

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Το χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα, η αποδοτικότητα αλλά και οι τεχνολογικές πρόοδοι που αυξάνουν τα επίπεδα ασφαλείας καθιστούν ελκυστική αυτή τη μορφή ενέργειας. Φυσικά, από την εξίσωση δεν λείπουν και γεωπολιτικοί παράγοντες - Ο ρόλος των μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων στο μέλλον

Του Αλκη Γαλδαδά
algaldadas@yahoo.gr

Η πυρηνική ενέργεια έρχεται και πάλι στο προσκήνιο, όχι μόνο εξαιτίας του ενδιαφέροντος του αμερικανού προέδρου **Ντόναλντ Τραμπ** για τον μεγαλύτερο επί ευρωπαϊκού εδάφους πυρηνικό σταθμό της Ζαποριζία (στην Ουκρανία, υπό τον έλεγχο της Ρωσίας). Οι τεχνολογικοί κολοσσοί Amazon, Google και Meta ανακοίνωσαν πρόσφατα σχέδια για τη χρήση μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMRs) σε κέντρα δεδομένων, ενώ η Microsoft υπέγραψε 20ετές συμβόλαιο αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας με εταιρεία που αναμένεται να επαναλειτουργήσει υπάρχοντα αντιδραστήρα. Και τόσο ο ΟΗΕ όσο και η ΕΕ εντάσσουν την πυρηνική ενέργεια στις πράσινες μορφές ενέργειας. Παρατηρείται λοιπόν μια γενικευμένη στροφή προς αυτή τη μορφή ενέργειας η οποία έχει καταγραφεί στο συλλογικό υποσυνείδητο ως επικίνδυνη.

Είναι άραγε παρεξηγημένη η πυρηνική ενέργεια; Ζητήσαμε τη βοήθεια του **Γιώργου Λάσκαρη**, ο οποίος είναι πυρηνικός φυσικός και πρόεδρος της δεξαμενής σκέψης Deon Policy Institute (Ινστιτούτο Πολιτικής «Δέον») με έδρα τη Βοστώνη των ΗΠΑ για να απαντήσουμε σε ορισμένα «φορτισμένα» ερωτήματα. Και αρχίσαμε με το ερώτημα του «χρώματος» της πυρηνικής ενέργειας.

«ΗΕΕ ταξινόμησε την πυρηνική ενέργεια ως πράσινη επειδή έχει χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα. Οι πυρηνικοί σταθμοί δεν παράγουν αέρια του θερμοκηπίου, πράγμα που αναμένεται να συμβάλει στην επίτευξη των στόχων της απανθρακοποίησης και ειδικότερα την επίτευξη ουδετερότητας στις εκπομπές άνθρακα έως το 2050» μας είπε ο Έλληνας επιστήμονας προσθέτοντας ότι η ΕΕ συνυπολόγισε στα οφέλη της πυρηνικής ενέργειας και τη διασφάλιση σταθερής παραγωγής ενέργειας η οποία θα συμβάλει στη μείωση της εξάρτησής μας από το ρωσικό φυσικό αέριο.

Διαχείριση αποβλήτων

Μπορεί οι πυρηνικοί σταθμοί να μην παράγουν αέρια του θερμοκηπίου, αλλά τι γίνεται με τα πυρηνικά απόβλητα; «Τα ραδιενεργά ή πυρηνικά απόβλητα είναι παραπροϊόντα διαφόρων ανθρώπινων δραστηριοτήτων που έχουν να κάνουν με τη χρήση της ραδιενέργειας στα νοσοκομεία, τα ερευνητικά κέντρα και τα πυρηνικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας. Τα πυρηνικά απόβλητα ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες, (1) χαμηλού επιπέδου, (2) μεσαίου επιπέδου και (3) υψηλού επιπέδου ανάλογα με το επίπεδο ραδιενέργειάς τους. Η συντριπτική πλειονότητα των αποβλήτων, παγκοσμίως, περίπου το 90% του συνολικού όγκου, αποτελείται από

ελαφρώς μολυσμένα αντικείμενα, όπως ρούχα εργασίας και εργαλεία, που περιέχουν μόνο το 1% της συνολικής ραδιενέργειας. Αντίθετα, τα απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας, συμπεριλαμβανομένου του χρησιμοποιημένου πυρηνικού καυσίμου, αποτελούν μόλις το 3% του συνολικού όγκου των αποβλήτων αλλά περιέχουν το 95% της συνολικής ραδιενέργειας» σημείωσε ο κ. Λάσκαρης εξηγώντας ότι «όταν το χρησιμοποιημένο καύσιμο αφαιρείται από τον αντιδραστήρα, είναι ζεστό και ραδιενεργό και πρέπει να αποθηκευτεί σε νερό μέχρι να ψυχθεί. Μετά την αρχική ψύξη, μπορεί να αποθηκευτεί προσωρινά είτε σε υγρό είτε σε ξηρό περιβάλλον. Η προσωρινή αποθήκευση επιτρέπει την περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας και της ραδιενέργειας,

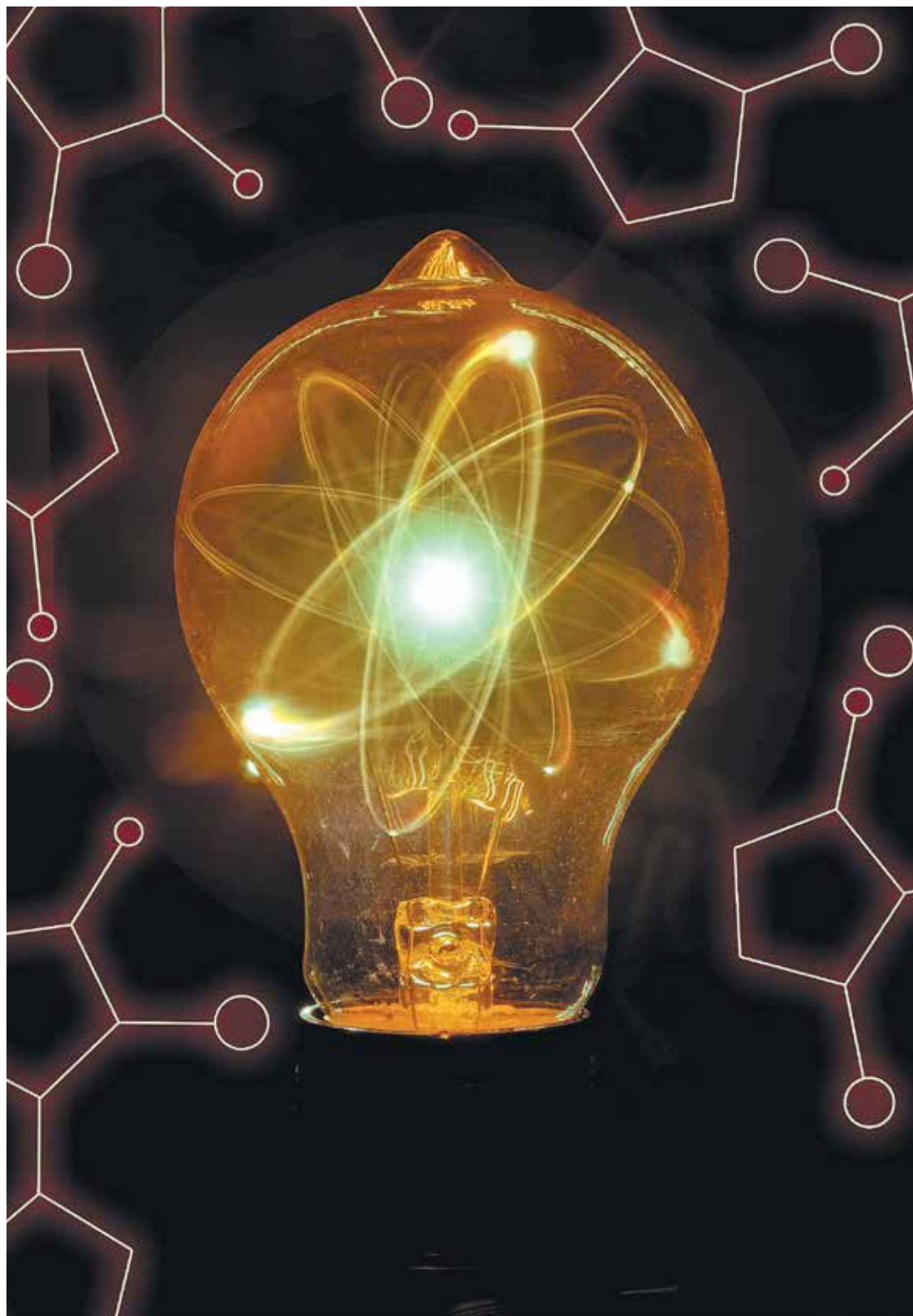
διευκολύνοντας έτσι την ανακύκλωση ή την τελική εναπόθεση».

Ανακύκλωση και υαλοποίηση

Ο Έλληνας επιστήμονας φαίνεται καθοριστικός ως προς το θέμα των αποβλήτων. Μάλιστα θεωρεί ότι ο όρος «απόβλητα» δεν είναι ακριβής καθώς «περίπου το 97% του χρησιμοποιημένου καυσίμου το οποίο είναι κυρίως ουράνιο μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί και να δώσει τεράστια ποσά ενέργειας». Πράγματι, πολλές χώρες - μεταξύ των οποίων και η Γαλλία - ανακυκλώνουν το πυρηνικό καύσιμο, μειώνοντας το ραδιενεργό αποτύπωμα των αποβλήτων τους. «Η ανακύκλωση εξαγεί πλουτώνιο και ουράνιο, τα οποία

μπορούν να αναμειχθούν εκ νέου με ουράνιο για την κατασκευή νέων ράβδων καυσίμου. Τα παραπροϊόντα (~4%), τα οποία περιέχουν κυρίως θραύσματα σχάσης, απαιτούν μόνιμη αποθήκευση. Αυτά συνήθως αναμειγνύονται με γυαλί (υαλοποίηση) για ασφαλή αποθήκευση. Στις ΗΠΑ τοποθετούν το χρησιμοποιημένο καύσιμο σε μεταλλικά βαρέλια, τα οποία αποθηκεύουν σε υπόγειες εγκαταστάσεις».

Όσο για τον όγκο αυτών των αποβλήτων, ο συνομιλητής μας εξηγεί ότι «οι ΗΠΑ, που είναι μια χώρα με περίπου 100 μεγάλους αντιδραστήρες, παράγει ετησίως χρησιμοποιημένο πυρηνικό καύσιμο που έχει συνολικό όγκο όσο μισή ποσία ολυμπιακών διαστάσεων. Όπως μπορείτε να φανταστείτε, αν η Ελλάδα, που έχει



68

τεχνικά σχέδια για αντιδραστήρες SMR αναπτύσσονται σε 18 χώρες, σύμφωνα με την ΙΑΕΑ. Ειδικότερα, τα σχέδια αφορούν:

14

αντιδραστήρες ψυχόμενους με νερό

6

πλωτούς αντιδραστήρες ψυχόμενους με νερό

14

αντιδραστήρες υψηλής θερμοκρασίας ψυχόμενους με αέριο

10

αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων ψυχόμενους με υγρό μέταλλο

11

αντιδραστήρες ψυχόμενους με τήγμα άλατος

13

μικρο-αντιδραστήρες

Η επαναφορά της πυρηνικής ενέργειας και οι αντιδραστήρες «τσέπης»

SCIENCE

ΟΙ ΧΩΡΕΣ ΠΟΥ ΕΠΕΝΔΥΟΥΝ

Αγώνας δρόμου για τους SMR

Μετά τη Ρωσία και την Κίνα, στη Δύση πάνω από τριάντα χώρες σχεδιάζουν επενδύσεις σε Μικρούς Αρθρωτούς Αντιδραστήρες.

Στις ΗΠΑ ο πρώτος αντιδραστήρας SMR που αδειοδοτήθηκε από την Επιτροπή Ρυθμιστικού Ελέγχου Πυρηνικής Ενέργειας (NRC) των ΗΠΑ είναι ο αντιδραστήρας της Nuscale VOYGR, ενώ υπάρχουν και άλλοι.

Στον Καναδά, η GE Hitachi Nuclear Energy σχεδιάζει την κατασκευή του BWRX-300 το 2025, ο οποίος θα τεθεί σε λειτουργία έως το 2028. «Αυτός θα είναι ίσως ο πρώτος SMR στη Βόρεια Αμερική που θα τεθεί σε εμπορική λειτουργία» λέει ο κ. Λάσκαρης.

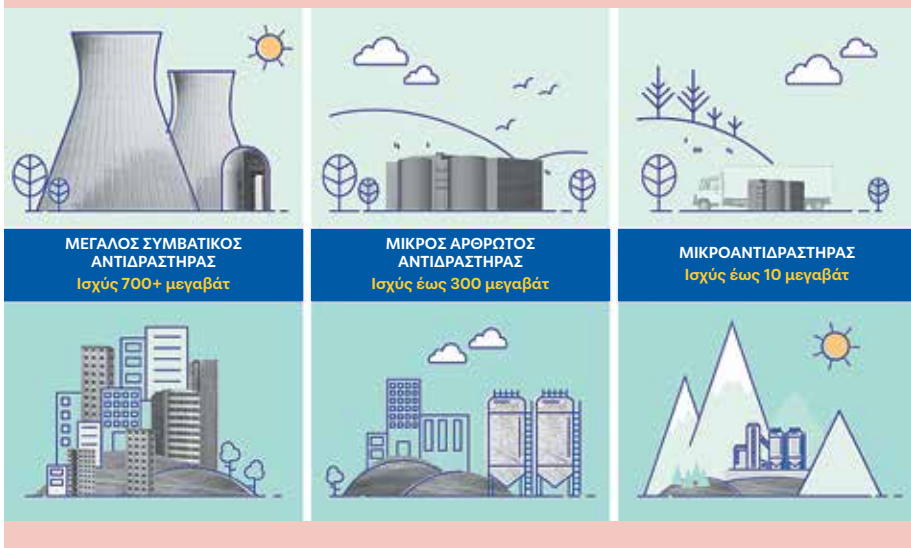
Στο Ηνωμένο Βασίλειο η Rolls-Royce αναπτύσσει τον δικό της αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος, ενώ στην Αργεντινή ο CAREM-25 βρίσκεται υπό κατασκευή με στόχο τη σύνδεση στο δίκτυο το 2028.

Η Γαλλία μέσω του προγράμματος France Relance 2030 υποστηρίζει την ανάπτυξη του EDF-NUWARD SMR και άλλων 9 προηγμένων σχεδίων.

Στην Ιαπωνία 6 ιδιωτικές εταιρείες αναπτύσσουν SMRs.

Στη Δανία και στη Νότια Κορέα αναπτύσσονται πλωτοί αντιδραστήρες, ενώ τα κορεατικά ναυπηγεία Hyundai KSOE μόλις αποκάλυψαν τα σχέδιά τους για την ανάπτυξη πλοίου container με βάση την πυρηνική πρόωση.

Σύμφωνα με τον κ. Λάσκαρη «είναι πολύ δύσκολο να προβλέψει κανείς ποια δυτική χώρα τελικά θα κόψει πρώτη το νήμα, δηλαδή θα θέσει σε λειτουργία SMR για εμπορική χρήση. Ίσως να μην είναι «χώρα», αλλά αυτοί που τελικά θα κόψουν το νήμα να είναι ο παγκόσμιος εφοπλισμός, δηλαδή οι πυρηνικοί αντιδραστήρες θα χρησιμοποιηθούν ώστε να αντικαταστήσουν τις μηχανές εσωτερικής καύσης των πλοίων».



πολύ μικρότερες ενεργειακές ανάγκες, επιλέξει να αξιοποιήσει την πυρηνική ενέργεια, θα παράγει κάθε χρόνο ένα κλάσμα αυτής της ποσότητας».

Τεχνολογικές πρόοδοι

Με δεδομένο ότι αυτή τη στιγμή υπάρχουν 36 χώρες παγκοσμίως που έχουν ή πρόκειται σύντομα να αποκτήσουν πυρηνικούς αντιδραστήρες, είναι προφανές ότι η σχεδίαση νέων αντιδραστήρων είναι ένας τεχνολογικός τομέας που ανθεί. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον σχεδιασμό των Μικρών Αρθρωτών Αντιδραστήρων (Small Modular Reactors, SMRs) οι οποίοι ήδη χρησιμοποιούνται στη Ρωσία και στην Κίνα. «Οι SMRs είναι ένας εξελιγμένος τύπος αντιδραστήρων μικρότερων σε μέγεθος και με ισχύ έως 300 MW (περίπου το ένα τρίτο της ισχύος των παραδοσιακών πυρηνικών αντιδραστήρων). Χαρακτηρίζονται ως αρθρωτοί (modular) γιατί μπορούν να κατασκευαστούν σε εργοστάσια και στη συνέχεια να μεταφερθούν στον χώρο λειτουργίας τους όπου συναρμολογούνται επιτρέποντας να προστεθούν σταδιακά κι άλλοι αντιδραστήρες ώστε να καλύψουν μεταβαλλόμενες ενεργειακές ανάγκες» εξηγεί ο κ. Λάσκαρης προσθέτοντας ότι οι σχεδιαζόμενοι αντιδραστήρες SMR κατηγοριοποιούνται με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους σε έξι διαφορετικές ομάδες.

Πιθανές εφαρμογές

Όσο για τις πιθανές χρήσεις τους, ο έλληνας επιστήμονας εξηγεί ότι «οι διαφορετικές

ομάδες αντιδραστήρων SMR αντικατοπτρίζουν τις διαφορετικές εφαρμογές που θα έχουν οι αντιδραστήρες αυτοί στο πεδίο. Για παράδειγμα, οι ψυχόμενοι με νερό αντιδραστήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή καθαρού βασικού φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας, να λειτουργήσουν επικουρικά στις ευμετάβλητες από άποψη ισχύος ΑΠΕ και να αντικαταστήσουν παλιές λιγνιτικές μονάδες ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πλωτοί αντιδραστήρες στη θάλασσα (Floating Nuclear Power Plants) μπορούν να παράγουν ενέργεια για την ηλεκτροδότηση κέντρων δεδομένων (data centers) και για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού που χρειάζεται για την ψύξη των κέντρων δεδομένων. Οι ίδιοι αντιδραστήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ηλεκτροδότηση των λιμανιών και την παραγωγή πράσινων καυσίμων όπως υδρογόνο και αμμωνία κοντά σε λιμάνια. Οι πλωτοί ψυχόμενοι με τήγμα άλατος αντιδραστήρες (Molten Chloride Fast Reactors) είναι ιδανικοί για την πυρηνική πρόωση των πλοίων, όπως τα tanker, που κάνουν υπερπόντια ταξίδια. Τέλος, οι αντιδραστήρες υψηλής θερμοκρασίας ψυχόμενοι με αέριο μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βιομηχανικές εφαρμογές που απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες όπως διύλιση πετρελαίου και παραγωγή τοιμέντου, ενώ οι μικροαντιδραστήρες μπορούν να ηλεκτροδοτήσουν απομακρυσμένες περιοχές όπως νησιά κ.ά.».

Ευελξία και ασφάλεια

Ο κ. Λάσκαρης εκτιμά ότι η εμπορική ανάπτυξη των SMRs θα είναι πραγματικότητα έως τα μέσα της δεκαετίας του 2030 και ανα-

μένει ότι αυτή η τεχνολογία θα υιοθετηθεί ευρέως στις επόμενες δεκαετίες. Στήριζει δε αυτή τη βεβαιότητα τόσο στην τεχνολογική υπεροχή και ευελξία όσο και στην αυξημένη ασφάλεια που παρέχουν οι αντιδραστήρες SMRs. «Οι SMRs έχουν πολλά τεχνολογικά πλεονεκτήματα και πλεονεκτήματα ασφαλείας που τους καθιστούν μια σοβαρή εναλλακτική επιλογή σε σχέση με τους παραδοσιακούς αντιδραστήρες. Ο αρθρωτός σχεδιασμός των SMRs επιτρέπει την παραγωγή τους σε εργοστάσια και την γρήγορη συναρμολόγησή τους στο πεδίο, αναμένοντας να μειώσει τον χρόνο ανάπτυξης των πυρηνικών εργοστασίων από 8 ως 15 χρόνια σε 3-5 χρόνια. Επιπλέον, η μικρότερη ισχύς και το μέγεθός τους επιτρέπει την εγκατάστασή τους σε απομακρυσμένες περιοχές. Πολλοί SMRs ενσωματώνουν προηγμένες τεχνολογίες που προσφέρουν μεγαλύτερη απόδοση καυσίμου και λιγότερα απόβλητα. Ακόμα, όπως είδαμε παραπάνω, ορισμένοι SMRs χρησιμοποιούν εναλλακτικά συστήματα ψύξης, όπως ψύξη με αέρα ή υγρά μέταλλα, μειώνοντας την εξάρτησή τους από υδάτινους πόρους» μας είπε ο κ. Λάσκαρης προσθέτοντας ότι η αυξημένη ασφάλεια των SMRs οφείλεται σε μια σειρά παραγόντων. Ειδικότερα «οι SMRs ενσωματώνουν παθητικά συστήματα ασφαλείας, τα οποία επιτρέπουν την αυτόματη ψύξη και απενεργοποίηση του αντιδραστήρα χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο της τήξης του πυρήνα. Σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς αντιδραστήρες που εξαρτώνται από αντλίες και γεννήτριες, τα συστήματα ασφαλείας των SMRs βασίζονται σε φυσικές διεργασίες όπως είναι η βαρύτητα, η φυσική κυκλοφορία του μέσου ψύξης και η θερμική αγωγιμότητα για τη διάχυση της θερμότητας, εξαλείφοντας έτσι την πιθανότητα αποτυχίας των ενεργών συστημάτων ψύξης, όπως συνέβη στη Φουκουσίμα (2011). Επίσης, λόγω του μικρότερου μεγέθους τους, απαιτούν μικρότερες ζώνες αποκλεισμού, καθιστώντας δυνατή την εγκατάστασή τους πιο κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Τέλος, η χρήση προηγμένων καυσίμων διασφαλίζει την ελαχιστοποίηση των πυρηνικών αποβλήτων».

Οι οικονομικές παράμετροι

Βεβαίως, η αξιοποίηση οποιασδήποτε τεχνολογίας έχει και οικονομικές παραμέτρους. Αν ήταν έτοιμος ένας SMR σήμερα πόσο θα είχε κοστίσει; Σε πόσα χρόνια θα έκανε απόδοση; Σε πόσα χρόνια θα έπαυε να λειτουργεί; «Κανείς δεν μπορεί να εκτιμήσει το συνολικό κεφαλαιακό κόστος ενός SMR καθώς αυτό ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τον σχεδιασμό, την τοποθεσία και την κλίμακα του έργου. Αυτό που μπορώ να πω είναι ότι για έναν πρωτότυπο αντιδραστήρα SMR το κεφαλαιακό κόστος μπορεί να κυμαίνεται από μισό δισεκατομμύριο δολάρια έως 9 δισεκατομμύρια δολάρια. Το αντίστοιχο κεφαλαιακό κόστος στην περίπτωση των παραδοσιακών μεγάλων αντιδραστήρων κυμαίνεται από 24 δισεκατομμύρια δολάρια (Barakah, Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα) μέχρι και 40 δισεκατομμύρια δολάρια (Hinkley Point C, Ηνωμένο Βασίλειο)», μας είπε ο κ. Λάσκαρης, προσθέτοντας ωστόσο ότι «μπορεί το συνολικό κεφαλαιακό κόστος των SMRs να είναι μικρότερο από το κεφαλαιακό κόστος των μεγάλων πυρηνικών εργοστασίων αλλά το κόστος ανά MW των SMRs φαίνεται να είναι υψηλότερο προς το παρόν από τους μεγάλους αντιδραστήρες. Βρισκόμαστε σε μια μεταβατική περίοδο εφόσον οι SMRs βρίσκονται ακόμα στα πρώτα στάδια κατασκευής τους και δεν είναι εμφανής η μείωση του κόστους που θα προκύψει από τη μαζική παραγωγή τους σε οικονομίες κλίμακας».

Όσο για τη διάρκεια ζωής αυτών αντιδραστήρων, κανείς δεν μπορεί να τη γνωρίζει με σιγουριά. Το ίδιο αβέβαιος είναι και ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης ενός SMR «αφού δεν υπάρχει κάποιος SMR σε εμπορική λειτουργία αυτή τη στιγμή στη Δύση. Όμως με βάση την εμπειρία των μεγάλων αντιδραστήρων (1-1.6 GW), η διάρκεια ζωής ενός αντιδραστήρα κυμαίνεται από 60 έως 80 χρόνια και ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης είναι περίπου 20 με 30 χρόνια. Νομίζω ότι μπορούμε να περιμένουμε παρόμοιους χρόνους ζωής και απόσβεσης για τους SMRs».

ΑΠΟ ΟΗΕ, ΕΕ, ΗΠΑ ΚΑΙ ΙΜΟ

Διεθνής αποδοχή με αυστηρές προδιαγραφές ασφαλείας

Ο ΟΗΕ, η ΕΕ, οι ΗΠΑ αλλά και ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός θεωρούν πράσινη την πυρηνική ενέργεια.

● Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) του ΟΗΕ περιλαμβάνει την πυρηνική ενέργεια – ως πηγή χαμηλών εκπομπών άνθρακα – στις στρατηγικές της για τη μείωση των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, με το σκεπτικό ότι αυτή υπηρετεί τους στόχους της βιώσιμης ανάπτυξης (SDGs), και συγκεκριμένα τον στόχο 7 (Προσιτή και Καθαρή Ενέργεια) και τον στόχο 13 (Δράση για το Κλίμα). Αναγνωρίζει δηλαδή η IPCC ότι η πυρηνική ενέργεια μπορεί να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών άνθρακα. Εξ ου και η Διεθνής Υπηρεσία Ατομικής Ενέργειας (IAEA) – ένας οργανισμός συνδεδεμένος στενά με τον ΟΗΕ – προωθεί ενεργά την πυρηνική ενέργεια ως μέρος του μείγματος καθαρής ενέργειας σε όλο τον κόσμο.

● Τον Ιούλιο του 2022 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ταξινόμησε και την πυρηνική ενέργεια ως «πράσινη» και βιώσιμη πηγή ενέργειας, υπό την προϋπόθεση ότι πληροί αυστηρές προδιαγραφές ασφαλείας και περιβαλλοντικής προστασίας. Οι προδιαγραφές ασφαλείας που έθεσε η ΕΕ έχουν να κάνουν με την ασφαλή διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων και τη χρησιμοποίηση συγκεκριμένων τεχνολογιών αντιδραστήρων τρίτης και τέταρτης γενιάς, συμπεριλαμβανομένων των Μικρών Αρθρωτών Αντιδραστήρων (SMRs). Η λειτουργία αυτών των νέων αντιδραστήρων πρέπει να έχει εγκριθεί μέχρι το 2045 ενώ οι υπάρχοντες σταθμοί θα μπορούν να συνεχίσουν τη λειτουργία με την προϋπόθεση να αναβαθμίσουν τη λειτουργία τους χρησιμοποιώντας σύγχρονα συστήματα ασφαλείας.

● Στις ΗΠΑ η πυρηνική ενέργεια θεωρείται πράσινη. Ο αμερικανός τώως πρόεδρος πέρασε το 2024 με τεράστια πλειοψηφία και στήριξη και των δύο κομμάτων τον Νόμο για την Προώθηση της Ατομικής Ενέργειας (Atomic Energy Advancement Act) με σκοπό την επιτάχυνση της ανάπτυξης πυρηνικών τεχνολογιών, όπως οι προηγμένοι αντιδραστήρες. Και η κυβέρνηση Τραμπ σκοπεύει να ενισχύσει την πυρηνική ενέργεια, ειδικά μέσω μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMRs) και να επιταχύνει τις διαδικασίες αδειοδότησης.

● Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (ΙΜΟ) επιβεβαίωσε μέσω του προέδρου του το ενεργό ενδιαφέρον του για την πυρηνική πρόωση ενώ μέσω της υπο-επιτροπής του για την ασφάλεια στις θαλάσσιες μεταφορές εργάζεται στενά με την ΙΑΕΑ για την αναθεώρηση του παλαιού κώδικα (του 1981) σχετικά με την ασφάλεια για τα πυρηνοκίνητα εμπορικά πλοία.