Προβλέψεις ΗΠΑ για τη ζήτηση των ΕΠΕΝ μέχρι το 2050

ΕΠΕΝ	Πιθανή Ζήτηση ΕΠΕΝ έως το 2050
Ηλεκτροδότηση Λιμένων	3 έως 5 λιμάνια στις ΗΠΑ θα ηλεκτροδοτούνται από ΕΠΕΝ
Παραγωγή Συνθετικών Πράσινων Καυσίμων (Παράκτια)	35 με 70 εκατ. τόνοι υδρογόνου παραγόμενοι με πυρηνική ενέργεια
Πλωτά Πυρηνικά Κέντρα Δεδομένων	2 έως 9 πλωτά πυρηνικά κέντρα δεδομένων στις ΗΠΑ.
Παραγωγή Συνθετικών Πράσινων Καυσίμων (Offshore)	2.5 με 5 εκατ. τόνοι υδρογόνου παραγόμενοι με πυρηνική ενέργεια
Πλωτοί Πυρηνικοί Σταθμοί Αφαλάτωσης	2 έως 6 πλωτοί πυρηνικοί σταθμοί αφαλάτωσης στις ΗΠΑ
Πλωτοί Πυρηνικοί Σταθμοί για ηλεκτροδότηση παράκτιων περιοχών	1 με 2 GW συνολική ισχύς σταθμών στις ΗΠΑ
Πυρηνικά Εμπορικά Πλοία	178 έως 439 πυρηνοκίνητα εμπορικά πλοία στον παγκόσμιο στόλο

Βήματα για τη δημιουργία πλωτών αντιδραστήρων έχουν ξεκινήσει: η Westinghouse υπέγραψε, 50 χρόνια μετά την ίδρυση της Off-shore Power Systems, συμφωνία συνεργασίας με την CORE POWER, εταιρεία ανάπτυξης ΕΠΕΝ, για τον σχεδιασμό πλωτών πυρηνικών σταθμών με τον νέο μικρο-αντιδραστήρα eVinci.²³ Πρόσφατα, η εταιρεία Allseas, η οποία θεωρείται παγκόσμιος ηγέτης στην εγκατάσταση υπεράκτιων αγωγών και στην υποθαλάσσια κατασκευή, ανακοίνωσε τα σχέδιά της να σχεδιάσει και να αναπτύξει SMR με σκοπό να τον ενσωματώσει σε εφαρμογές στη θάλασσα αλλά και στην ξηρά.

²¹ “Guinea Signs Floating Nuclear Power Plants MOU with Russia.” World Nuclear News, 7 June 2024, www.world-nuclear-news.org/Articles/Guinea-and-Russia-sign-MoU-for-floating-nuclear-po#:~:text=The%20Republic%20of%20Guinea%20and,electricity%20to%20the%20African%20country.

²² **Idaho National Laboratory.** Accelerating Commercial Maritime Demonstration Projects for Advanced Nuclear Reactor Technologies: Road Map for the Development of Commercial Maritime Applications of Advanced Nuclear Technology. U.S. Department of Energy, Jan. 2023. https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/STI/STI/Sort_145957.pdf

²³ Westinghouse Electric Company. “Westinghouse and CORE POWER Partner for Floating Nuclear Power Plants Using eVinci™ Microreactors.” Westinghouse Electric Company, 25 Nov. 2024, <https://info.westinghousenuclear.com/news/westinghouse-and-core-power-partner-for-floating-nuclear-power-plants-using-evinci-microreactors>

Πυρηνοκίνητα Εμπορικά Πλοία

Τα πυρηνοκίνητα εμπορικά πλοία έχουν μπει στο προσκήνιο τα τελευταία χρόνια, εξαιτίας των απαιτήσεων του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (International Maritime Organization - IMO) για μηδενικές εκπομπές στη ναυτιλία μέχρι το 2050. Εκτός του περιβαλλοντολογικού, η πρόωση με πυρηνική ενέργεια εμφανίζει κάποια πλεονεκτήματα, καθώς δεν είναι τυχαίο πως οι ισχυρότερες χώρες παγκοσμίως την επιλέγουν για το πολεμικό ναυτικό τους.



Τα κυριότερα πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

Ταχύτητα πλεύσης: Ο πυρηνικός αντιδραστήρας συμφέρει να λειτουργεί κοντά στη μέγιστη ισχύ του, κάτι που δεν επιβαρύνει σημαντικά το λειτουργικό του κόστος, σε αντίθεση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης όπου το λειτουργικό κόστος αυξάνεται δραματικά με την ταχύτητα. Πρόσφατοι υπολογισμοί της HD Korea Shipbuilding & Offshore Engineering (HD KSOE) βασισμένοι σε πλοίο 15.000 TEU Container (15K CNTR) με αντιδραστήρα 90 MWth σε σύγκριση με πλοίο με μηχανή εσωτερικής καύσης LNG DF, έδειξαν ότι η ταχύτητα πρόωσης αυξάνεται κατά 5 κόμβους (από τους 20 στους 25 κόμβους), μειώνοντας τον χρόνο ενός τυπικού ταξιδιού από τις 54-70 ημέρες στις 40-56 ημέρες κι επιτρέποντας τη διεξαγωγή 15-17 ανά έτος σε σχέση με 10-12 ταξίδια που είναι σήμερα²⁴.

Μικρότερο βάρος εξοπλισμού: Ένα πυρηνικό πλοίο, σε σύγκριση με ένα παραδοσιακό πλοίο, δεν θα έχει δεξαμενές καυσίμου, ούτε κύρια μηχανή εσωτερικής καύσης. Το φυσικό μέγεθος και το βάρος ενός πυρηνικού σταθμού αποτελούνται κυρίως από τα υποστηρικτικά συστήματα, όπως οι ατμοτουρμπίνες και η θωράκιση, και λιγότερο από τον ίδιο τον αντιδραστήρα, και εξαρτώνται από το είδος της πυρηνικής τεχνολογίας, τον εμπλουτισμό του καυσίμου και την ισχύ της. **Με τον σωστό σχεδιασμό και τη σωστή**

²⁴ Sangmin Park on behalf of Hyundai KSOE (2025, February 12), Maritime SMR: Nuclear Powered Ship Concept & SMR Business Strategy, New Nuclear in Maritime Summit, Houston, TX, USA. https://www.youtube.com/watch?v=boUcgnuYZrk&t=19s&ab_channel=COREPOWER

επιλογή τεχνολογίας, τα πυρηνοκίνητα πλοία εκτιμάται ότι θα μπορούν να μεταφέρουν περισσότερο φορτίο, αξιοποιώντας αυτό το κέρδος όγκου και μάζας. Στο προαναφερόμενο παράδειγμα του πλοίου 15K CNTR η απουσία καυσίμου υπολογίζεται ότι θα οδηγήσει σε αύξηση χρήσιμου φορτίου κατά 800 TEU.²⁵

Μειωμένη συχνότητα ανεφοδιασμού καυσίμου: Ανάλογα με την πυρηνική τεχνολογία, το πυρηνικό καύσιμο και την αρχική του φόρτωση, ένα πυρηνικό πλοίο μπορεί να λειτουργεί για χρόνια χωρίς διακοπή της υπηρεσίας του για ανεφοδιασμό. Υπάρχον παράδειγμα είναι τα ρωσικά παγοθραυστικά κλάσης Arktika που ανεφοδιάζονται με καύσιμο μόλις κάθε 5 με 7 χρόνια. Αναπτυσσόμενες πυρηνικές τεχνολογίες υγρού πυρηνικού καυσίμου έχουν τη δυνατότητα να εφοδιάζονται κατά τη λειτουργία του αντιδραστήρα “online refuelling” και υπόσχονται έως και 20 χρόνια αδιάκοπης λειτουργίας για ανεφοδιασμό. Αξίζει να αναφερθεί εδώ ότι ο ανεφοδιασμός πυρηνικού καυσίμου είναι μια χρονοβόρα διαδικασία (6 με 8 εβδομάδων) που απαιτεί ειδικά αδειοδοτημένο προσωπικό και εξοπλισμένο/πιστοποιημένο ναυπηγείο. Ο ανεφοδιασμός θα μπορεί να γίνεται συγχρόνως με άλλες ενέργειες που απαιτούν τον δεξαμενισμό του πλοίου, όπως επιθεωρήσεις και συντήρηση.

Μηδενικά τέλη διοξειδίου του άνθρακα: Η πυρηνική ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας μηδενικών εκπομπών. Θεωρείται πράσινη και βιώσιμη από τους διεθνείς οργανισμούς της **Ε.Ε., των ΗΠΑ και του ΟΗΕ**. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ταξινομήσε, μεταξύ άλλων, την πυρηνική ενέργεια ως “πράσινη” και βιώσιμη πηγή ενέργειας στα πλαίσια της πολιτικής της μείωσης των ρύπων και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, υπό την προϋπόθεση ότι πληροί αυστηρές προδιαγραφές ασφαλείας και περιβαλλοντικής προστασίας. Στις ΗΠΑ, η πυρηνική ενέργεια τυγχάνει διακομματικής υποστήριξης ως μέρος της μετάβασης σε καθαρές μορφές ενέργειας και δίνονται φορολογικά κίνητρα²⁶ για την περαιτέρω ανάπτυξή της. Σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) του ΟΗΕ, η πυρηνική ενέργεια υπηρετεί τους στόχους της βιώσιμης ανάπτυξης (SDGs), συμβάλλοντας στη μείωση των εκπομπών άνθρακα.

Αν και η πυρηνική ενέργεια δεν αναμένεται να είναι η κατάλληλη λύση για όλα τα είδη θαλάσσιου εμπορίου, φαίνεται ότι για τις υπερπόντιες μεταφορές η πυρηνική πρόωση θα είναι μια ενεργειακή λύση ανταγωνιστική προς τις μηχανές εσωτερικής καύσης, ιδιαίτερα αν τηρηθούν οι διεθνείς συμφωνίες για μηδενικές εκπομπές.

Ως αποτέλεσμα, οι μεγάλες ναυτιλιακές εταιρείες ανά τον κόσμο εξετάζουν σοβαρά την πυρηνική ενέργεια τα τελευταία χρόνια, και επενδύουν σε ερευνητικά προγράμματα και εταιρείες νεο-βλαστούς που ειδικεύονται στην πυρηνική τεχνολογία.

Κράτη όπως οι ΗΠΑ, η Νότια Κορέα, η Ρωσία, η Κίνα, ναυτιλιακές εταιρείες όπως οι Maersk²⁷, NYK Line, ναυπηγεία όπως η Hyundai KSOE²⁸, νηογνώμονες όπως Lloyd’s Register, ABS και νεοβλαστοί τεχνολογίας όπως η CORE POWER και η Seaborg έχουν ήδη αρχίσει να εργάζονται εντατικά για τη μετάβαση στη νέα εποχή της πυρηνικής ενέργειας στη θάλασσα. Τον Δεκέμβριο του 2023, η Κίνα ανακοίνωσε ότι αναπτύσσει σχέδιο φορτηγού πυρηνικού πλοίου με Αντιδραστήρα Τηγμένου Άλατος (Molten Salt Reactor - MSR)²⁹. Επίσης, η CORE POWER συνεργάζεται με την TerraPower για την ανάπτυξη του MCFR (Molten Chloride Fast Reactor - ταχύς MSR) και την Westinghouse για τη θαλάσσια χρήση του μικρο-αντιδραστήρα eVinci, σε ένα ευρύ πρόγραμμα με το όνομα LIBERTY Program³⁰.

²⁵ **EUROPEAN COMMISSION.** “COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2022/1214 of 9 March 2022.” Publications Office of the European Union, 15 July 2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32022R1214>

²⁶ **United States, Congress,** Inflation Reduction Act of 2022 (IRA): Provisions Related to Climate Change, Congressional Research Service, 2022. 2022 Congress bill. <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/5376/text>

²⁷ **Lloyd’s Register.** “LR and CORE POWER to Conduct Next-Generation Nuclear Container Ship Regulatory Study.” Lloyd’s Register, 15 Aug. 2024, <https://www.lr.org/en/knowledge/press-room/press-listing/press-release/2024/lr-and-core-power-to-conduct-next-generation-nuclear-container-ship-regulatory-study/>.

²⁸ **World Nuclear News.** “Korean Shipbuilder Joins Maritime SMR Project.” World Nuclear News, 7 Feb. 2024, <https://www.world-nuclear-news.org/articles/korean-shipbuilder-joins-maritime-smr-project>.

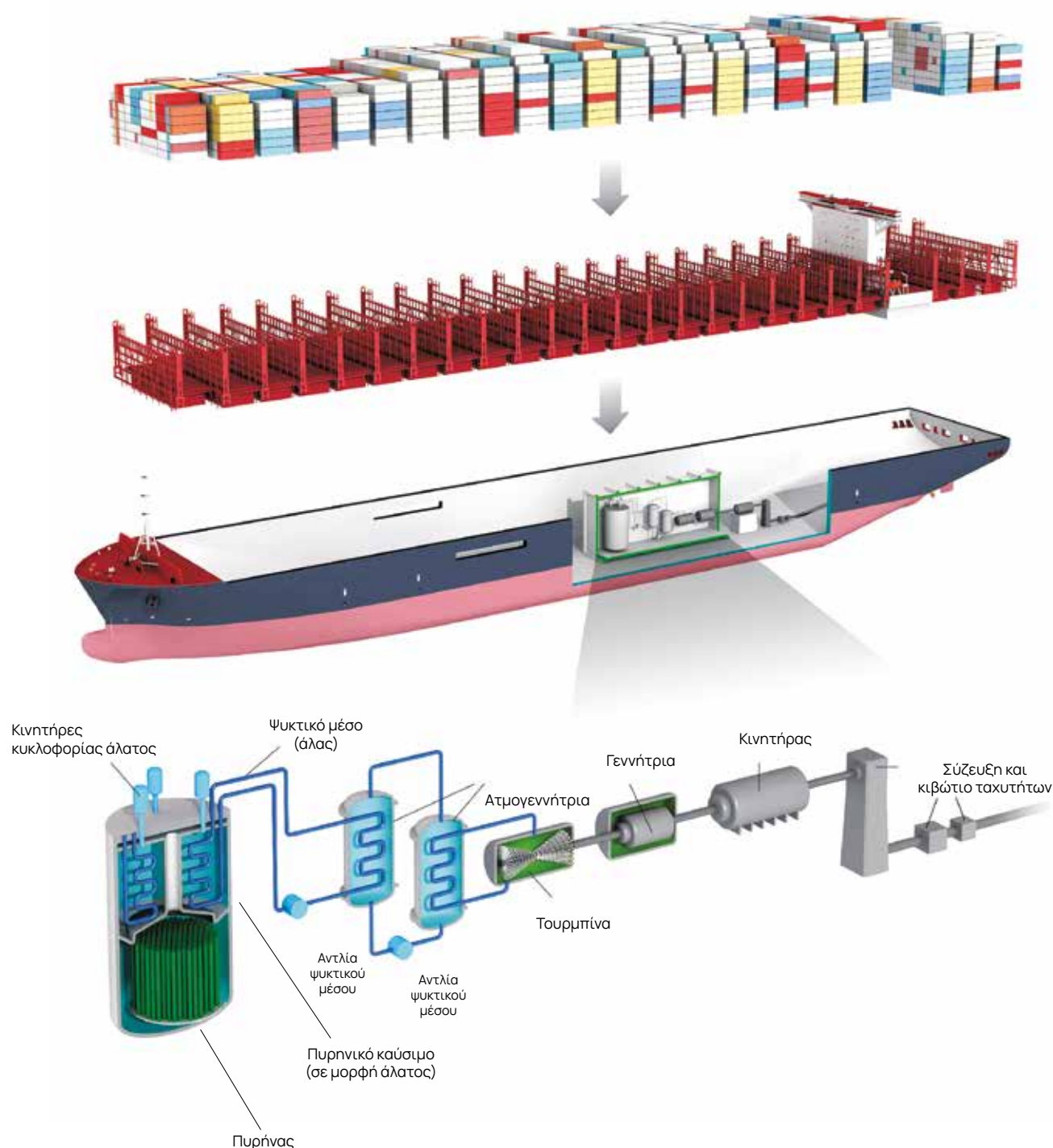
²⁹ **The Maritime Executive.** “CSSC Designs Containership Using Molten Salt Nuclear Reactor.” *The Maritime Executive*, 5 Dec. 2023, <https://maritime-executive.com/article/china-present-design-for-containership-using-molten-salt-nuclear-reactor>.

³⁰ **Core Power.** CORE POWER Launches Liberty Maritime Civil Nuclear Program at Houston Summit. Core Power, 27 Feb. 2024, <https://www.corepower.energy/news/core-power-launches-liberty-maritime-civil-nuclear-program-at-houston-summit>.

Τέλος, η newcleo ανακοίνωσε πλάνο χρήσης του αναπτυσσόμενου Αντιδραστήρα Ταχέων Νετρονίων Ψυχόμενο με Μόλυβδο (Lead cooled Fast Reactor - LFR) σε ΕΠΕΝ, ενώ οι εταιρείες Seaborg, Nano Nuclear και η NewProship αναπτύσσουν επίσης τεχνολογίες ΕΠΕΝ.

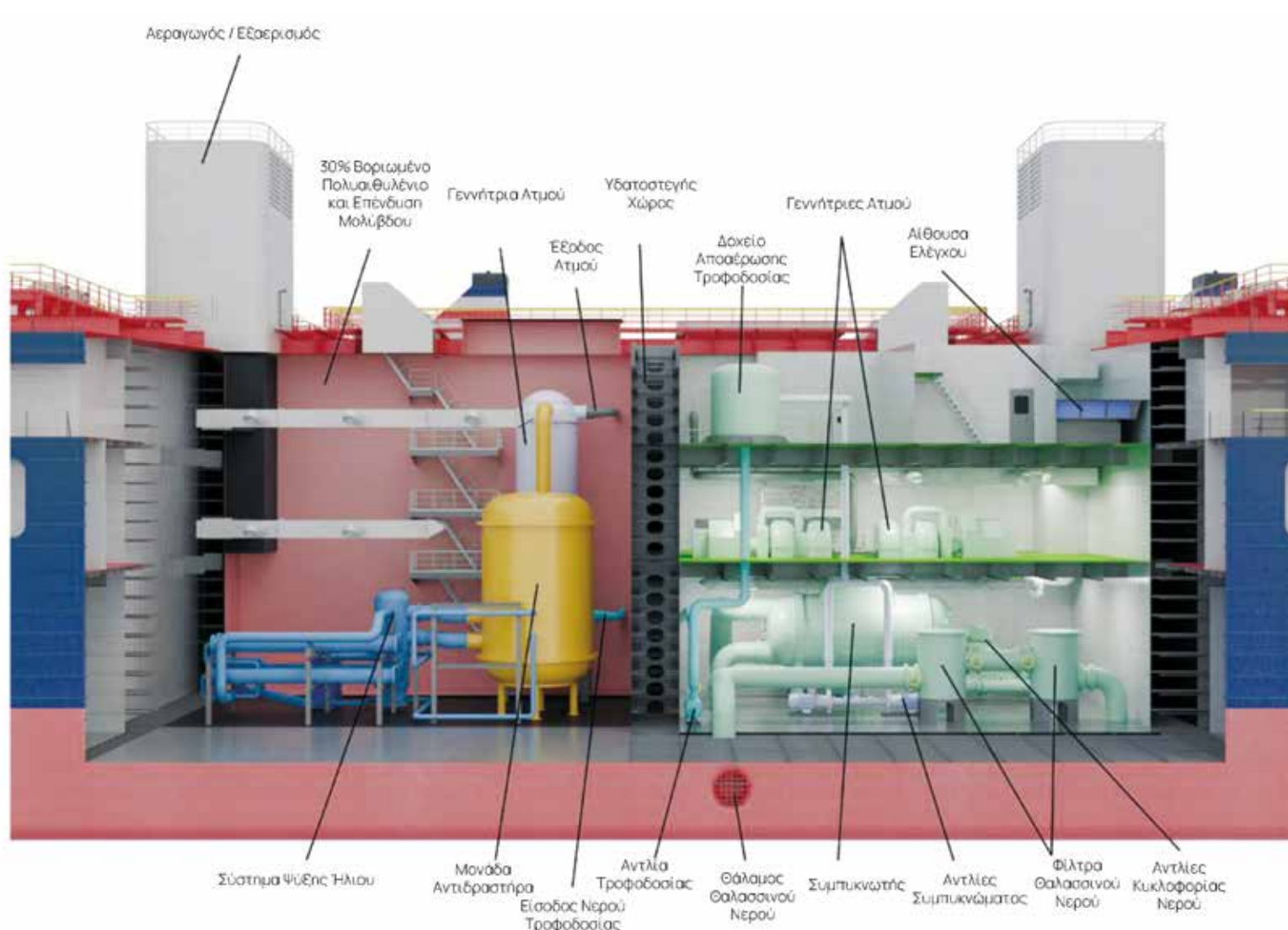
Τεχνολογία

Ο σημερινός σχεδιασμός των εμπορικών πυρηνικών πλοίων τείνει προς την κατεύθυνση των ηλεκτρικών πλοίων (Εικόνα 6), όπου η **πυρηνική ενέργεια θα μετατρέπεται σε ηλεκτρική**, όπως ακριβώς γίνεται σήμερα στους πυρηνικούς σταθμούς. Ο ηλεκτρισμός θα χρησιμοποιείται έπειτα για να καλύψει όλα τα ενεργειακά φορτία του πλοίου συμπεριλαμβανομένης της πρόωσης.



Εικόνα 6α: Καλλιτεχνική απεικόνιση πυρηνοκίντου πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (nuclear container ship) με αντιδραστήρες τηγμένου άλατος (Molten Salt Reactor - MSR) ³¹. Η απεικόνιση δεν αποτελεί τεχνικό σχέδιο - οι σχετικές διαστάσεις και συστήματα δεν πρέπει να ληφθούν ως πληροφορίες σχεδιασμού.

³¹ Ackerman, Evan. "The Case for Nuclear Cargo Ships." IEEE Spectrum, 12 Jan. 2024, <https://spectrum.ieee.org/nuclear-powered-cargo-ship>.



Εικόνα 6β: Καλλιτεχνική απεικόνιση πυρηνοκίντου πλοίου αερόψυκτου αντιδραστήρα υψηλής θερμοκρασίας Κάτω (Copyright of the American Bureau of Shipping ABS)³². Η απεικόνιση δεν αποτελεί τεχνικό σχέδιο - οι σχετικές διαστάσεις και συστήματα δεν πρέπει να ληφθούν ως πληροφορίες σχεδιασμού.

Προς το παρόν, η εμπειρία λειτουργίας αντιδραστήρων στη θάλασσα έχει αποκτηθεί κυρίως με τεχνολογία αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος (Pressurised Water Reactor - PWR). Το πολεμικό ναυτικό των διαφόρων χωρών έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί **υψηλά εμπλουτισμένο καύσιμο**, γεγονός που επιτρέπει το μέγεθος του αντιδραστήρα να είναι **μικρό**, με **υψηλή ισχύ** και **μικρή συχνότητα ανεφοδιασμού**. Τα ίδια δεδομένα δεν ισχύουν για εμπορικές εκδοχές οι οποίες είναι περιορισμένες στην χρήση καυσίμου με **χαμηλό εμπλουτισμό**. Οι συνδεόμενες επιχειρηματικές προκλήσεις σε συνδυασμό με την έλλειψη ενιαίου κανονιστικού και ασφαλιστικού πλαισίου έχουν αποτρέψει μέχρι στιγμής την ευρεία χρήση PWR στην εμπορική ναυσιπλοΐα παρά την επιτυχημένη χρήση τους στο πολεμικό ναυτικό (πέραν της Ρωσίας, όπου λύνει το οικονομικό και ρυθμιστικό εντός των συνόρων της, με στόλο πυρηνικών παγοθραυστικών).

Κάποιες τεχνολογίες αντιδραστήρων υπό ανάπτυξη υπόσχονται μικρή συχνότητα ανεφοδιασμού, μειωμένο μέγεθος εξοπλισμού, ενισχυμένη ασφάλεια και μειωμένο αριθμό απαιτούμενων χειριστών. Στον Πίνακα 3, στην επόμενη σελίδα, αναφέρουμε επιγραμματικά κάποιους από τους κύριους τύπους αντιδραστήρων και την εμπορική ωριμότητά τους.³³

³² **American Bureau of Shipping (ABS), and Herbert Engineering Corp. (HEC).** "PATHWAYS TO A LOW CARBON FUTURE FLOATING NUCLEAR POWER PLANT." American Bureau of Shipping (ABS), 2024.

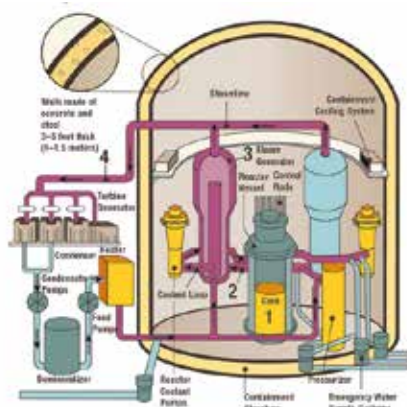
³³ **International Atomic Energy Agency.** "Advanced Reactor Information System." International Atomic Energy Agency, <https://aris.iaea.org/>.

Πίνακας 3α

Βασικοί τύποι αντιδραστήρων και η εμπορική ωριμότητά τους

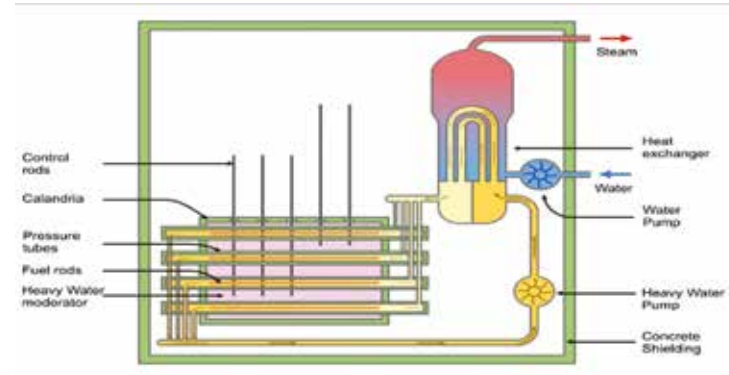
Ωριμες και δοκιμασμένες τεχνολογίες

Pressurised Light Water Reactor (PWR)



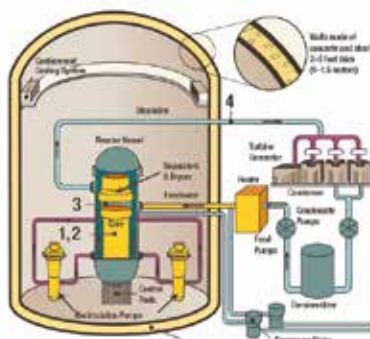
Αντιδραστήρας που χρησιμοποιεί πεπιεσμένο νερό ως επιβραδυντή και ψυκτικό μέσο. Τυπικά χρησιμοποιεί εμπλουτισμό U-235 σε ποσοστά 3% - 5% (LEU).

CANada Deuterium Uranium (CANDU)



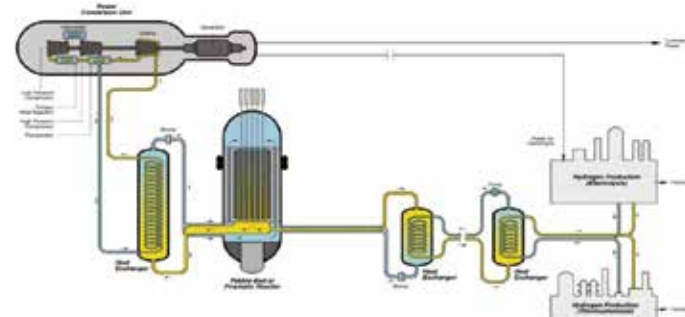
Αντιδραστήρας που χρησιμοποιεί πεπιεσμένο βαρύ νερό (deuterium oxide) ως επιβραδυντή και ψυκτικό μέσο. Χρησιμοποιεί φυσικό ουράνιο χωρίς ανάγκη εμπλουτισμού.

Boiling Water Reactor (BWR)



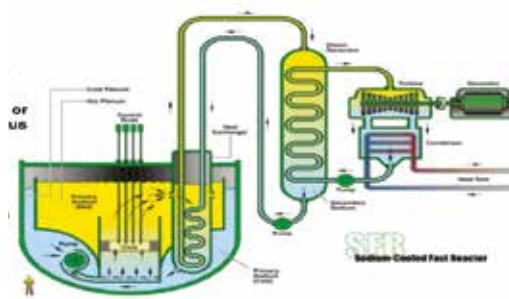
Αντιδραστήρας που χρησιμοποιεί νερό ως επιβραδυντή και ψυκτικό μέσο, το οποίο δεν βρίσκεται υπό πίεση και ατμοποιείται στον πυρήνα. Τυπικά χρησιμοποιεί εμπλουτισμό U-235 σε ποσοστά 3% - 5% (LEU).

High Temperature Gas Reactor (HTGR/AGR)



Αντιδραστήρας που χρησιμοποιεί Ήλιο για ψυκτικό μέσο και γραφίτη για επιβραδυντή. Τυπικά χρησιμοποιεί εμπλουτισμό U-235 σε ποσοστά 3% - 5% (LEU).

Sodium cooled Fast Reactor (SFR)



Αντιδραστήρας που χρησιμοποιεί υγρό Νάτριο για ψυκτικό μέσο, χωρίς επιβραδυντή (ταχύς αντιδραστήρας). Τυπικά χρησιμοποιεί εμπλουτισμό U-235 σε ποσοστά 5% - 20% (HALEU).

Ωριμότητα

- Ωριμη τεχνολογία με ευρεία εμπειρία χρήσης στη βιομηχανία
- Δοκιμασμένη τεχνολογία με εμπειρία χρήσης στη βιομηχανία
- Τεχνολογία υπό ανάπτυξη για εμπορική χρήση σε πειραματικό/ερευνητικό στάδιο
- Τεχνολογία σε θεωρητικό στάδιο με περιορισμένη πειραματική εμπειρία

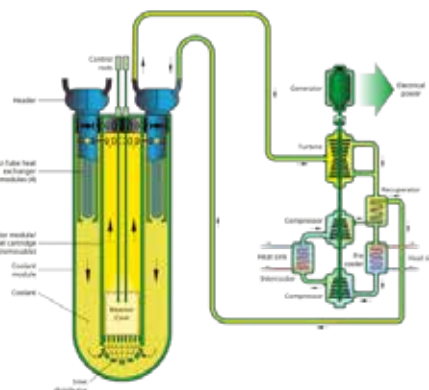
Πίνακας 3β

Βασικοί τύποι αντιδραστήρων και η εμπορική ωριμότητά τους

Τεχνολογίες υπό ανάπτυξη και σε θεωρητικό στάδιο



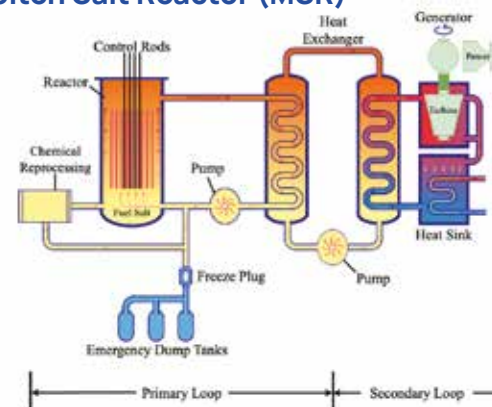
Lead cooled Fast Reactor (LFR)



Αντιδραστήρας που χρησιμοποιεί υγρό μόλυβδο για ψυκτικό μέσο, χωρίς επιβραδυντή (ταχύς αντιδραστήρας). Τυπικά χρησιμοποιεί εμπλουτισμό U-235 σε ποσοστά 5% - 20% (HALEU).



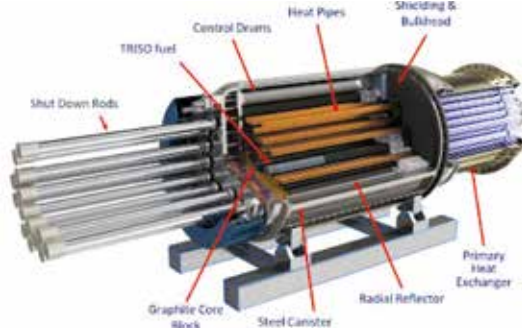
Molten Salt Reactor (MSR)



Αντιδραστήρας υγρού καυσίμου που χρησιμοποιεί τηγμένα φθοριούχα ή χλωριούχα άλατα σε ρόλο ψυκτικό μέσου και καυσίμου. Οι θερμικοί MSR χρησιμοποιούν γραφίτη για επιβραδυντή. Τα σχέδια υπό ανάπτυξη χρησιμοποιούν εμπλουτισμό U-235 σε ποσοστά 5% - 20% (HALEU).



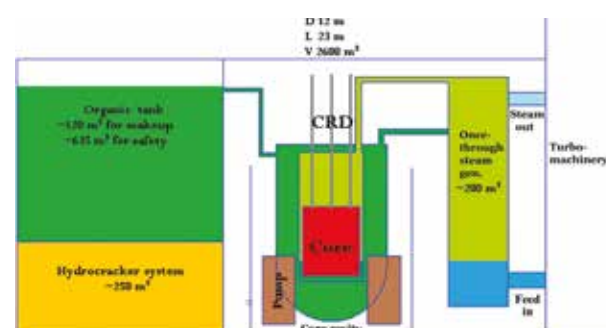
Heat Pipe Reactor (HPR)



Αντιδραστήρας που χρησιμοποιεί σωλήνες θερμότητας για ψυκτικό μέσο και γραφίτη για επιβραδυντή. Τα σχέδια υπό ανάπτυξη χρησιμοποιούν εμπλουτισμό U-235 σε ποσοστά 5% - 20% (HALEU).



Organic Cooled Reactor



Αντιδραστήρας που χρησιμοποιεί υδρογονάνθρακες ως επιβραδυντή και ψυκτικό μέσο. Τα σχέδια υπό ανάπτυξη χρησιμοποιούν εμπλουτισμό U-235 σε ποσοστά 3% - 5% (LEU).

Ωριμότητα

- Ωριμη τεχνολογία με ευρεία εμπειρία χρήσης στη βιομηχανία
- Δοκιμασμένη τεχνολογία με εμπειρία χρήσης στη βιομηχανία
- Τεχνολογία υπό ανάπτυξη για εμπορική χρήση σε πειραματικό/ερευνητικό στάδιο
- Τεχνολογία σε θεωρητικό στάδιο με περιορισμένη πειραματική εμπειρία

Τεχνολογικά Κριτήρια Καταλληλότητας

Ένα από τα βασικά ερωτήματα για το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας στη θάλασσα, είναι η επιλογή κατάλληλου τύπου αντιδραστήρα. Τα βασικά τεχνολογικά κριτήρια καταλληλότητας ενός αντιδραστήρα είναι: (1) **η διαθεσιμότητα**: κύκλος καυσίμου, συχνότητα ανεφοδιασμού και συντήρησης, (2) **η ισχύς**, (3) **το μέγεθος**, (4) **οι ζώνες σχεδιασμού έκτακτης ανάγκης και εμπορική ασφάλιση**, (5) **η μέγιστη παραγόμενη θερμοκρασία**, (6) **ο αριθμός απαιτούμενων χειριστών και προσωπικού**, (7) **το θαλάσσιο περιβάλλον, επιταχύνσεις, ασφάλεια κρισιμότητας** (criticality safety).

Διαθεσιμότητα: Κύκλος Καυσίμου, Συχνότητα Ανεφοδιασμού και Συντήρησης

Η υψηλή διαθεσιμότητα και η αδιάκοπη λειτουργία είναι απαραίτητα κριτήρια για το εμπόριο αλλά και για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Η συχνότητα ανεφοδιασμού και συντήρησης καθώς και ο προγραμματισμένος χρόνος διακοπής λειτουργίας πρέπει να συνάδουν με τις υψηλές απαιτήσεις του θαλάσσιου εμπορίου. Ο δεξαμενισμός ενός πλοίου, κατά τον οποίο θα μπορούσε να γίνει ανεφοδιασμός και συντήρηση πυρηνικών συστημάτων σε κατάλληλα αδειοδοτημένο ναυπηγείο, έχει συνήθως συχνότητα 5 χρόνων.

Ένας σημερινός PWR χρειάζεται ανεφοδιασμό περίπου κάθε 2 χρόνια, με τη διάρκεια ανεφοδιασμού (όπου ο αντιδραστήρας είναι σβηστός) να φτάνει κατά περίπτωση έως και τους 2 μήνες. Κάποιοι εξελιγμένοι PWR (Generation III+) σχεδιάζονται ώστε να επεκτείνουν τη συχνότητα ανεφοδιασμού στα 4-5 χρόνια. Το υψηλό επίπεδο της απαιτούμενης ασφάλειας και προστασίας κατά τον ανεφοδιασμό, αλλά και η διαχείριση του φρέσκου και του χρησιμοποιημένου καυσίμου, σημαίνει ότι τέτοιοι ανεφοδιασμοί μπορούν να γίνουν μόνο σε ναυπηγικές εγκαταστάσεις με πυρηνική αδειοδότηση και όχι σε οποιοδήποτε λιμένα.

Όπως αναφέραμε, οι εξελιγμένοι αντιδραστήρες (Generation IV), που βρίσκονται προς το παρόν στο στάδιο της ανάπτυξης, υπόσχονται μεγαλύτερους κύκλους καυσίμου και μικρότερες συχνότητες ανεφοδιασμού.



Ισχύς

Η απαιτούμενη ισχύς εξαρτάται από τον συγκεκριμένο τύπο ΕΠΕΝ (πρόωση, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αφαλάτωση κ.λπ.) και κυμαίνεται από δεκάδες σε εκατοντάδες MWe ανάλογα με την εφαρμογή. Οι **Μικροί Αρθρωτοί Αντιδραστήρες** (Small Modular Reactor - SMRs) είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται την τελευταία δεκαετία από την πυρηνική βιομηχανία, για να περιγράψει νέες αναπτυσσόμενες τεχνολογίες **με ισχύ έως ~300 MWe** που ιδανικά θα χαρακτηρίζονται από δυνατότητα **μαζικής και σειριακής κατασκευής**, που αναμένεται να μειώσει το συνολικό κόστος παραγωγής.

Οι περισσότερες από τις υπάρχουσες και τις αναπτυσσόμενες πυρηνικές τεχνολογίες που αναφέραμε στον Πίνακα 2, μπορούν να κατασκευαστούν σε μέγεθος SMR, πληρώνοντας τα κριτήρια για την απαιτούμενη ισχύ μιας ΕΠΕΝ. Σε περίπτωση που μια ΕΠΕΝ έχει ανάγκη από υψηλότερη ισχύ, τότε περισσότεροι από ένας SMR μπορούν να εγκατασταθούν στην εφαρμογή.

Μέγεθος

Οι πυρηνικοί σταθμοί στη θάλασσα περιορίζονται στο μέγεθος, κυρίως από τα φυσικά και **σχεδιαστικά όρια** του πλοίου/πλατφόρμας στο οποίο εγκαθίστανται και τους **κανόνες ασφαλείας** για τη φυσική προστασία σε περίπτωση σύγκρουσης, η οποία θα πρέπει να είναι τουλάχιστον το ένα πέμπτο από το συνολικό πλάτος και μήκος του πλοίου από κάθε πλευρά.

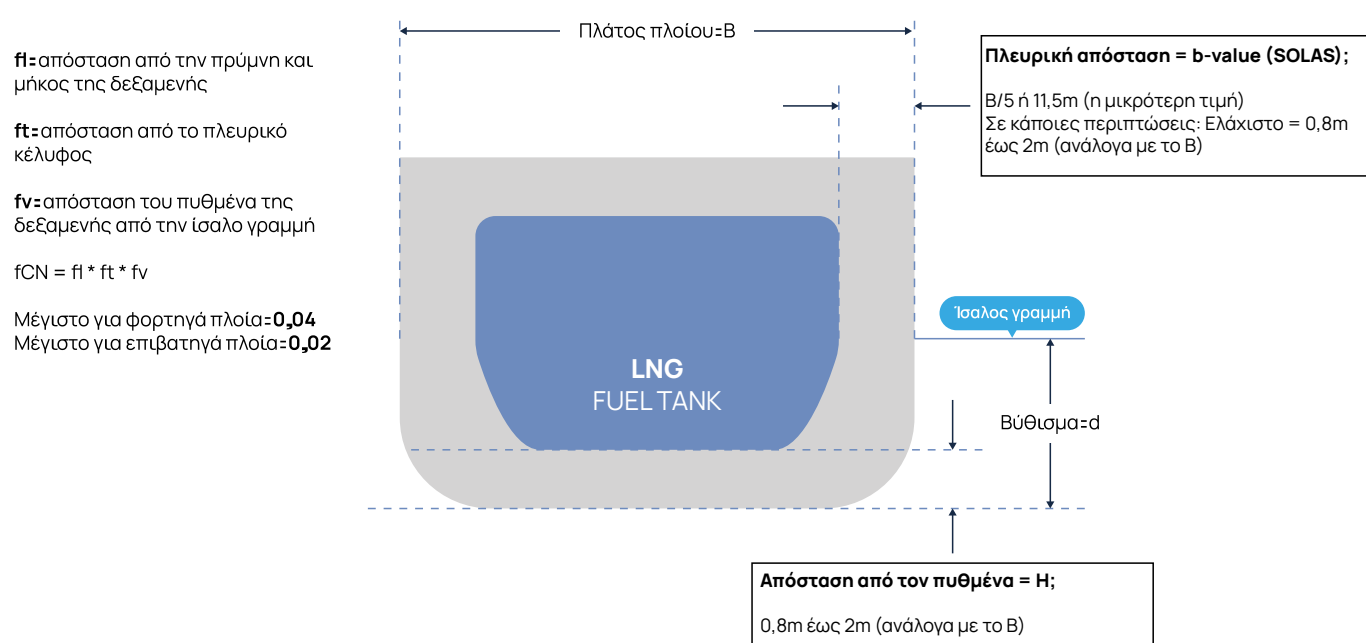
Για παράδειγμα, σε ένα πλοίο με πλάτος 25 μέτρα, η διάσταση της πυρηνικής εγκατάστασης που είναι κάθετη στον άξονα του πλοίου δεν μπορεί, βάσει κανονισμών, να ξεπερνά τα 15 μέτρα συμπεριλαμβανομένων δομικών στοιχείων.³⁴ Παρόμοια φυσικά και κατασκευαστικά όρια υπάρχουν και στο ύψος της πυρηνικής εγκατάστασης καθώς απαιτείται διπύθμενο (double bottom).

Η Εικόνα 7, παρουσιάζει τα βασικά χαρακτηριστικά μιας κατασκευής για την προστασία δεξαμενής υγροποιημένου φυσικού αερίου (Liquified Natural Gas - LNG) με βάση τις διατάξεις του Διεθνούς Κώδικα Ασφάλειας για Πλοία που χρησιμοποιούν αέρια ή άλλα καύσιμα χαμηλού σημείου ανάφλεξης (International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels - IGF).³⁵

Εκ πρώτης όψεως, οι αντιδραστήρες τέταρτης γενιάς που λειτουργούν σε χαμηλές πιέσεις, αναμένεται να είναι μικρότεροι στο μέγεθος από τις υπάρχουσες τεχνολογίες.³⁶ Πριν φτάσουμε σε αυτό το συμπέρασμα όμως, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και τα επιπλέον υποστηρικτικά συστήματα που χρησιμοποιούν αυτοί οι αντιδραστήρες για τη λειτουργία τους. Για παράδειγμα, οι αντιδραστήρες που χρησιμοποιούν άλατα, είτε για ψύξη είτε για καύσιμο, έχουν ανάγκη συστήματα κυκλοφορίας ευγενούς αερίου και καθαρισμού του αλατιού για τη λειτουργία τους, τα οποία προσθέτουν στο μέγεθος του πυρηνικού σταθμού. Κοιτώντας πίσω στην Εικόνα 6, το κτήριο του MSR φαίνεται «παραπλανητικά» μικρό, καθώς έχουν παραλειφθεί πολλά απαραίτητα υποστηρικτικά συστήματα από την απεικόνιση, (γεγονός που παρατηρείται συχνά σε απεικονίσεις concept πυρηνικών πλοίων). Παραδείγματα αναπτυσσόμενων αντιδραστήρων με μικρό μέγεθος είναι οι **Αντιδραστήρες Σωλήνων Θερμότητας** (Heat Pipe Reactors - HPR), **Αντιδραστήρες Ψύξης Μολύβδου** (Lead cooled Fast Reactors - LFR), **Τρίτης Γενιάς Αντιδραστήρες Πεπιεσμένου Ύδατος** (Gen III+ Pressure Water Reactor - PWR).

Εικόνα 7

Απεικόνιση ορίων μεγέθους δεξαμενής LNG βάσει κανονισμών για την προστασία κατά σύγκρουσης



³⁴ **International Maritime Organization**. Code of Safety for Nuclear Merchant Ships. Resolution A.491(XII), adopted on 19 Nov. 1981, [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.491\(12\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.491(12).pdf)

³⁵ **Würsig, Gerd**. The Safety Principles for the Use of Low Flashpoint Fuels in Shipping. Springer Nature Switzerland : Imprint: Springer, 2025. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-64174-9>

Ζώνες Σχεδιασμού Έκτακτης Ανάγκης και Εμπορική Ασφάλιση

Οι πυρηνικοί σταθμοί έχουν Ζώνες Σχεδιασμού Έκτακτης Ανάγκης (Emergency Planning Zone - EPZ) δεκάδων χιλιομέτρων, στις οποίες ο πληθυσμός και οι κρατικές αρχές είναι προετοιμασμένοι να προφυλαχθούν ή να εκκενώσουν, σε περίπτωση ατυχήματος.

Για τα πυρηνοκίνητα πλοία, που θα κινούνται σε πυκνοκατοικημένους λιμένες και διώρυγες, η οργάνωση τέτοιων ζωνών θα είναι πολύπλοκη, ειδικά αν έχουν ακτίνα χιλιομέτρων. Για τους πλωτούς πυρηνικούς σταθμούς αυτό δεν αποτελεί τόσο σημαντικό κριτήριο, καθώς η ασφάλιση και ο σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης μπορεί να ακολουθήσει πρότυπα χερσαίων σταθμών, όπως έγινε και με τον πλωτό σταθμό της Ρωσίας που προαναφέραμε.



Το μέγεθος των EPZ διαφέρει από χώρα σε χώρα, τίθεται από την πυρηνική ρυθμιστική αρχή και υπολογίζεται με βάση την πιθανή έκθεση σε ραδιενέργεια του γύρω πληθυσμού σε περίπτωση ατυχήματος.

Οι αναπτυσσόμενοι αντιδραστήρες τέταρτης γενιάς που λειτουργούν σε χαμηλές πιέσεις με αυξημένη παθητική ασφάλεια, **στοχεύουν άδειες λειτουργίας με ζώνες έκτακτης ανάγκης που θα περιορίζονται στο σύνορο του σταθμού** (EPZ at the site boundary), δίνοντας μια λύση για την υλοποίηση και εμπορική ασφάλιση των πυρηνικών πλοίων.

Παρ' όλες τις ρυθμιστικές διαφορές, όλες οι πυρηνικές τεχνολογίες που λειτουργούν σήμερα, συμπεριλαμβανομένων των PWR, είναι εξαιρετικά ασφαλείς. Μάλιστα, ο σταθμός PWR της Nuscale ήδη πήρε άδεια για μειωμένη EPZ από την Επιτροπή Ρυθμιστικού Ελέγχου Πυρηνικής Ενέργειας των ΗΠΑ (Nuclear Regulatory Commission - NRC).³⁷

Μέγιστη Παραγόμενη Θερμοκρασία

Πολλές από τις πιθανές εφαρμογές των ΕΠΕΝ, όπως η αφαλάτωση, η ηλεκτρόλυση και η σύνθεση αμμωνίας, απαιτούν θερμότητα υψηλής ποιότητας σε μεγάλες θερμοκρασίες για να επιτευχθεί υψηλή απόδοση και βελτιστοποίηση των διεργασιών. Οι αντιδραστήρες **PWR λειτουργούν σε θερμοκρασίες κοντά στους 300°C**, γεγονός που περιορίζει τη χρήση τους σε τέτοιες εφαρμογές. Αντίθετα, οι **προηγμένοι αντιδραστήρες**, όπως οι **Αντιδραστήρες Τηγμένου Άλατος** (Molten Salt Reactors - MSR), **Αντιδραστήρες Αερίου Υψηλής Θερμοκρασίας** (High Temperature Gas Reactors - HTGR) και **Αντιδραστήρες Σωλήνων Θερμότητας** (Heat Pipe Reactors - HPR), μπορούν να **ξεπεράσουν τους 700°C**, παρέχοντας την απαιτούμενη θερμότητα για αποδοτικότερη και οικονομικότερη λειτουργία αυτών των βιομηχανικών διεργασιών.

³⁶ Ο πυρήνας ενός αντιδραστήρα LFR κατά την απόσυρσή του από Ρωσικό υποβρύχιο. Πηγή: **Rogoway, Tyler**. "This Is the World's Fastest Production Submarine's Crazy Molten Metal Cooled Reactor." TWZ, 19 Apr. 2020, www.twz.com/33074/this-is-the-worlds-fastest-production-submarines-crazy-molten-metal-cooled-reactor.

³⁷ NuScale Power. "NuScale's EPZ Boundary Methodology Validated by the NRC Advisory Committee on Reactor Safeguards." NuScale Power, 20 Oct. 2022, <https://www.nuscalepower.com/press-releases/2022/nuscales-epz-boundary-methodology-validated-by-the-nrc-advisory-committee-on-reactor-safeguards>

Αριθμός Απαιτούμενων Χειριστών και Προσωπικού

Το λειτουργικό κόστος του ανθρώπινου δυναμικού στη ναυτιλία είναι συνήθως το δεύτερο υψηλότερο μετά το καύσιμο. Ο αριθμός των απαιτούμενων χειριστών είναι σίγουρα ένα σημαντικό κριτήριο στην επιλογή κατάλληλης πυρηνικής τεχνολογίας.

Με τα σημερινά δεδομένα, μια ΕΠΕΝ θα έχει ανάγκη από τους εξής γενικούς ρόλους για το πυρηνικό σκέλος της στη θάλασσα:

a) **Ανώτερος Χειριστής Αντιδραστήρα** (Senior Reactor Operator), b) **Χειριστής Αντιδραστήρα** (Reactor Operator), c) **Προσωπικό Ελέγχου Υλικών και Διασφαλίσεων** (Material Control & Accounting [MC&A], Inspectors) d) **Προσωπικό Προστασίας** (Security Personnel). Ο αριθμός του προσωπικού για κάθε ρόλο εξαρτάται από το μέγεθος και είδος του αντιδραστήρα και τις ανάλογες βάρδιες.

Οι αντιδραστήρες νέας γενιάς που αναφέραμε, υπόσχονται **εξαιρετικά μειωμένο αριθμό χειριστών** σε σχέση με τις σημερινές τεχνολογίες, εξαιτίας των εξελιγμένων παθητικών συστημάτων λειτουργίας και ασφάλειας του αντιδραστήρα και τους αυξημένους αυτοματισμούς. Θα πρέπει, επίσης, να αναφέρουμε ότι αυτές οι τεχνολογίες δεν έχουν λάβει άδεια λειτουργίας ακόμα. Είναι πολύ πιθανό, οι πυρηνικές ρυθμιστικές αρχές να απαιτήσουν μεγαλύτερο αριθμό χειριστών και λιγότερους αυτοματισμούς, όταν έρθει η ώρα της αδειοδότησης, λόγω της έλλειψης σχετικής εμπειρίας στη βιομηχανία.

Η αναπτυσσόμενη τεχνολογία με τον μικρότερο αναμενόμενο αριθμό χειριστών είναι ο μικρο-αντιδραστήρας HPR eVinci της Westinghouse³⁸ που στοχεύει να έχει έναν μόνο χειριστή ανά αντιδραστήρα εξαιτίας του παθητικού σχεδιασμού και των εξελιγμένων συστημάτων ελέγχου.³⁹ Με τον όρο παθητικός σχεδιασμός εδώ εννοούμε τον σχεδιασμό ενός σταθμού με συστήματα τα οποία δεν απαιτούν εξωτερική παρέμβαση και τροφοδότηση για την ορθή λειτουργία τους, η οποία βασίζεται σε φυσικά φαινόμενα όπως η φυσική κυκλοφορία ψυκτικού υγρού λόγω διαφοράς θερμοκρασίας.

Θαλάσσιο Περιβάλλον

Η λειτουργία ενός σταθμού στη θάλασσα προαπαιτεί ότι θα μπορεί να αντεπεξέλθει σε συνθήκες όπως δυναμικές φορτίσεις από κύματα, ροπές, δονήσεις, κλίσεις και ταλαντώσεις, μεγαλύτερη πιθανότητα έκθεσης σε νερό και τα νέα ρίσκα που παρουσιάζονται από τα ναυτικά συστήματα και τη λειτουργία στη θάλασσα.

Όσον αφορά τις επιταχύνσεις και την κίνηση του σταθμού εξαιτίας των κυμάτων, οι περισσότερες πυρηνικές τεχνολογίες μπορούν να αντεπεξέλθουν σε αυτές με τον κατάλληλο σχεδιασμό. Οι πυρηνικοί σταθμοί σήμερα είναι σχεδιασμένοι για ισχυρές σεισμικές δονήσεις, επομένως τέτοιες σχεδιαστικές απαιτήσεις δεν είναι καινούργιες για τη βιομηχανία. Αυτό το κριτήριο δεν ευνοεί τόσο πολύ κάποιες από τις νέες τεχνολογίες που βασίζονται εξ ολοκλήρου στη φυσική κυκλοφορία του ψυκτικού μέσου ή του καυσίμου, καθώς αυτή θα επηρεάζεται από τη σχετική κίνηση του αντιδραστήρα⁴⁰.

Όσον αφορά την πιθανή έκθεση σε νερό, τεχνολογίες με υλικά που έχουν μη θεμιτές χημικές αντιδράσεις με το νερό, όπως οι αντιδραστήρες με νάτριο (Sodium Cooled Reactors), θα είναι πιο δύσκολο να υιοθετηθούν και ίσως θα χρειαστούν επιπρόσθετους φυσικούς φραγμούς στον σχεδιασμό τους. Παρ' όλα αυτά, η διαχείριση των διαφορετικών ρίσκων που φέρνει το ναυτικό περιβάλλον και η διατήρηση του αυστηρού απαιτούμενου επιπέδου πυρηνικής ασφάλειας είναι δεδομένα και προαπαιτούμενα για να αδειοδοτηθεί οποιαδήποτε ΕΠΕΝ στο μέλλον.

³⁸ Westinghouse Electric Company. "eVinci™ Microreactor." Westinghouse Electric Company, <https://westinghousenuclear.com/energy-systems/evinci-microreactor/>

³⁹ Westinghouse Electric Company. "Westinghouse eVinci™ Control System Achieves Major U.S. Licensing Milestone." Westinghouse Electric Company, 4 Dec. 2024, <https://info.westinghousenuclear.com/news/westinghouse-evinci-control-system-achieves-major-us-licensing-milestone>

⁴⁰ Evaluation of the Molten Salt Reactor technology for the application of Floating Nuclear Power Plants, I. Kourasis et. al. IAEA SMR CONFERENCE 2024

Κόστος και Επιχειρηματικό Μοντέλο

Η Πυρηνική Ενέργεια έχει διαφορετικό επιχειρησιακό μοντέλο από τα ορυκτά καύσιμα και τις μηχανές εσωτερικής καύσης.

Κόστος

Η πυρηνική ενέργεια απαιτεί **υψηλές κεφαλαιακές δαπάνες**. Ο αντιδραστήρας και το καύσιμο είναι περιουσιακά στοιχεία αξίας εκατοντάδων εκατομμυρίων, που χρειάζονται ειδική διαχείριση κατά τη μεταφορά, αδειοδότηση και λειτουργία τους, καθώς και σημαντικό κόστος για την απόσυρσή τους (decommissioning), τη διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων και του χρησιμοποιημένου καυσίμου.

Δεδομένου του υψηλού κεφαλαιουχικού κόστους, εύλογα γεννάται το ερώτημα αν αυτή η τεχνολογία είναι οικονομικά ανταγωνιστική σε σχέση με τις υπάρχουσες τεχνολογίες. Παρακάτω (Πίνακας 4) παρατίθενται ενδεικτικά τα ετήσια κόστη καυσίμου για διάφορους τύπους πλοίων container, bulker και tanker, υποθέτοντας **την τρέχουσα τιμή HSFO, \$450-500 ανά τόνο (05/03/2025)** (το πιο φθηνό καύσιμο που χρησιμοποιείται ευρέως στη ναυτιλία) και λειτουργία 275 ημερών τον χρόνο.

Πίνακας 4

Πίνακας εκτιμήσεων κατανάλωσης καυσίμου για διάφορους τύπου πλοίων. Οι πραγματικοί ημερήσιοι ρυθμοί κατανάλωσης ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο της μηχανής, την ταχύτητα και την κατάσταση φόρτωσης.

Τύπος Πλοίου	Χωρητικότητα Πλοίου	Κατανάλωση καυσίμου ανά ημέρα	Ετήσιο Κόστος Καυσίμου	Συνολικό κόστος καυσίμου (λειτουργία 25 ετών)
Capesize	100.000 – 200.000 DWT	30-45 mt / day	\$4-6M	\$90-150M
Chinamax / VLOC	200.000 – 400.000 DWT	40-50 mt / day	\$5-7M	\$120-170M
Aframax	45.000-79.999 DWT	30-50 mt/day	\$4-7M	\$90-170M
Suezmax	80.000-159.999 DWT	45-60 mt/day	\$6-8M	\$140-200M
VLCC (Very Large Crude Carrier)	160.000-319.999 DWT	60-100 mt/day	\$7-14M	\$180-240M
ULCC (Ultra Large Crude Carrier)	320.000-549.999 DWT	100-150 mt/day	\$12-20M	\$310-515M
ULCV (Ultra Large Container Vessel)	14.501 and higher TEU	200-400 mt/day	\$25-55M	\$600-1.300M

Οι πραγματικοί ημερήσιοι ρυθμοί κατανάλωσης ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο της μηχανής, την ταχύτητα και την κατάσταση φόρτωσης. Όμως, οι παραπάνω υπολογισμοί βρίσκονται σε συμφωνία με τις μέσες ετήσιες καταναλώσεις καυσίμου ανά τύπο πλοίου όπως αυτές υπολογίστηκαν σε πολύ πρόσφατο άρθρο. **Αν σε αυτά τα κόστη του ορυκτού καυσίμου προστεθούν και οι φόροι**

εκπομπής διοξειδίου, τότε εμφανίζεται ένα σημαντικό περιθώριο εξοικονόμησης με τη χρήση πυρηνικών αντιδραστήρων, για κάποια είδη πλοίων. Αυτή ακριβώς η εκτίμηση επιβεβαιώθηκε από την έρευνα του Maritime Nuclear Applications Group, καταλήγοντας ότι τα πυρηνικά πλοία θα μπορούν όχι μόνο να είναι βιώσιμα αλλά και ανταγωνιστικά. Για τα λειτουργικά κόστη του μηχανοκίνητου πλοίου η εν λόγω έρευνα συμψηφίζει το κόστος του ορυκτού καυσίμου με τον φόρο εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα, εκτιμώντας ότι το πυρηνικό πλοίο θα έχει φθηνότερο λειτουργικό κόστος με διαφορά που κυμαίνεται από \$95M έως \$445M στο διάστημα 2035 - 2055, για τα σενάρια με ανταγωνιστική πυρηνική τεχνολογία. Παρ' όλα αυτά οι προβλέψεις και υπολογισμοί συνοδεύονται από σημαντική αβεβαιότητα και η κύρια χρησιμότητά τους είναι να ελεγχθεί η γενική βιωσιμότητα αυτής της πρότασης με βάση τα δεδομένα που έχουμε σήμερα.

Το συνολικό κεφαλαιακό κόστος ενός πυρηνικού σταθμού πρόωσης δεν μπορεί να υπολογιστεί με βεβαιότητα εφόσον τέτοιοι σταθμοί δεν βρίσκονται προς το παρόν σε εμπορική χρήση. Οι αρχικές εκτιμήσεις υπολογίζουν ότι το κεφαλαιακό κόστος για ένα νέο πυρηνικό container ship 24.000 TEU θα ξεκινάει από \$280M, και το λειτουργικό κόστος από \$11,5M/yr⁴¹. Στα λειτουργικά κόστη συμπεριλαμβάνεται το κόστος της απόσυρσης που κυμαίνεται από 10% έως 20% του αρχικού κεφαλαιουχικού κόστους⁴³, ενώ το κόστος της ασφάλισης ενός πυρηνικού σταθμού στη στεριά είναι περίπου \$1 - \$1,5M τον χρόνο.⁴⁴ Για τα πλοία, το κόστος της εμπορικής ασφάλισης αναμένεται να είναι υψηλότερο.

Η εκτιμώμενη τιμή κόστους ενός πυρηνικού σταθμού πρόωσης, που αποτελεί το μεγαλύτερο μερίδιο του συνολικού κόστους, ελαφρύνεται σημαντικά έως και εξ ολοκλήρου, μόνο και μόνο από τις διαφορές στο κόστος του ορυκτού καυσίμου, χωρίς να υπολογίζεται το επιπλέον κόστος των φόρων εκπομπής διοξειδίου.

Επιχειρηματικό Μοντέλο

Η ιδιοκτησία και η λειτουργία του πυρηνικού σταθμού μπορεί να γίνεται μόνο από πιστοποιημένο ιδιοκτήτη και λειτουργό (Licensed Nuclear Owner and Operator). Η πιστοποίηση δίνεται υπό αυστηρούς κανονισμούς από τον εκάστοτε πυρηνικό ρυθμιστή και προϋποθέτει την εξειδίκευση και την τεχνογνωσία του προσωπικού στην πυρηνική ενέργεια, σχέδιο και υποδομές για τη διαχείριση του πυρηνικού καυσίμου και των πυρηνικών αποβλήτων και μακροχρόνιες χρηματοοικονομικές εγγυήσεις. Σήμερα, καμία ναυτιλιακή δεν πληροί αυτά τα κριτήρια, επομένως το επιχειρηματικό μοντέλο των πρώτων πυρηνικών πλοίων θα χρειαστεί να συμπεριλάβει τους υπάρχοντες πυρηνικούς λειτουργούς.

Οι παραπάνω ιδιαιτερότητες της πυρηνικής ενέργειας καθιστούν αναγκαία τη θέσπιση διαφορετικού επιχειρηματικού μοντέλου για την ιδιωτική χρήση τους στη ναυσιπλοΐα, που μάλλον θα μοιάζει περισσότερο με αυτό των κινητήρων αεροσκαφών της Rolls Royce (Power by the Hour). Ο ιδιοκτήτης και χειριστής του αντιδραστήρα θα αναλαμβάνει την πιστοποίηση, κατασκευή, εφοδιασμό, συντήρηση και διαχείριση του αντιδραστήρα και θα χρεώνει τον πελάτη/πλοιοκτήτη για τη χρήση του. Στα πλαίσια αυτού του διαφορετικού επιχειρηματικού μοντέλου, οι πλοιοκτήτες θα μπορούν να μισθώνουν το πλοίο ή να είναι συνιδιοκτήτες, διατηρώντας όμως τον πλήρη λειτουργικό έλεγχό του. Τα ερωτήματα περί υπονάυλωσης και πώλησης ενός πλοίου υπό αυτό το μοντέλο παραμένουν ανοιχτά.

⁴¹ New Energies Coalition, The role of nuclear in shipping decarbonization, April 2025, page 14.

https://www.newenergies-coalition.com/static/f76f704347f93b44f1b2000ecba8421d/NewEnergiesCoalition-Nuclear_in_shipping.pdf

⁴² Dowling, M. et al. Configurations of Commercial Advanced Nuclear-Maritime Applications, doi:10.2172 2318529.

⁴³ De, Pabitra L. Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants: A Report on Recent International Estimates. IAEA Bulletin, vol. 32, no. 3, 1990, pp. 39-42.

<https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull32-3/32304783942.pdf>

⁴⁴ U.S. Nuclear Regulatory Commission. Nuclear Insurance and Disaster Relief. NRC, 26 Mar. 2024,

<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/nuclear-insurance.html>

Επίσης, οι ασφαλιστικοί φορείς της πυρηνικής βιομηχανίας δεν έχουν ακόμα κοινό ασφαλιστικό πλαίσιο με τη ναυτιλία, αν και οι συζητήσεις για συνεργασία τους έχουν ξεκινήσει, αναμένοντας τις πρώτες σύγχρονες εφαρμογές.

Η σημερινή αγορά του πυρηνικού καυσίμου είναι η μεγαλύτερη μεταβλητή στα οικονομικά των SMR και των μικρο-αντιδραστήρων. Το κόστος του καυσίμου εξαρτάται κυρίως από τον εμπλουτισμό του σε Ουράνιο-235. Οι νέοι SMR και μικρο-αντιδραστήρες που αναφέραμε, σχεδιάζουν να χρησιμοποιήσουν High-Assay Low-Enrichment Uranium (HALEU-εμπλουτισμένο Ουράνιο σε ποσοστό 19.75%). Σήμερα, η κύρια παραγωγός εταιρεία που προμηθεύει HALEU την αγορά όλου του πλανήτη είναι η κρατική ρωσική TENEX. Ως εκ τούτου, υπάρχει έλλειψη αυτού του καυσίμου στη Δύση, καθώς παράγεται από τις ΗΠΑ και την Κίνα σε μικρές ποσότητες. Όπως θα δούμε παρακάτω, οι ΗΠΑ στοχεύουν να αναπτύξουν άμεσα νέες δυνατότητες εμπλουτισμού αλλά και μεθόδους μίξης του ήδη εμπλουτισμένου ουρανίου με φυσικό ουράνιο (down blending) για τη μελλοντική παραγωγή HALEU. Έτσι, η σημερινή εικόνα αναμένεται να βελτιωθεί τα αμέσως επόμενα χρόνια, λόγω της ανάπτυξης αλυσίδας παραγωγής HALEU στη Δύση, της αναμενόμενης ύφεσης της γεωπολιτικής αντιπαράθεσης ανάμεσα στις ΗΠΑ και τη Ρωσία και των τεχνολογικών εξελίξεων που μπορεί να οδηγήσουν σε ανάγκη για καύσιμο με μικρότερο απαιτούμενο εμπλουτισμό. Οι αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος είναι σχεδιασμένοι για χαμηλό εμπλουτισμό, για τον οποίο υπάρχει εδραιωμένη αλυσίδα εφοδιασμού στη Δύση.



Ρυθμιστικό Πλαίσιο

Η αδειοδότηση των εμπορικών πυρηνικών εφαρμογών ναυσιπλοΐας απαιτεί συνεργασία πυρηνικών και ναυτικών ρυθμιστικών αρχών. Η διαδικασία αυτή βρίσκεται ακόμη στην αρχή της.

Για να πραγματοποιηθεί εμπορική χρήση της πυρηνικής ενέργειας στη ναυσιπλοΐα, πρέπει να εφαρμοστούν παράλληλα τα εξής ρυθμιστικά πλαίσια: **α) διεθνή και κρατικά ρυθμιστικά πλαίσια ναυτιλίας, β) διεθνή και κρατικά ρυθμιστικά πλαίσια πυρηνικής ενέργειας, γ) κανονιστικά πλαίσια νηογνώμονα, δ) ρυθμιστικά πλαίσια λιμένων**. Μια τέτοια εφαρμογή προϋποθέτει κοινά κανονιστικά πλαίσια, τα οποία δεν έχουν εδραιωθεί και εφαρμοστεί ακόμα.

Πολλά κράτη έχουν κάποιο νομοθετικό πλαίσιο ή/και διμερείς συμφωνίες που επιτρέπουν τη ναυσιπλοΐα πυρηνικών πολεμικών πλοίων στα ύδατά τους (η Ελλάδα είναι μια εξ αυτών), αλλά όχι για πυρηνοκίνητα εμπορικά πλοία στους λιμένες ή στα ύδατά τους. Είναι πιθανόν ότι τα πρώτα πυρηνοκίνητα εμπορικά πλοία θα λειτουργήσουν μάλλον για τις μεταφορές εμπορευμάτων μεταξύ συγκεκριμένων χωρών με υπάρχουσες πυρηνικές βιομηχανίες και έμπειρους ρυθμιστές μετά από διμερείς συμφωνίες. Σε κάθε περίπτωση αυτά τα πλοία θα υπόκεινται στους διεθνείς κανονισμούς του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (International Maritime Organization - IMO).

Διεθνές πλαίσιο

Σήμερα η Σύμβαση των Ηνωμένων Εθνών για το Δίκαιο της Θάλασσας, γνωστή και ως UNCLOS (United Nations Convention on the Law of the Sea), αναγνωρίζεται ευρέως ως το γενικό νομικό πλαίσιο εντός του οποίου πρέπει να διεξάγονται οι δραστηριότητες στους ωκεανούς και τις θάλασσες. Οι απαιτήσεις ασφάλειας των πλοίων που σχετίζονται με την εμπορική πυρηνική ναυτιλία υποστηρίζονται από τη σύμβαση του IMO για την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής στη θάλασσα (Safety of Life at Sea - SOLAS). Στις δεκαετίες του 1960 και του '70 το κεφάλαιο VIII του SOLAS χρησιμοποιήθηκε για την υποστήριξη των λίγων εμπορικών πυρηνικών πλοίων της εποχής (NS Savannah, Otto Hahn, Mutsu). Σήμερα, το ψήφισμα A491.(XII) «**Κανονισμός Ασφάλειας Πυρηνικών Εμπορικών Πλοίων**» του IMO από το 1981 είναι ουσιαστικά απαρχαιωμένο τόσο σε θέματα πυρηνικής τεχνολογίας, διεθνών πρακτικών πυρηνικής ασφάλειας και ανάλυσης ρίσκου όσο και σε κανόνες του ίδιου του οργανισμού. Στην 108η συνεδρίαση της Επιτροπής Ασφάλειας της Ναυτιλίας (MSC 108), το Παγκόσμιο Ινστιτούτο Πυρηνικών Μεταφορών (World Nuclear Transport Institute - WNTI) κατέθεσε αναλυτική μελέτη 350 σελίδων με τον τίτλο «Ανάλυση Κενών του Κώδικα Ασφάλειας για Πυρηνοκίνητα Εμπορικά Πλοία (Απόφαση A.491(XII) Νοέμβριος 1981) σε Σχέση με τα Τρέχοντα Διεθνή Πρότυπα Ασφάλειας»⁴⁵ για τον εκσυγχρονισμό του ψηφίσματος A491(XII), ώστε να μπορεί να συνυπάρξει με τις ρυθμιστικές πρακτικές και τις σύγχρονες τεχνολογίες. Στη μελέτη συμμετείχε και συντάκτης του παρόντος κειμένου. Η ανανέωση του κώδικα αναμένεται να συζητηθεί στο επόμενο MSC 110.⁴⁶

Το 2013, ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency - IAEA) δημοσίευσε μια συνολική έκθεση ανασκόπησης σχετικά με το πλαίσιο για τους πλωτούς πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής (Floating Nuclear Power Plants - FNPP). Η έκθεση υπογράμμισε τη σημασία ανάπτυξης αντιδραστήρων SMR, ιδίως για τις μονάδες FNPP που παραμένουν σταθερές στη χώρα προέλευσής τους. Παρ' όλα αυτά προκύπτουν σημαντικά αναπάντητα ρυθμιστικά ερωτήματα για τα FNPP που ενδέχεται να λειτουργήσουν σε άλλη χώρα από αυτή της κατασκευής τους ή σε διεθνή ύδατα.

⁴⁵ **World Nuclear Transport Institute.** "WNTI Gap Analysis of the Code of Safety for Nuclear Merchant Ships." World Nuclear Transport Institute, 2 May 2024, <https://www.wnti.co.uk/news/wnti-gap-analysis-of-the-code-of-safety-for-nuclear-merchant-ships/>.

Full document can be accessed here: <https://www.corepower.energy/library/gapanalysisa491>

⁴⁶ **Core Power.** Nuclear at IMO MSC 108. Core Power, 24 May 2023, <https://www.corepower.energy/news/nuclear-at-imo-msc-108>.

Ο κώδικας πυρηνικών καυσίμων του IMO, γνωστός ως κώδικας INF (International Code for the Safe Carriage of Packaged Irradiated Nuclear Fuel, Plutonium and High-Level Radioactive Wastes on board Ships), λαμβάνει υπόψη τις απαιτήσεις της IAEA και είναι υποχρεωτικός για τα πλοία που μεταφέρουν συσκευασμένα πυρηνικά καύσιμα, ραδιενεργά απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας ή πλουτώνιο. Οι διατάξεις του παρόντος κώδικα είναι αλληλένδετες με τον διεθνή κώδικα του IMO για τη ναυπήγηση και τον εξοπλισμό των πλοίων που μεταφέρουν χύδην **επικίνδυνες χημικές ουσίες** (International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Dangerous Chemicals in Bulk - IBC) και με τους κανονισμούς για τα **διεθνή ναυτιλιακά επικίνδυνα εμπορεύματα** (International Maritime Dangerous Goods Code - IMDG). Πιο συγκεκριμένα, το εδάφιο 2.7 του κώδικα IMDG αντικατοπτρίζει τις διατάξεις των απαιτήσεων της IAEA για τα ραδιενεργά υλικά κλάσης 7. Ωστόσο, σήμερα λαμβάνονται υπόψη μόνο τα ραδιενεργά υλικά που συσκευάζονται ως φορτίο, ένα πλαίσιο που δεν καλύπτει τους αντιδραστήρες παραγωγής ενέργειας.

Τον Απρίλιο του 2024 ιδρύθηκε η **διεθνής Οργάνωση Πυρηνικής Ενέργειας για τη Ναυτιλία (Nuclear Energy for Maritime Organization - NEMO)**, με σκοπό να γίνει μη κυβερνητικός οργανισμός μέλος της IAEA αλλά και του IMO, για να βοηθήσει στην ανανέωση και θέσπιση κοινού ρυθμιστικού πλαισίου για τις ΕΠΕΝ. Αξιοσημείωτα μέλη του NEMO από την Πυρηνική Βιομηχανία και τη Ναυτιλία είναι οι Westinghouse, BWX Technologies, HD KSOE, American Bureau of Shipping, Bureau Veritas και Lloyd's Register.⁴⁷ Παράλληλα, η IAEA μέσω του προγράμματος **ATLAS (Atomic Technology Licensed for Applications at Sea - Ατομική Τεχνολογία Αδειοδοτούμενη για Εφαρμογές στη Θάλασσα)**, με επίσημη έναρξη το 2025, σκοπεύει στη δημιουργία διεθνούς πλαισίου ρύθμισης πυρηνικών εφαρμογών ναυσιπλοΐας⁴⁸.

Κανονιστικό πλαίσιο Νηογνώμονα

Τον Οκτώβριο του 2024, ο **American Bureau of Shipping (ABS)** **εξέδωσε τις πρώτες σύγχρονες κανονιστικές οδηγίες νηογνώμονα για πλωτούς πυρηνικούς σταθμούς**, ένα σημαντικό βήμα για την υλοποίηση των ΕΠΕΝ⁴⁹.

Οι οδηγίες του ABS για συστήματα πυρηνικής ενέργειας για θαλάσσιες και υπεράκτιες εφαρμογές αναπτύχθηκαν με στόχο το καλύτερο σχεδιασμό, κατασκευή και έρευνα επί σκαφών που έχουν εγκαταστάσεις συστημάτων πυρηνικής ενέργειας. Καθορίζουν τις απαιτήσεις του ABS για την υποχρεωτική ένδειξη Power Service (Nuclear) για την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας και όχι μόνο αυτοπρώση. Ο όρος “σκάφος” περιλαμβάνει πλοία, φορτηγίδες, υπεράκτιες μονάδες και εγκαταστάσεις. Σύμφωνα με τον ABS είναι **ευθύνη της πυρηνικής ρυθμιστικής αρχής** να αδειοδοτήσει τον **αντιδραστήρα**, τις **δομές**, τα **συστήματα** και **εξαρτήματα πυρηνικής ασφάλειας**. Ως εκ τούτου, συνιστάται η συνεργασία με **άλλες ρυθμιστικές αρχές**, συμπεριλαμβανομένων εκείνων της προβλεπόμενης **Λιμενικής Αρχής** και **Σημαίας** και της **Ρυθμιστικής Αρχής Πυρηνικής Ενέργειας**.

Ο κανονισμός βασίζεται επί το πλείστον στους κανόνες του ψηφίσματος Α, του IMO A491.(XII) και επιχειρεί να πετύχει παράλληλη εφαρμογή των διαφορετικών κανονιστικών πλαισίων που αναφέραμε παραπάνω μέσω ενός αρχείου διεπαφών (interface document) για κάθε σταθμό. Ανάλογα με την περίπτωση το αρχείο θα περιγράφει και θα οριοθετεί τα ναυτικά και πυρηνικά συστήματα του σταθμού, τις διεπαφές μεταξύ τους και τις ευθύνες των διαφορετικών ρυθμιστικών αρχών για τον έλεγχο και την έγκρισή τους. Μέσω αυτής της μεθόδου, η εκάστοτε πυρηνική ή ναυτική ρυθμιστική αρχή θα μπορεί να επιβάλει τους κανονισμούς της με μια ξεκάθαρη διαίρεση ευθυνών. Αυτό βέβαια προϋποθέτει ότι η Σημαία της ΕΠΕΝ θα έχει υπόψη κατά περίπτωση μια **εδραιωμένη πυρηνική ρυθμιστική αρχή** που θα είναι διατεθειμένη να δώσει μια τέτοια αδειοδότηση.

Αναγνωρίζεται ότι όταν το ψήφισμα Α.491(XII) επικαιροποιηθεί από τον IMO ή αναπτυχθούν άλλα διεθνώς αναγνωρισμένα πρότυπα οι απαιτήσεις νηολόγησης θα επικαιροποιηθούν αναλόγως.

⁴⁷ **Nuclear Energy Maritime Organization**. “Nuclear Energy Maritime Organization.” *Nuclear Energy Maritime Organization*, <https://www.nemo.ngo/>

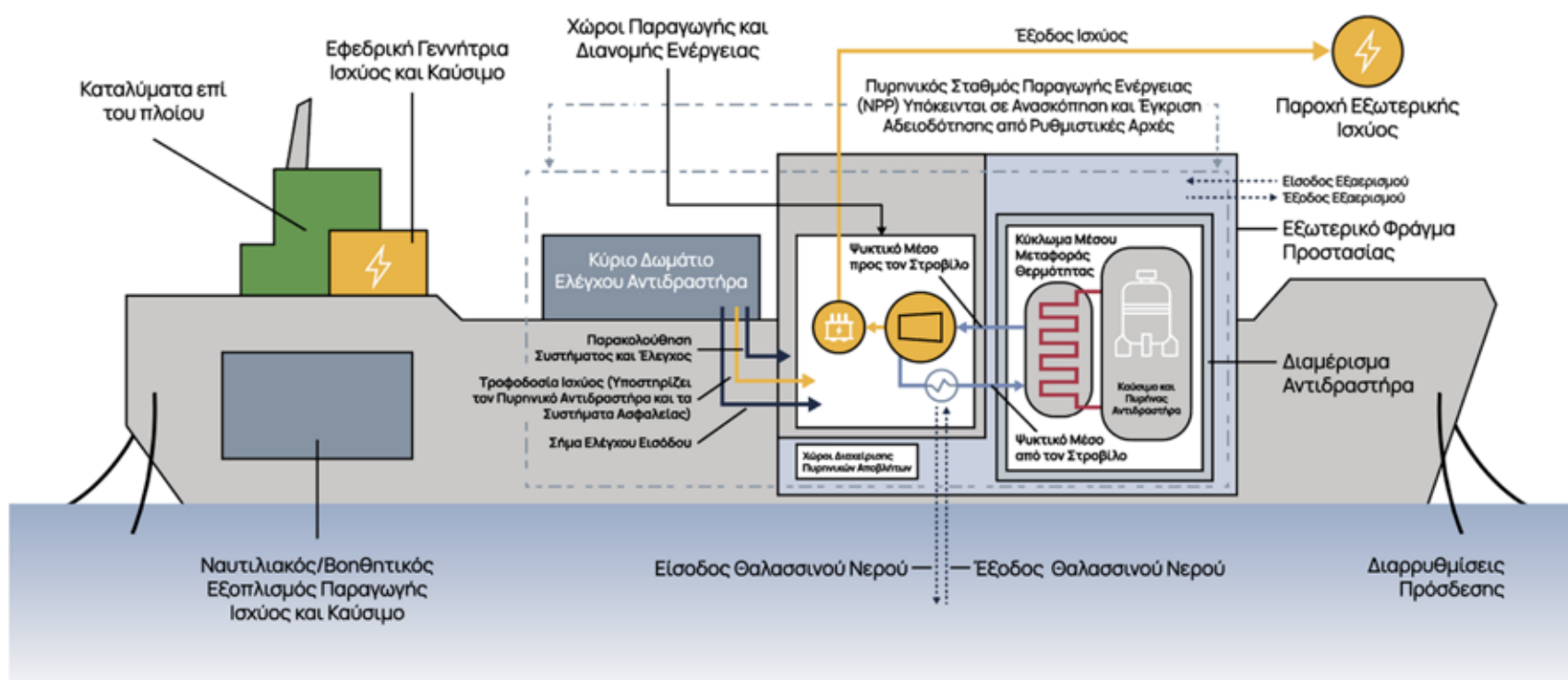
⁴⁸ **CORE POWER**. “IAEA Prepares to Set Sail with ATLAS Project.” *CORE POWER*, 5 Sept. 2024, <https://www.corepower.energy/news/iaea-to-launch-atlas-project-on-new-nuclear-for-maritime>.

⁴⁹ **American Bureau of Shipping**, Requirements for Nuclear Power Systems for Marine and Offshore Applications. Oct. 2024. https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/special_service/346-requirements-for-nuclear-power-systems-for-marine-and-offshore-applications-2024/346-nuclear-power-systems-reqts-oct24.pdf

Μια κύρια υπόθεση του κανονισμού είναι ότι η **πυρηνική ρυθμιστική αρχή** θα δεχτεί τον διαχωρισμό του **σταθμού σε πυρηνικές και μη πυρηνικές εγκαταστάσεις** (Εικόνα 9) και θα αναγνωρίσει το «αρχείο διεπαφών» ως όχι απλά αναγκαία αλλά και επαρκή συνθήκη για την πυρηνική αδειοδότηση. Κάτι τέτοιο δεν είναι αυτονόητο για τις πυρηνικές ρυθμιστικές αρχές. Από την πλευρά της πυρηνικής βιομηχανίας, αυτός ο «Διαχωρισμός» (Separation of Nuclear Facility and Adjacent Facility) έχει αρχίσει να εφαρμόζεται μόνο τα τελευταία χρόνια στις αδειοδοτήσεις σχεδίων πυρηνικών σταθμών νέας τεχνολογίας, κυρίως για τη μείωση του κατασκευαστικού κόστους και προϋποθέτει ειδικό σχεδιασμό για να επιτευχθεί.

Εικόνα 9

Σχήμα υποδιαίρεσης συστημάτων μιας ΕΠΕΝ, από τον κανονισμό της ABS © Copyright American Bureau of Shipping.



Εν κατακλείδι, αν και απουσιάζει σήμερα ένα ενιαίο ρυθμιστικό πλαίσιο για την αδειοδότηση εμπορικών πυρηνικών εφαρμογών ναυσιπλοΐας, οι ενέργειες σε διεθνές και εθνικό επίπεδο είναι ενθαρρυντικές για το μέλλον των ΕΠΕΝ. Στην πράξη, αυτό σημαίνει τη σταδιακή ανάπτυξη ενός νέου κανονιστικού πλαισίου που θα προωθεί την τεχνολογική συνεργασία, την ανταλλαγή γνώσεων, και την εναρμόνιση συμφερόντων.

Ασφάλεια, Προστασία, Διασφαλίσεις και Πυρηνικά Απόβλητα

Ασφάλεια

Σήμερα, η πυρηνική ενέργεια είναι μια από τις ασφαλέστερες μορφές παραγωγής ενέργειας, με δείκτη θνησιμότητας αντίστοιχο αυτού των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας⁵⁰. Η πυρηνική βιομηχανία έφτασε σε αυτόν τον εξαιρετικό βαθμό ασφαλείας κυρίως χάρις των μαθημάτων της από μικρά και μεγάλα ατυχήματα που έθεσαν την ασφάλεια στο επίκεντρο της πυρηνικής βιομηχανίας, με εξελιγμένη και αυστηρή ρύθμιση, καθώς και έμφαση στην ασφάλεια από νωρίς στον σχεδιασμό (Safety by Design).

Για να αδειοδοτηθεί οποιοσδήποτε πυρηνικός σταθμός σήμερα, θα πρέπει αποδεδειγμένα να τηρεί τις τρεις βασικές αρχές πυρηνικής ασφαλείας⁵¹, κατά την κανονική λειτουργία αλλά και σε τυχόν συνθήκες ατυχήματος, για να ελαχιστοποιήσει τον πιθανό κίνδυνο στον άνθρωπο και στο περιβάλλον:

1. έλεγχος της αντιδραστικότητας
2. ψύξη του πυρηνικού καυσίμου
3. συγκράτηση ραδιενεργών υλικών και θωράκιση ακτινοβολίας.

Μια ακόμα βασική αρχή σχεδιασμού των πυρηνικών σταθμών είναι ο **πλεονασμός των συστημάτων άμυνας** (Defense in Depth). Η αποφυγή διαρροής, για παράδειγμα, αποτρέπεται σε περίπτωση ατυχήματος από δεκάδες συστήματα/φραγμούς, το καθένα από τα οποία μπορεί ανεξάρτητα να την εμποδίσει. Ακόμα και το ίδιο το καύσιμο και οι φυσικές του ιδιότητες είναι σχεδιασμένες με σκοπό την ασφάλεια και την **αποφυγή διαρροής σε περιπτώσεις ατυχήματος** (Accident Tolerant Fuel).⁵²

Όσον αφορά τις ΕΠΕΝ, **η πυρηνική ασφάλεια θα πρέπει να συνδυαστεί με τη ναυτική ασφάλεια**. Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει να ακολουθηθούν οι σύγχρονες **μέθοδοι πιθανολογικής εκτίμησης ρίσκου** (Probabilistic Risk Assessment) που θα περιλαμβάνουν τους κινδύνους (hazards) της πυρηνικής αλλά και της ναυτικής λειτουργίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής αποτελεί η μέθοδος ποιοτικής ανάλυσης ρίσκου HAZID (Hazard Identification) που ακολουθείται ήδη από ομάδες ειδικών παγκοσμίως.⁵³ Σε αυτό το κομμάτι, υπάρχει επίσης πολύχρονη εμπειρία από ειδικούς σε συστήματα πυρηνικών πλοίων πολεμικού ναυτικού, οι οποίοι εργάζονται στην εμπορική βιομηχανία και προσφέρουν τα «φώτα τους» σε τέτοιου είδους ασκήσεις.

Από την πλευρά της πυρηνικής ασφαλείας, για να αδειοδοτηθεί μια ΕΠΕΝ, οι τρεις αρχές της πυρηνικής ασφαλείας θα πρέπει να τηρούνται **και σε περιπτώσεις ατυχημάτων, όπως η σύγκρουση και η βύθιση**. Ενθαρρυντικές σε τέτοιες περιπτώσεις είναι οι φυσικές ιδιότητες του νερού, όπου αποτελεί ταυτόχρονα εξαιρετικό μέσο για την ψύξη αλλά και για τη θωράκιση ακτινοβολίας. Παρ' όλα αυτά, το νερό αποτελεί και μέσο επιβράδυνσης νετρονίων, κάτι που μπορεί να αυξήσει την κρισιμότητα του αντιδραστήρα. Σήμερα, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες που σχεδιάζονται για χρήση στις ΕΠΕΝ, πρέπει να μπορούν να μένουν υποκρίσιμοι (δηλαδή η αλυσιδωτή αντίδραση της σχάσης να μην μπορεί να διατηρηθεί από μόνη της) σε περιπτώσεις ατυχήματος ακόμα και υπό την έκθεσή τους σε νερό. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τον κατάλληλο σχεδιασμό του καυσίμου και της γεωμετρίας του - ένα τέτοιο παράδειγμα παρουσιάστηκε πρόσφατα στο συνέδριο της ΙΑΕΑ για τους μικρούς αρθρωτούς αντιδραστήρες (Small Modular Reactors - SMR)⁵⁴.

Όσον αφορά το περιβαλλοντικό ρίσκο, οι ΕΠΕΝ θα πρέπει να σχεδιαστούν ώστε **οι φραγμοί συγκράτησης των ραδιενεργών υλικών**

⁵⁰ Paul Scherrer Institute, Swiss Federal Office of Energy, Severe Accidents in the Energy Sector

⁵¹ International Atomic Energy Agency. Fundamental Safety Principles. IAEA Safety Standards Series No. SF-1, International Atomic Energy Agency, 2006.

https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1273_web.pdf

⁵² U.S. Nuclear Regulatory Commission. NuScale DCA - Chapter 13.6 SE with No Open Items. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2019.

<https://www.nrc.gov/docs/ML1918/ML19182A241.pdf>

⁵³ European Maritime Safety Agency. Potential Use of Nuclear Power for Shipping. EMSA, Apr. 2024.

<https://www.emsa.europa.eu/publications/item/5366-potential-use-of-nuclear-power-for-shipping.html#:~:text=Therefore%2C%20nuclear%20power%20for%20shipping,liability%20and%20also%20insurance%20regime.>

⁵⁴ Kourasis, Ioannis, Jake Miles, and Mamdouh El-Shanawany. "Evaluation of the Molten Salt Reactor Technology for the Application of Floating Nuclear Power Plants." International Conference on Small Modular Reactors and their Applications, 21 Oct. 2024, International Atomic Energy Agency (IAEA).

https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=RVCm8ocAAAAJ&citation_for_view=RVCm8ocAAAAJ:9yKSN-GCB0IC

να παραμένουν λειτουργικοί σε περιπτώσεις σύγκρουσης και βύθισης. Σήμερα, 9 πυρηνικά υποβρύχια βρίσκονται βυθισμένα στη θάλασσα. Από τα ραδιενεργά ισότοπα που μπορούν να διαρρεύσουν, το Cs-137 και το Sr-90 μπορούν να απορροφηθούν από τη θαλάσσια πανίδα. Εξαιτίας της φυσικής διάλυσής (dilution) τους στις τεράστιες ποσότητες νερού της θάλασσας το τελικό ρίσκο για το περιβάλλον και τον άνθρωπο μπορεί να μειωθεί σημαντικά, ανάλογα βέβαια και με το σημείο βύθισης. Για παράδειγμα, ακόμη και σε περίπτωση πλήρους διαρροής του Cs-137 από το βυθισμένο υποβρύχιο K-159 στη Θάλασσα Μπάρεντς, τα επίπεδα ραδιενέργειας στα αλιεύματα θα παραμείνουν εντός των ορίων ασφαλείας για κατανάλωση^{55 56}. Η διάλυση των ισωτόπων στο νερό που μειώνει την επίδρασή τους στο περιβάλλον και στον άνθρωπο εξαρτάται από παράγοντες όπως το βάθος και τα θαλάσσια ρεύματα. **Σε κάθε περίπτωση, για να αδειοδοτηθεί οποιαδήποτε ΕΠΕΝ, θα πρέπει να τηρεί τους αυστηρούς κανονισμούς των ρυθμιστών για την προστασία του περιβάλλοντος.** Για παράδειγμα, ο πλωτός πυρηνικός σταθμός που λειτουργεί σήμερα στη Ρωσία, έχει σχεδιαστεί με πέντε ανεξάρτητους φυσικούς φραγμούς για τα ραδιενεργά υλικά σε περίπτωση ατυχήματος και βύθισης και πέντε ανεξάρτητα επίπεδα ασφαλείας, τηρώντας τα υψηλά στάνταρ ασφαλείας της πυρηνικής βιομηχανίας παγκοσμίως.⁵⁷

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή, η πυρηνική ενέργεια έχει πολύ καλό ιστορικό κατά τη λειτουργία της στη θάλασσα. Ακολουθώντας τις μοντέρνες τεχνικές ανάλυσης ρίσκου, τις οποίες υιοθετεί και η ναυτική βιομηχανία, εξασφαλίζεται η ασφάλεια των ΕΠΕΝ από τον σχεδιασμό τους.



Προστασία

Η προστασία (security) είναι απαραίτητη σε όλες τις πυρηνικές και ναυτικές εγκαταστάσεις. Η προστασία ενός σταθμού έχει πολλές μορφές, όπως η φυσική προστασία (physical security) και η κυβερνοασφάλεια (cybersecurity). Στην πυρηνική βιομηχανία, η στρατηγική και ο σχεδιασμός της προστασίας ξεκινάει από την αναγνώριση των απειλών βάσει σχεδιασμού (design basis threats) και τα προστατευτικά μέτρα λαμβάνονται ώστε να αποτρέψουν, να ανιχνεύσουν και να αντιμετωπίσουν σκόπιμες κακόβουλες ενέργειες (prevent, detect and respond to intentional malicious acts). Κύριο ρόλο σε αυτή τη διαδικασία παίζουν τα κράτη.⁵⁸

⁵⁵ Thorstad, Eva B., et al. *The Salmon Project in Vefsna: A Collaborative Project Between Research and Management*. Report from the Institute of Marine Research, no. 24-2017, Institute of Marine Research, 2017, https://www.hi.no/resources/publikasjoner/rapport-fra-havforskningen/2017/rapport_24-2017_lakseprosjekt_endelig.pdf.

⁵⁶ Nilsen, Thomas. *Ill-Fated Russian Sub Shouldn't Contaminate Fisheries*, Norwegian Researchers Say. Bellona, 6 May 2015, <https://bellona.org/news/nuclear-issues/2015-05-ill-fated-russian-sub-shouldnt-contaminate-fisheries-norwegian-researchers-say>.

⁵⁷ Alekhin, Mikhail. *Overview of the Russian Approach to the Licensing of MMRs*. OECD Nuclear Energy Agency, Multinational Design Evaluation Programme (MDEP) Workshop on Licensing and Waste Management of Small Modular Reactors, 2024, https://www.oecd-nea.org/mdep/events/LWSMMRWS_2024/presentations/S1_MFPU_Alekhin.pdf.

⁵⁸ International Atomic Energy Agency. *Objective and Essential Elements of a State's Nuclear Security Regime*. IAEA Nuclear Security Series No. 20, International Atomic Energy Agency, 2013. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1590_web.pdf

Για τις ΕΠΕΝ, η λίστα των πιθανών απειλών περιέχει απειλές συνδεδεμένες με τη θάλασσα, όπως η **πειρατεία**, η **τρομοκρατική επίθεση** και η **κατασκευή ραδιενεργής βόμβας** (dirty bomb). Τα προστατευτικά μέτρα στις ΕΠΕΝ θα πρέπει είναι προσαρμοσμένα καταλλήλως για αυτές τις διαφορετικές απειλές. Ένα άλλο μέσο αποτροπής τέτοιων απειλών είναι η **επιλογή διαδρομών** και **τοποθεσιών χαμηλότερου ρίσκου**. Οι πλωτοί πυρηνικοί σταθμοί θα μπορέσουν να λειτουργήσουν σε περιοχές όπου η προστασία του κρατικού λιμενικού είναι άμεσα διαθέσιμη, ενώ προβλέπεται ότι τα πυρηνικά πλοία θα λειτουργήσουν αρχικά σε διαδρομές με χαμηλότερο ρίσκο πειρατείας.

Οι σχεδιαστές των νέων τεχνολογιών εφαρμόζουν τη στρατηγική της **προστασίας ενσωματωμένη στον σχεδιασμό** (Security by Design), κάτι που σημαίνει ότι οι τεχνολογίες έχουν μέσα προστασίας ενσωματωμένα στην κατασκευή τους. Πέρα από τους σχεδιαστές, τα εθνικά κράτη είναι αυτά που έχουν τον πρώτο και τελευταίο λόγο για την ανάπτυξη πλάνου προστασίας των πυρηνικών εγκαταστάσεων εντός των συνόρων τους καθώς και για την αναγνώριση των απειλών. Ο ιδιοκτήτης και λειτουργός του σταθμού συνεργάζεται με το κράτος και τις αρμόδιες αρχές για την εφαρμογή του πλάνου προστασίας.

Διασφαλίσεις

Οι **Πυρηνικές Διασφαλίσεις (Nuclear Safeguards)** είναι μια σειρά νομικών συμφωνιών, κανονισμών και δραστηριοτήτων της **ΙΑΕΑ** οι οποίες διασφαλίζουν ότι μια χώρα δεν χρησιμοποιεί το πυρηνικό πρόγραμμά της για την παρασκευή πυρηνικών όπλων.⁵⁹ Για τους πυρηνικούς σταθμούς αυτό πρακτικά σημαίνει τον αυστηρό έλεγχο, παρακολούθηση και μέτρηση των πυρηνικών υλικών του σταθμού από την ΙΑΕΑ, κάτι το οποίο γίνεται με μηχανισμούς όπως οι τακτικές **επιθεωρήσεις** από υπεύθυνους του οργανισμού, οι **σφραγίσεις** (seals) και η **παρακολούθηση** από κάμερες. Σε αντίθεση με την προστασία (security), που αναφέρεται σε απειλές από τρίτους, οι διασφαλίσεις αναφέρονται στις **δράσεις των κρατών** (states), εξασφαλίζοντας ότι προϊόντα της σχάσης, όπως το πλουτώνιο, δεν αφαιρούνται από τον σταθμό για να χρησιμοποιηθούν σε κρατικά προγράμματα άμυνας.

Οι χώρες που υπόκεινται σε αυστηρές διασφαλίσεις είναι αυτές που ανήκουν στη συνθήκη μη-διάδοσης (Non-Proliferation Treaty) και δεν έχουν πυρηνικά όπλα (Non-nuclear Weapon States - NNWS). Τα πυρηνικά κράτη (ΗΠΑ, Ρωσία, Κίνα, Γαλλία, Η.Β. κ.λπ.) δεν υπόκεινται σε αυστηρές διασφαλίσεις καθώς διαθέτουν ήδη πυρηνικό οπλοστάσιο.

Οι ΕΠΕΝ που θα είναι υπό τον έλεγχο κρατών που δεν έχουν πυρηνικά όπλα θα πρέπει να τηρούν τις πυρηνικές διασφαλίσεις. Το κράτος που θα φιλοξενεί ΕΠΕΝ όπως πλωτούς πυρηνικούς σταθμούς στα εθνικά του ύδατα, θα πρέπει να ακολουθεί τους κανονισμούς και τις νομικές συμφωνίες διασφαλίσεων όπως θα έκανε για έναν χερσαίο σταθμό. Ο μελλοντικός τρόπος εφαρμογής των διασφαλίσεων στις ΕΠΕΝ αναπτύσσεται σήμερα από την παγκόσμια κοινότητα μέσω ομάδων εργασίας (working groups) του ΝΕΜΟ, συμπεριλαμβανομένων ειδικών από την ΙΑΕΑ. Τον Μάρτιο του 2025 πραγματοποιήθηκε το πρώτο συνέδριο του ΝΕΜΟ και της ΙΑΕΑ για τη διασφάλιση των ΕΠΕΝ, παρουσία του Deputy Director General Massimo Aparo⁶⁰.

Πυρηνικά Απόβλητα

Η διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων εν γένει είναι ένα κρίσιμο και πολύπλοκο στάδιο του κύκλου των πυρηνικών καυσίμων. Οι διεθνείς ρυθμιστικές αρχές ελέγχουν αυστηρά κάθε στάδιο –από τη μεταφορά και τον προσωρινή αποθήκευση ως τη μόνιμη γεωλογική εναπόθεση– με συνεχείς επιθεωρήσεις και περιβαλλοντικές μετρήσεις. Όπως είχε πει ο Ναύαρχος Ρίκοβερ, πατέρας της πυρηνικής τεχνολογίας, **“Να παίρνετε υπόψη σας ακόμα και τα χαμηλά ποσά ραδιενέργειας”**. Σύμφωνα με έκθεση του National Research Council, μέχρι σήμερα δεν έχει υπάρξει καμία βλάβη στην υγεία από το περιεχόμενο των πακέτων μεταφοράς ή αποθήκευσης χρησιμοποιημένου καυσίμου – ένα ρεκόρ ανώτερο οποιασδήποτε άλλης κατηγορίας επικίνδυνου φορτίου.⁶¹

⁵⁹ **Greek Atomic Energy Commission (EEAE).** *Nuclear Safeguards*. EEAE, <https://eeae.gr/πυρηνική-ασφάλεια/πυρηνικές-διασφαλίσεις-safeguards>

⁶⁰ **Nuclear Energy Maritime Organization (NEMO) and International Atomic Energy Agency (IAEA).** *Safeguards by Design Workshop*. 18–19 Mar. 2025, London, United Kingdom.

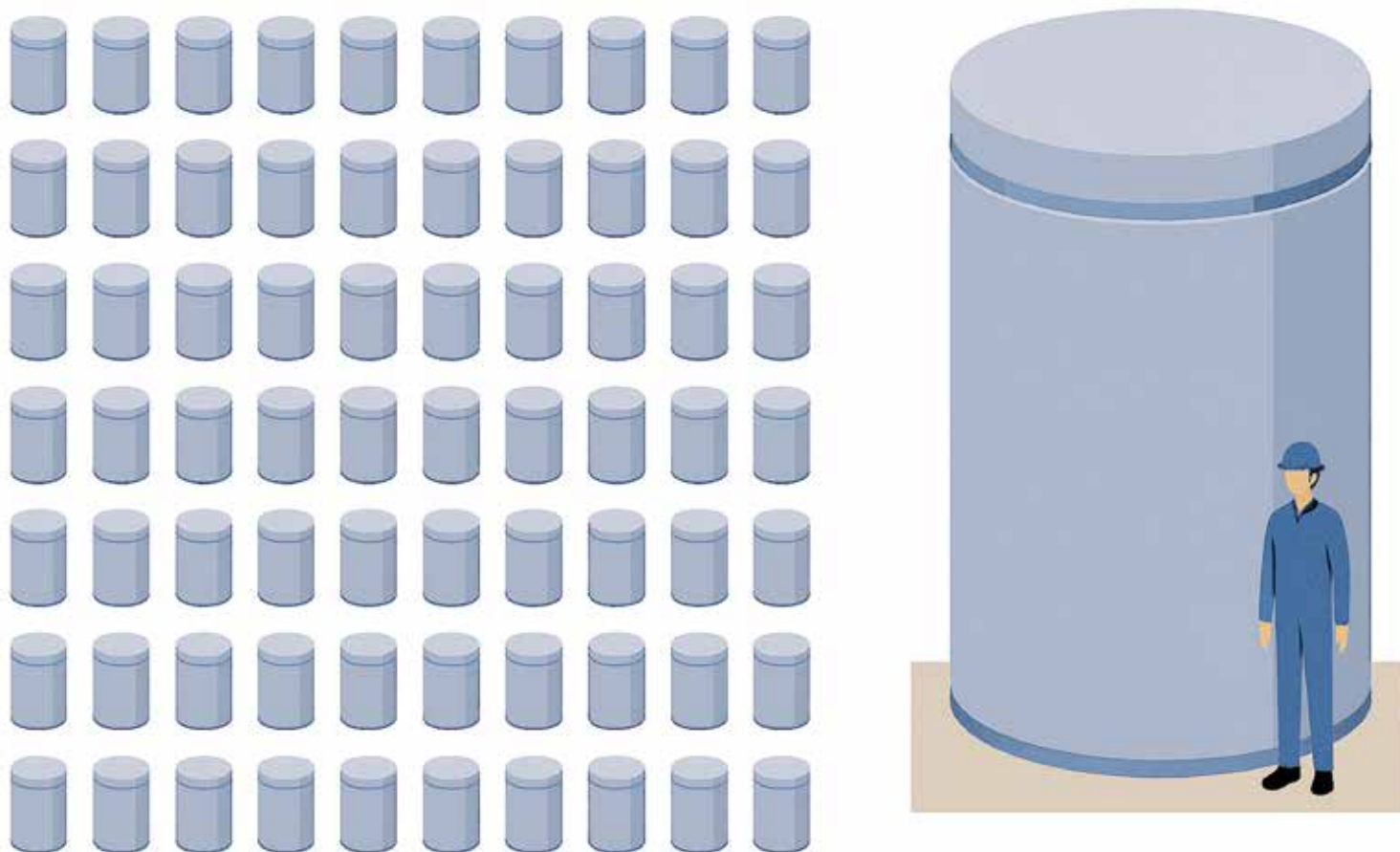
⁶¹ **National Research Council.** *Safety and Security of Commercial Spent Nuclear Fuel Storage: Public Report*. The National Academies Press, 2006 <https://nap.nationalacademies.org/read/11320/chapter/13>

Το ετήσιο χρησιμοποιημένο πυρηνικό καύσιμο των ΗΠΑ έχει συνολικό όγκο όσο μισή πισίνα ολυμπιακών διαστάσεων και κατά τη χρήση του ηλεκτροδότησε 70 εκατομμύρια νοικοκυριά. Η παραγωγή ίσης ενέργειας με χρήση ορυκτών καυσίμων **θα είχε εκπομπές 400 εκατομμυρίων τόνων διοξειδίου του άνθρακα**. Στην Εικόνα 10 βλέπουμε μια απεικόνιση της αποθήκευσης ολόκληρου του χρησιμοποιημένου πυρηνικού καυσίμου ενός πυρηνικού σταθμού στις ΗΠΑ ο οποίος παρήγαγε 5 TWh τον χρόνο για 25 χρόνια. Αυτή η ενέργεια είναι αρκετή για να καλύψει **πάνω από 8 χρόνια ολόκληρης της ηλεκτρικής κατανάλωσης του πληθυσμού της Αθήνας**.⁶²

Χάρη στην υψηλή εσωτερική θωράκισή τους, η ραδιενέργεια μόλις 10m από αυτά είναι στα επίπεδα ραδιενέργειας του φυσικού περιβάλλοντος.⁶³

Εικόνα 10:

Απεικόνιση: Αποθήκες Χρησιμοποιημένου Πυρηνικού Καυσίμου, ΗΠΑ.



Παγκοσμίως, περίπου 15 εκατομμύρια φορτία με ραδιενεργό υλικό μεταφέρονται κάθε χρόνο, σε αποστάσεις πολλών εκατομμυρίων χιλιομέτρων, χωρίς μία περίπτωση βλάβης στην υγεία ή στο περιβάλλον από ραδιενέργεια.⁶⁴

⁶² $2.600.000 \text{ κάτοικοι} \times 4.700 \text{ kWh/κάτοικο/έτος} = 12.220.000.000 \text{ kWh/έτος} \approx 12,22 \text{ TWh/έτος}$, enerdata.net

⁶³ **Ingersoll, Daniel T., et al.** Integrated Safety Assessment Methodology (ISAM) for Generation IV Nuclear Systems. Oak Ridge National Laboratory, July 2004. U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, <https://www.osti.gov/servlets/purl/1525310>

⁶⁴ **International Atomic Energy Agency.** "Transporting Radioactive Materials." IAEA, <https://www.iaea.org/topics/transporting-radioactive-materials>

Η Θέση της Ελλάδας

Πυρηνική Ενέργεια και Εθνική Ενεργειακή Στρατηγική

Μέσα σε έναν κόσμο που αλλάζει δραματικά, η Ελλάδα καλείται να προστατεύσει τα ζωτικά της συμφέροντα στον τομέα της ναυτικής βιομηχανίας, υιοθετώντας ένα **σύγχρονο εθνικό νομικό πλαίσιο** που θα απαντά στις προκλήσεις που θέτει η χρήση των νέων πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της πυρηνικής ενέργειας, ενώ παράλληλα καλείται να παίξει καθοριστικό ρόλο στη **διαμόρφωση των νέων κανόνων παγκοσμίως για τη ρύθμισή τους**.

Η ενσωμάτωση της πυρηνικής ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας προϋποθέτει ορισμένα θεμελιώδη βήματα. Αυτά περιλαμβάνουν την **ενημέρωση της κοινής γνώμης και των διαμορφωτών πολιτικής**, την ανάπτυξη ενός **στρατηγικού σχεδίου** που θα καθορίζει τις χρήσεις της πυρηνικής ενέργειας, τις τοποθεσίες και τις κατάλληλες τεχνολογίες, τη διαμόρφωση ενός σαφούς **ρυθμιστικού πλαισίου** που θα συμπεριλαμβάνει τις εφαρμογές στη στεριά και τη θάλασσα και την προετοιμασία του **εργατικού δυναμικού**. Αυτές οι ενέργειες θα πρέπει να είναι μέρος ενός ολοκληρωμένου **Εθνικού Προγράμματος Πυρηνικής Ενέργειας**, το οποίο μπορεί να αναπτυχθεί με βάση τις ήδη υπάρχουσες και εφαρμόσιμες οδηγίες της ΙΑΕΑ.

Η επιτυχής ενσωμάτωση της πυρηνικής ενέργειας στο ελληνικό ενεργειακό μείγμα απαιτεί πρωτίστως την υποστήριξη τόσο της κοινωνίας όσο και της πολιτικής ηγεσίας. Είναι κρίσιμο να ξεκινήσουν οργανωμένες εκπαιδευτικές εκστρατείες, ώστε οι πολίτες να ενημερωθούν επαρκώς και να συμμετέχουν ενεργά στη λήψη αποφάσεων για ζητήματα που αφορούν την ασφάλεια, τα περιβαλλοντικά οφέλη και τις οικονομικές προοπτικές που προσφέρει η πυρηνική ενέργεια στη στεριά και τη θάλασσα. Παράλληλα, είναι ζωτικής σημασίας η διαμόρφωση μιας ευρείας πολιτικής συναίνεσης, η οποία θα διασφαλίσει τη σταθερότητα και τη συνέχεια ενός τέτοιου εγχειρήματος.

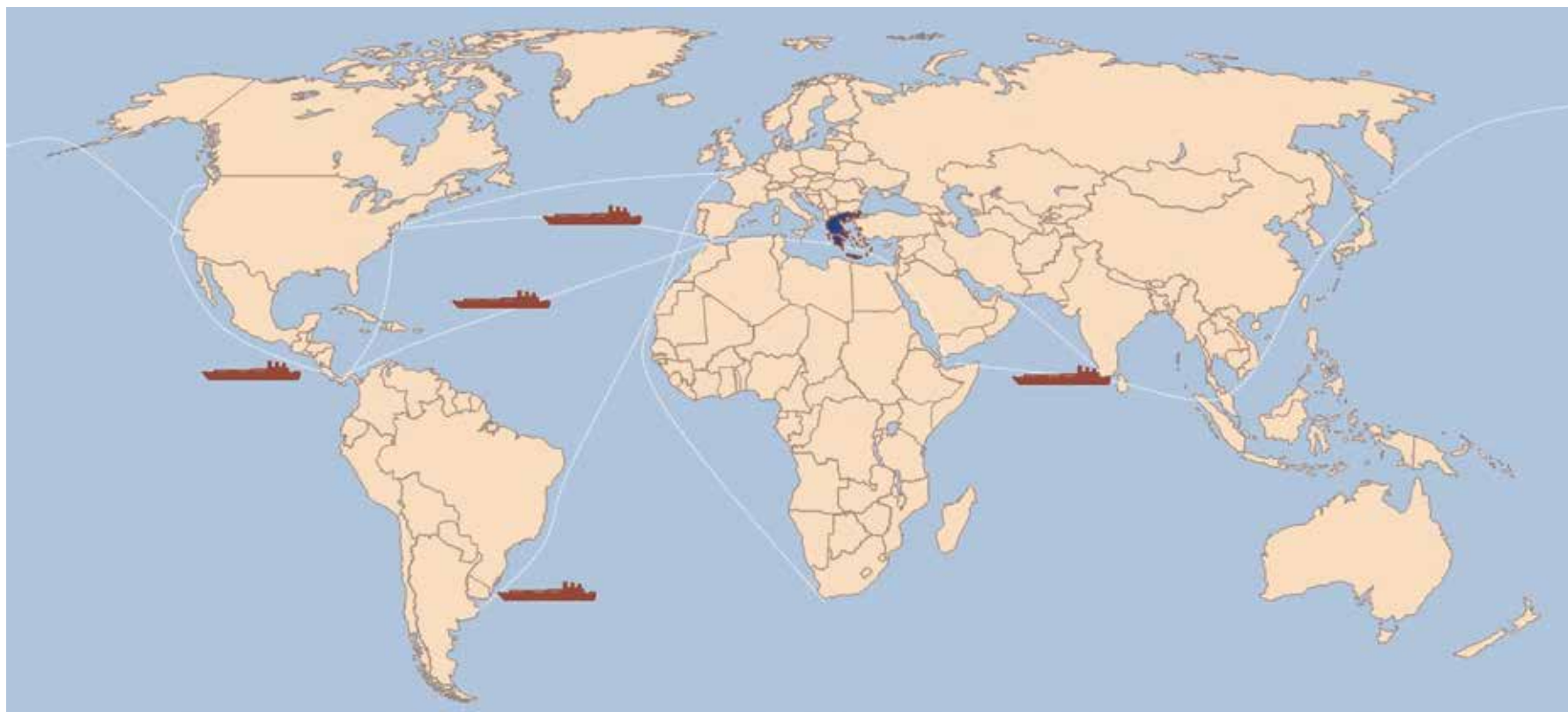
Ταυτόχρονα, απαιτείται η δημιουργία ενός ισχυρού **πολιτικού και ρυθμιστικού πλαισίου**. Για την Ελλάδα, το πολιτικό σκέλος πιθανότατα θα ενσωματωθεί στο **Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ)**, το οποίο καθορίζει τους μακροπρόθεσμους στόχους της χώρας για την ενέργεια και την κλιματική πολιτική.

Σύμφωνα με το προεδρικό διάταγμα 67/2022, η **Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ)**, η οποία ουσιαστικά επανιδρύθηκε με τον νόμο 1733/1987, υπάγεται στον υπουργό ανάπτυξης και επενδύσεων και αποτελεί τη ρυθμιστική αρχή που είναι υπεύθυνη, μεταξύ άλλων, για τον έλεγχο, τη ρύθμιση και την εποπτεία του τομέα της πυρηνικής ενέργειας, της πυρηνικής τεχνολογίας και των εφαρμογών της. Στα πλαίσια αυτά, **είναι απαραίτητη η περαιτέρω θεσμική εμπάθυνση και εξειδίκευση των αρμοδιοτήτων της υφιστάμενης ΕΕΑΕ και η ενίσχυσή της σε τεχνογνωσία και προσωπικό** ακολουθώντας τα πρότυπα της NRC ή των αντίστοιχων ευρωπαϊκών αρχών, με σκοπό τη μελλοντική διαχείριση της αδειοδότησης, την εποπτεία της ανάπτυξης, την αποτελεσματική επίπτευση της λειτουργίας των πυρηνικών σταθμών και τη στήριξη του ευρύτερου τομέα της πυρηνικής ενέργειας στη στεριά και τη θάλασσα.

Ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας είναι **η εκπαίδευση και η ανάπτυξη του εξειδικευμένου εργατικού δυναμικού**. Η χώρα μας κατέχει την εμπειρία επιτυχημένης λειτουργίας και απόσυρσης του ερευνητικού αντιδραστήρα του **ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος**, καθώς και τη λειτουργία υποκρίσιμης στήλης γραφίτη στον **Τομέα Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ**.

Αυτά τα δύο ερευνητικά κέντρα πυρηνικής ενέργειας στη χώρα μας θα πρέπει να ενισχυθούν ώστε να μπορούν να αντεπεξέλθουν καταλλήλως στην εκπαίδευση των μελλοντικών πυρηνικών μηχανικών, τεχνικών και χειριστών. Η **εκπαίδευση του εμπορικού ναυτικού** θα πρέπει επίσης να περιλαμβάνει μια βασική εισαγωγή στις αρχές της πυρηνικής ενέργειας, ώστε οι ναυτικοί μας να μπορούν να υπηρετήσουν στις ΕΠΕΝ (αν και όπως συζητήσαμε ο χειρισμός των αντιδραστήρων θα γίνεται από ειδικά εκπαιδευμένους χειριστές που δεν θα είναι απαραίτητα ναυτικό προσωπικό).

Η ισχύς της ελληνικής ναυτιλίας και ο πρωταγωνιστικός ρόλος της χώρας μας βασίζονται στον άνθρωπο και στη ναυτική τεχνογνωσία μας. Ο στόχος πρέπει να είναι η προσέλκυση νέου ανθρώπινου δυναμικού και η παροχή των απαραίτητων τεχνικών γνώσεων, εφοδίων και δεξιοτήτων στους Έλληνες ναυτικούς. Αυτό περιλαμβάνει και την ικανότητά τους να αξιοποιούν αποτελεσματικά σύγχρονες τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένης της πυρηνικής τεχνολογίας.



Ο Ρόλος της Ελλάδας σε ένα Ταχέως Μεταβαλλόμενο Διεθνές Περιβάλλον

Η πυρηνική ενέργεια κερδίζει έδαφος παγκοσμίως. Μόνο το πρώτο εξάμηνο του 2025, ευρωπαϊκές χώρες όπως **το Βέλγιο, η Γερμανία και η Δανία**, παραδοσιακά αρνητικές ως προς την πυρηνική ενέργεια, έδειξαν προθέσεις αναθεώρησης της ενεργειακής τους πολιτικής. Ο προσφάτως εκλεγμένος **γερμανός Καγκελάριος Φρίντριχ Μερτς σε κοινό του άρθρο⁶⁵ με τον Εμανουέλ Μακρόν** αποκάλυψε την πρόθεσή του για μια ιστορική στροφή στην ενεργειακή πολιτική της Γερμανίας με βάση την αρχή της τεχνολογικής ουδετερότητας, έτσι ώστε η Γερμανία και η Ευρώπη να ανακτήσουν μέρος της ανταγωνιστικότητας και της ενεργειακής κυριαρχίας τους. Στις αρχές του μήνα Μαΐου 2025, **το ομοσπονδιακό κοινοβούλιο του Βελγίου** ψήφισε την κατάργηση του νόμου του 2003 για τη σταδιακή απεμπλοκή από την πυρηνική ενέργεια, ενώ την ίδια στιγμή **το κοινοβούλιο της Δανίας** ενέκρινε την εκπόνηση μελέτης για την ενδεχόμενη χρήση της πυρηνικής ενέργειας, η οποία ήταν απαγορευμένη τα τελευταία 40 χρόνια. **Στις ΗΠΑ, η νέα αμερικανική διοίκηση υπό τον πρόεδρο Τραμπ** δήλωσε με εκκωφαντικό τρόπο την πρόθεσή της να προχωρήσει στον τριπλασιασμό της πυρηνικής ισχύος των ΗΠΑ από τα 100 GW στα 400 GW υπογράφοντας **τέσσερα εκτελεστικά διατάγματα⁶⁶** στο τέλος του μήνα Μαΐου 2025. Η στροφή της Δύσης προς την πυρηνική ενέργεια έρχεται στον απόηχο της σύγκρουσης με τη Ρωσία αλλά και της συνειδητοποίησης ότι ο ανταγωνισμός στις νέες ενεργοβόρες τεχνολογίες, όπως η Τεχνητή Νοημοσύνη και τα Κέντρα Δεδομένων, είναι πολύ πιθανόν να κριθεί στο πεδίο της εξασφάλισης άφθονης, φθηνής ενέργειας σε βάθος χρόνου.

⁶⁵ **Macron, Emmanuel, and Friedrich Merz.** "A Franco-German 'Reset' for Europe." Le Figaro, 7 May 2025, <https://www.lefigaro.fr/en/a-franco-german-reset-for-europe-20250507>

⁶⁶ Executive Orders of the President of the USA, May 23rd 2025: REINVIGORATING THE NUCLEAR INDUSTRIAL BASE

<https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/05/reinvigorating-the-nuclear-industrial-base/>

REFORMING NUCLEAR REACTOR TESTING AT THE DEPARTMENT OF ENERGY

<https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/05/reforming-nuclear-reactor-testing-at-the-department-of-energy/>

ORDERING THE REFORM OF THE NUCLEAR REGULATORY COMMISSION

<https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/05/ordering-the-reform-of-the-nuclear-regulatory-commission/>

DEPLOYING ADVANCED NUCLEAR REACTOR TECHNOLOGIES FOR NATIONAL SECURITY

<https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/05/deploying-advanced-nuclear-reactor-technologies-for-national-security/>

Στον χώρο της ναυτιλίας, τον Απρίλιο του 2025, ο IMO έκανε ένα σημαντικό βήμα εγκρίνοντας σχέδιο κανονισμών που θεσπίζει το **Πλαίσιο Μηδενικών Εκπομπών (Net-Zero Framework)**⁶⁷, ένα νομικά δεσμευτικό σύστημα που συνδυάζει **υποχρεωτικά όρια εκπομπών** και **κοστολόγηση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου** στον παγκόσμιο ναυτιλιακό τομέα. Τα μέτρα, που περιλαμβάνουν **παγκόσμια πρότυπα ναυτιλιακών καυσίμων** και έναν **μηχανισμό τιμολόγησης των εκπομπών**, θα αφορούν μεγάλα πλοία χωρητικότητας άνω των 5K gt, που ευθύνονται για το 85% των εκπομπών CO₂. Το πλαίσιο αναμένεται να υιοθετηθεί επίσημα τον Οκτώβριο του 2025 και να τεθεί σε ισχύ το 2027, εισάγοντας στόχους έντασης καυσίμου και ένα σύστημα **μονάδων συμμόρφωσης και οικονομικών κινήτρων** για την επιβράβευση πλοίων χαμηλών εκπομπών.

Παρ' όλη την έμπρακτη δέσμευση του IMO, ο οργανισμός και οι εθνικές ευρωπαϊκές πυρηνικές ρυθμιστικές αρχές δεν έχουν ακόμη συνδιαμορφώσει ένα ενιαίο πλαίσιο αδειοδότησης για τα πυρηνοκίνητα πλοία. Νέες πρωτοβουλίες, όπως ο **NEMO** και το **πρόγραμμα ATLAS της ΙΑΕΑ**, στοχεύουν στη διαμόρφωση ενός εναρμονισμένου ρυθμιστικού πλαισίου. Η **Ελλάδα, λόγω του ρόλου της στον IMO και του ουσιαστικά διαμεσολαβητικού της ρόλου ανάμεσα στον IMO και την Ε.Ε. όσον αφορά την απανθρακοποίηση**, θα μπορούσε να παίξει **πρωταγωνιστικό ρόλο** σε αυτές τις διαπραγματεύσεις συμπεριλαμβανομένων των **διαπραγματεύσεων για την πυρηνική ναυτιλία**, θέτοντας το πλαίσιο που πρέπει να κινηθεί μια τέτοια συζήτηση στην αρμόδια **Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC)**. Το ρυθμιστικό πλαίσιο των ελληνικών λιμένων θα πρέπει επίσης να προσαρμοστεί για την εξυπηρέτηση των πυρηνικών εμπορικών πλοίων, με τον ίδιο τρόπο που θα πρέπει να προσαρμοστεί σε όλες τις μορφές νέων καυσίμων. Τα πυρηνικά πλοία δεν είναι κάτι καινούργιο για τα ελληνικά ύδατα, αν ληφθούν υπόψη τα αμερικανικά πυρηνικά αεροπλανοφόρα που βρίσκονται στη χώρα μας συχνά.

Παράλληλα, η ευτυχής συγκυρία του πρόσφατου ορισμού ενός Έλληνα ως επιτρόπου της Ε.Ε. για τις Βιώσιμες Μεταφορές και τον Τουρισμό, υπεύθυνου για την ανάπτυξη της βιομηχανικής ναυτιλιακής στρατηγικής και της στρατηγικής για τα λιμάνια της Ε.Ε., δημιουργεί για την Ελλάδα ένα ιδιαίτερα ευνοϊκό πλαίσιο **ώστε να προωθήσει την διαμόρφωση ενός ευρωπαϊκού πλαισίου για την απρόσκοπτη υποδοχή των πυρηνοκίνητων πλοίων στα λιμάνια της ΕΕ αλλά και της χρήσης των πλωτών πυρηνικών αντιδραστήρων** για την παροχή καθαρής ενέργειας τουλάχιστον στους λιμένες-υποδοχείς κρουαζιερόπλοιων. Θυμίζουμε εδώ ότι η **κατανάλωση σε ενέργεια κάθε κρουαζιερόπλοιου που πλένει σε λιμάνι ισοδυναμεί με μία μικρή πόλη** και αυτή η ενέργεια ως επί το πλείστον παρέχεται από τις μηχανές των κρουαζιερόπλοιων επιβαρύνοντας το περιβάλλον των λιμένων. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή απαιτεί **μείωση ρύπων**⁶⁸ κατά 31% μέχρι το 2040 και 80% μέχρι το 2050 για τα πλοία άνω των 5.000 gt που προσεγγίζουν ευρωπαϊκούς λιμένες, καθώς και την υποχρεωτική παροχή ενέργειας από την ξηρά (**onshore power supply**) ή τη χρησιμοποίηση εναλλακτικών τεχνολογιών μηδενικών εκπομπών από την 1η Ιανουαρίου του 2030. Δύο από τους λιμένες που οδεύουν προς **απανθρακοποίηση είναι οι λιμένες του Πειραιά και του Ηρακλείου Κρήτης**, όπου τα αντίστοιχα έργα παροχής καθαρότερης ηλεκτρικής ενέργειας από την ξηρά έχουν ήδη χρηματοδοτηθεί.

Μια τέτοια πολιτική είναι σε απόλυτη σύμπτωση με την πρόσφατη **«Συμφωνία για Καθαρή Βιομηχανία» (Clean Industrial Deal)**⁶⁹ της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, με την οποία, για πρώτη φορά, η Ε.Ε. επιχειρεί να ενισχύσει και να επιταχύνει τις διαδικασίες αδειοδότησης και έγκρισης των SMRs, να κινητοποιήσει ιδιωτικά κεφάλαια για την πυρηνική ενέργεια και να εκσυγχρονίσει τα ρυθμιστικά πλαίσια ώστε να διευκολύνει τις επενδύσεις στις πυρηνικές τεχνολογίες, διασφαλίζοντας μια ανθεκτική και ανταγωνιστική ευρωπαϊκή πυρηνική βιομηχανία.

Αυτές οι πρωτοβουλίες της Ε.Ε. για τον σχεδιασμό μιας νέας βιομηχανικής πολιτικής δεν λαμβάνουν μέρος εν κενώ. Ο δασμολογικός πόλεμος εκ μέρους των ΗΠΑ, ο οποίος στρέφεται προς το παρόν εναντίον κυρίως της Κίνας, αναμένεται να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στο παγκόσμιο εμπόριο αλλά δημιουργεί και ευκαιρίες για τις χώρες της Δύσης. **Ένας από τους βιομηχανικούς κλάδους που εκτιμάται ότι θα ενισχυθεί στη Δύση τα αμέσως επόμενα χρόνια είναι ο ναυπηγικός κλάδος.**

⁶⁷ **International Maritime Organization.** "IMO Approves Net-Zero Regulations." IMO, 24 May 2024, <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/IMO-approves-netzero-regulations.aspx>.

⁶⁸ **European Commission.** *Decarbonising Maritime Transport – FuelEU Maritime*. European Union, 2023, https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/maritime/decarbonising-maritime-transport-fueleu-maritime_en

⁶⁹ **European Commission,** "Clean Industrial Deal." European Commission, 26 Feb. 2025, https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/clean-industrial-deal_en

Το πρόσφατο εκτελεστικό διάταγμα σχετικά με την “Αποκατάσταση της Ναυτιλιακής Υπεροχής” των ΗΠΑ⁷⁰ καθώς και ο “Νόμος για τη Ναυπηγική Βιομηχανία και τις Υποδομές Λιμένων υπέρ της Ευημερίας και της Ασφάλειας της Αμερικής”⁷¹ που εισήχθη προς ψήφιση στο Κογκρέσο από την προηγούμενη αμερικανική διοίκηση έχουν ως στόχο την ανασυγκρότηση της εμπορικής ναυπηγικής ικανότητας των Ηνωμένων Πολιτειών και την ενίσχυση του ναυτιλιακού εργατικού δυναμικού. Η παράλληλη εκπεφρασμένη θέληση για επιβολή δασμών σε πλοία που ναυπηγήθηκαν στην Κίνα (64% των νέων πλοίων ναυπηγήθηκαν στην Κίνα, 2023) κάθε φορά που δένουν σε λιμάνι των ΗΠΑ δείχνει την ξεκάθαρη βούληση των ΗΠΑ όχι μόνο να ενισχύσουν την αμερικανικών συμφερόντων ναυπηγική βιομηχανία αλλά και να αποτρέψουν τους συμμάχους των ΗΠΑ να κατασκευάζουν πλοία στα κινεζικά ναυπηγεία. Είναι χαρακτηριστικό ότι το 77% των νέων παραγγελιών σε tankers, 73% παραγγελιών σε bulkers και 75% παραγγελιών σε containerhips έχουν δοθεί σε ναυπηγεία της Κίνας (2024)⁷².

Η πολιτική των ΗΠΑ δεν έχει μόνο οικονομικά κίνητρα αλλά και κίνητρα ασφάλειας, καθώς η χρήση της πυρηνικής πρόωσης στη ναυσιπλοΐα και η κατασκευή πυρηνικών αντιδραστήρων σε ναυπηγικά περιβάλλοντα που κερδίζει έδαφος διεθνώς (λόγω της δραστηκής μείωσης του κόστους και του χρόνου κατασκευής) αποτελούν μέρος της δυτικής τεχνογνωσίας που δεν μπορεί να εξαχθεί και πρέπει να παραμείνει αυστηρά στα πλαίσια των δυτικών χωρών. Έτσι, η τιτάνια προσπάθεια “επαναπατρισμού” της ναυπηγικής βιομηχανίας εκ μέρους των ΗΠΑ, αναμένεται να ενισχύσει περιφερειακές δυτικές χώρες που έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ασφάλειας και μπορούν να αναλάβουν μέρος της πυρηνικής βιομηχανικής αλυσίδας παραγωγής.



⁷⁰ RESTORING AMERICA'S MARITIME DOMINANCE, Executive Order of the President of the USA, April 9th 2025

<https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/04/restoring-americas-maritime-dominance/>

⁷¹ U.S. House of Representatives. H.R.10493 – Nuclear Industrial Reinvigoration Act of 2024. 118th Congress, 2nd Session, introduced 12 April 2024. Congress.gov, <https://www.congress.gov/bill/118th-congress/house-bill/10493/text>

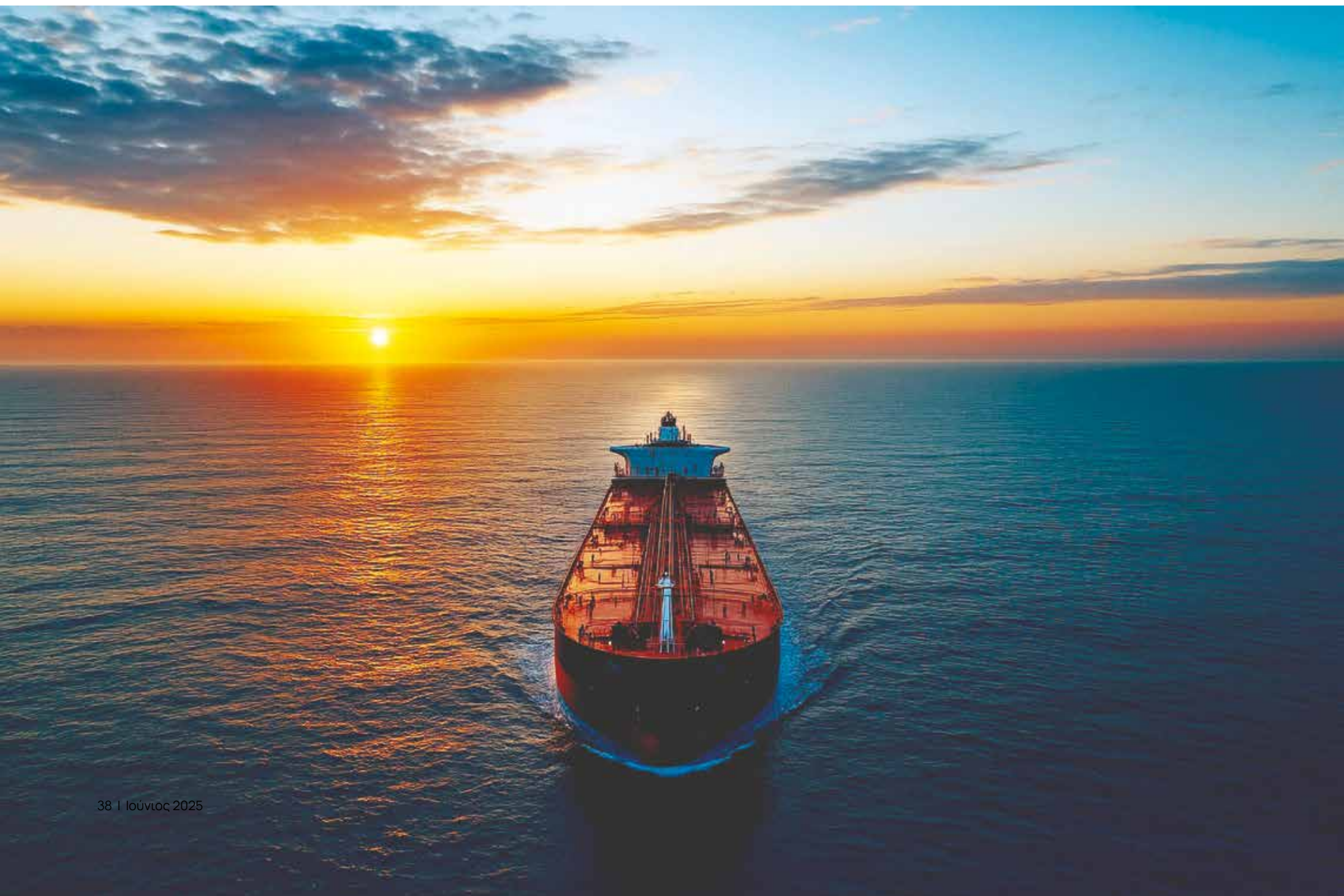
⁷² S. Hatzigrigoris, The future of shipbuilding will be shaped by greek technology, automation and digitalization, Ναυτικά Χρονικά, Μάρτιος 2025, σελίδες 144-146.

Η αναμενόμενη διάχυση της ναυπηγικής δραστηριότητας από την Κίνα στις ΗΠΑ και σε άλλες χώρες της Δύσης αφορά και την Ελλάδα. Αν και η χώρα μας πέρασε μια δεκαπενταετή περίοδο όπου η ναυπηγική δραστηριότητα έβαινε μειούμενη (το 2000 εισήχθησαν 1.575 πλοία για επισκευή, ενώ το 2013 μόλις 339, σύμφωνα με τα στοιχεία της ΕΛΣΤΑΤ όπως παρουσιάστηκαν στα Ναυτικά Χρονικά⁷³), η τάση αναστράφηκε μέσα στην κρίση με περίπου 651 πλοία να εισάγονται προς επισκευή το 2023. Αντίστοιχη άνοδο μπορούμε να δούμε όχι μόνο στον αριθμό αλλά και στη χωρητικότητα των πλοίων που επισκευάστηκαν συνολικά στα ελληνικά ναυπηγεία, αφού από 16 εκατ. grt (gross register tonnage) στις αρχές της δεκαετίας του 2000, η χωρητικότητα μειώθηκε κατά 75% στα 4 εκατ. grt το 2016 και επανέκαμψε τα αμέσως επόμενα χρόνια γύρω στα 8 εκατ. grt. Αυτή η ανάκαμψη συμπίπτει χρονικά με τις παραπάνω γεωπολιτικές εξελίξεις και τον διακηρυγμένο, στόχο της εγχώριας ναυπηγικής βιομηχανίας⁷⁴ να γίνει ηγέτιδα δύναμη στην κατασκευή πλωτών και υπεράκτιων ενεργειακών λύσεων, **κάτι που μπορεί να περιλαμβάνει και τη συμμετοχή της στην παγκόσμια πυρηνική εφοδιαστική αλυσίδα.**

Η πυρηνική ενέργεια αναδεικνύεται ως ένας βιώσιμος δρόμος για τη μετάβαση της ναυτικής βιομηχανίας σε καθαρή και υψηλής απόδοσης πρόωση. Οι πλωτοί πυρηνικοί σταθμοί και τα πυρηνοκίνητα εμπορικά πλοία κερδίζουν συνεχώς έδαφος ως πρακτικές λύσεις για την απανθρακοποίηση και την ενεργειακή ασφάλεια. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις που σχετίζονται με τη ρύθμιση, τη διαθεσιμότητα καυσίμου και την κοινωνική αποδοχή. **Η επιτυχής υλοποίηση αυτών των τεχνολογιών θα απαιτήσει στενή συνεργασία μεταξύ κυβερνήσεων, βιομηχανικών φορέων και διεθνών οργανισμών. Η Ελλάδα μπορεί και πρέπει να παίξει ηγετικό ρόλο στη διαμόρφωση αυτού του νέου διεθνούς πλαισίου.**

⁷³ M. Charitos, Greek shipyards: From decline to revival, Ναυτικά Χρονικά, Μάρτιος 2025, σελίδες 102-104.

⁷⁴ Συνεντεύξεις των Μ. Βαρβιτσιώτη, Π. Ξενοκώστα, Α. Βαγιομή, Ναυτικά Χρονικά, Μάρτιος 2025, σελίδες 107-125.



δεον, το [δέον]

το πρέπον, το σωστό, αυτό που πρέπει, που αξίζει

“μᾶλλον τοῦ δέοντος”, Xenophon,
Memorabilia, 4.3.8

“παρόντων τὰ δέοντα μάλιστ’ εἶπεῖν”,
Thucydides, *The Peloponnesian War*, 1.22

“Πρὸ τοῦ δέοντος”, before it be needful,
Sophocles, *Philoctetes*, 891

“ἐν δέοντι”, in good time, Euripides,
Medea, 1277

Το Deon Policy Institute είναι το πρώτο και μοναδικό υπερκομματικό think tank της Ελληνικής Διασποράς. Η αποστολή του είναι να οργανώσει και να μετασχηματίσει τη Διασπορά σε καταλύτη για την πρόοδο και την ευημερία της Ελλάδας.

Το Deon Policy Institute συνιδρύθηκε από νέους Έλληνες του εξωτερικού, οι οποίοι διέκριναν την ευκαιρία να γεφυρώσουν το χάσμα μεταξύ της Ελληνικής Διασποράς και των Ελλήνων υπευθύνων χάραξης πολιτικής. Το δίκτυό του αποτελείται από ειδικούς της διασποράς, ακαδημαϊκούς και έμπειρους επαγγελματίες, οι οποίοι αναπτύσσουν τεκμηριωμένες πολιτικές, αξιοποιώντας τη γνώση και τις βέλτιστες πρακτικές του εξωτερικού.

Η ιστορία μας

Η οικονομική κρίση στην Ελλάδα είχε καταστροφικές κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες, οδηγώντας 500.000 ανθρώπους να μεταναστεύσουν αναζητώντας καλύτερες ευκαιρίες.

Η διασπορά, ωστόσο, διατηρεί έναν ισχυρό δεσμό με τη χώρα – έναν δεσμό ουσιαστικό.

Έτσι, ενώ πολλοί βλέπουν μια Ελλάδα που χάνει ταλέντο προς άλλες χώρες, εμείς είδαμε μια ευκαιρία: Να οργανώσουμε και να μετασχηματίσουμε την Ελληνική Διασπορά σε καταλύτη για την πρόοδο και την ευημερία της Ελλάδας.

Το Deon Policy Institute ιδρύθηκε από μια ομάδα Ελλήνων ακαδημαϊκών, επιχειρηματιών και νέων επαγγελματιών που ήθελαν να αξιοποιήσουν την τεχνογνωσία τους για να στηρίξουν την Ελλάδα στην πορεία ανάκαμψης και εκσυγχρονισμού της.

Το Ινστιτούτο επιδιώκει να καλλιεργήσει ένα αίσθημα ενότητας και κοινής αποστολής ανάμεσα σε όλους τους Έλληνες της διασποράς.

Σας προσκαλούμε να συμμετάσχετε σε αυτή την προσπάθεια.



Empowering Progress and Prosperity for Greece

www.deonpolicy.org



©2025 Deon Policy Institute. All rights reserved.