

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
**ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ**



ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΕΣ: **ΑΝΤΩΝΑΤΟΥ ΧΑΡΑΛΑΜΠΙΑ (Α.Μ. 5741)**
ΠΑΠΑΦΡΑΓΚΟΥ ΣΟΦΙΑ (Α.Μ. 5848)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: **ΚΑΛΑΡΑΚΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ**

ΠΑΤΡΑ 2016

ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με το πέρας των σπουδών μας στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας, συνέγραψα πτυχιακή εργασία που αναφέρεται στη μελέτη για δυνατότητα εγκατάστασης πυρηνικού εργοστασίου στην Ελλάδα.

Πρόκειται να παρουσιαστεί το ενεργειακό τοπίο σε παγκόσμιο επίπεδο και στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι ενεργειακές ανάγκες της Ελλάδας από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η βασική θεωρία της πυρηνικής τεχνολογίας, η δομή και η ιστορική εξέλιξη των πυρηνικών αντιδραστήρων, τα πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα αυτών καθώς επίσης και τα κύρια πυρηνικά ατυχήματα που έχουν συμβεί. Στο τρίτο κεφάλαιο αγορά οικονομικά στοιχεία σχετικά με το κόστος κιλοβατώρας και τη διαθεσιμότητα του πυρηνικού καυσίμου. Τέλος, παρουσιάζεται η ενδεχόμενη εγκατάσταση πυρηνικού αντιδραστήρα στον Ελλαδικό χώρο αφού πρώτα αναλυθούν οι παράγοντες που καθορίζουν το σημείο επιλογής της εγκατάστασης και τις υποδομές που πρέπει να αναπτυχθούν. Τέλος, εκτιμήθηκε η ανταγωνιστικότητα των πυρηνικών σταθμών έναντι συμβατικών τεχνολογιών παραγωγής που χρησιμοποιούνται ευρέως στη χώρα μας, εν προκειμένω ο λιγνίτης, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μας κ. Αλέξανδρο Καλαράκη, για την καθοριστική βοήθεια και τις γνώσεις που μας προσέφερε.

Αντωνάτου Χαρά
Παπαφράγκου Σοφία

Ιούλιος 2016

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή: Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές

(Όνοματεπώνυμο)

(Όνοματεπώνυμο)

.....
(Υπογραφή)

.....
(Υπογραφή)

ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο τίτλος της παρούσας εργασίας είναι «Μελέτη για δυνατότητα εγκατάστασης πυρηνικού εργοστασίου στην Ελλάδα». Στόχος της μελέτης είναι να περιγραφούν οι βασικές ενεργειακές ανάγκες της Ελλάδας με τις υπάρχουσες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η εργασία αποτελείται από 6 μέρη, τα οποία θα περιγραφούν ακολούθως.

Στην «Εισαγωγή» της εργασίας δίνονται τα βασικά ιστορικά και θεωρητικά στοιχεία, ώστε να γίνει κατανοητή η δομή και ο σκοπός της. Στο πρώτο κεφάλαιο της πτυχιακής εργασίας θα πραγματοποιηθεί εκτίμηση των προοπτικών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα από πυρηνικούς σταθμούς. Θα γίνει περιγραφή του σύγχρονου ενεργειακού τοπίου και θα παρουσιαστούν τα ευρύτερα οικονομικά, κοινωνικά, πολιτικά και τεχνολογικά πλαίσια που το περικλείουν. Θα πραγματοποιηθεί αρχικά συνοπτική περιγραφή του παγκόσμιου ενεργειακού τοπίου καθώς και των βασικών οικονομικών και πολιτικών πλαισίων που το χαρακτηρίζουν. Στη συνέχεια θα γίνει παρουσίαση των ενεργειακών αναγκών της Ελλάδας και θα παρουσιαστούν οι βασικοί πυλώνες της εγχώριας ηλεκτροπαραγωγής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται εισαγωγή στις βασικές έννοιες και ορολογία της πυρηνικής τεχνολογίας. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ιστορικά η εξέλιξη των πυρηνικών τεχνολογιών και τέλος αναλύεται η λειτουργία ενός πυρηνικού εργοστασίου. Η ανάλυση περιλαμβάνει παρουσίαση όλων των σταδίων για την κατασκευή ενός πυρηνικού σταθμού, από την αρχική κατασκευή ως και την απεγκατάσταση καθώς επίσης και τις βασικές οικονομικές, πολιτικές και περιβαλλοντολογικές παραμέτρους. Θα παρουσιαστούν τα οφέλη από τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας αλλά και οι δυσάρεστες συνέπειες από τα σοβαρά ατυχήματα που έχουν συμβεί τα τελευταία χρόνια.

Στο τρίτο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν ως τάξεις μεγέθους λόγω συνεχών μεταβολών σημαντικά στοιχεία όπως το κόστος της κιλοβατώρας, το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού, τη σχέση της τιμής της kWh σε σχέση με την τιμή των ορυκτών καυσίμων καθώς και πίνακες με τη διαθεσιμότητα των αποθεμάτων του πυρηνικού καυσίμου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί το ποσοστό συμμετοχής των ενεργειακών πηγών στην κατανάλωση της ΕΕ, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα από την εγκατάσταση μιας μονάδας πυρηνικής ενέργειας στην Ελλάδα και τις βασικές υποδομές που πρέπει να έχει η Ελλάδα για να συμβεί αυτό. Λαμβάνοντας υπόψη οικονομικά, τεχνικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια, που καθορίστηκαν σύμφωνα με αντίστοιχη διεθνή κι ελληνική βιβλιογραφία, εκτιμήθηκε η ανταγωνιστικότητα των πυρηνικών σταθμών έναντι συμβατικών τεχνολογιών παραγωγής που χρησιμοποιούνται ευρέως στη χώρα μας, εν προκειμένω ο λιγνίτης, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια.

ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν σχετικά με την εγκατάσταση πυρηνικού αντιδραστήρα στον ελλαδικό χώρο σύμφωνα με μελέτες αρμόδιων φορέων όπως το ΤΕΕ.

Τέλος στο έκτο κεφάλαιο υπάρχει η λίστα με τα στοιχεία της εγχώριας και διεθνούς βιβλιογραφίας καθώς και οι ιστότοποι που χρησιμοποιήθηκαν για εύρεση υλικού.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iv
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΤΟΠΙΟ	8
1.1 Συνοπτική ιστορική αναδρομή.....	8
1.2 Ενεργειακό πρόβλημα.....	9
1.3 Περιγραφή ενεργειακού προβλήματος.....	10
1.3.1 Μόλυνση του περιβάλλοντος.....	11
1.4 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα.....	12
1.5 Ηλεκτροπαραγωγή από πυρηνική ενέργεια σε παγκόσμιο επίπεδο.....	16
1.6 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα.....	17
1.6.1 Λιγνίτης.....	18
1.6.2 Φυσικό Αέριο.....	20
1.6.3 Πετρελαϊκοί Σταθμοί.....	21
1.6.4 Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί (ΥΗΣ).....	22
2 ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ	23
2.1 Θεωρία και φυσική της πυρηνικής ενέργειας.....	23
2.2 Πυρηνικοί αντιδραστήρες – τεχνολογική εξέλιξη.....	25
2.2.1 Αρχή λειτουργίας.....	25
2.2.2 Πυρηνικά καύσιμα.....	25
2.2.3 Δομή Πυρηνικών αντιδραστήρων.....	29
2.2.4 Ασφαλής λειτουργία αντιδραστήρων.....	33
2.2.5 Υφιστάμενοι ενεργοί πυρηνικοί αντιδραστήρες.....	35
2.2.6 Κατηγορίες πυρηνικών αντιδραστήρων.....	38
2.2.7 Περιπτώσεις ατυχημάτων.....	54
3 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	63
3.1 Κατασκευή - οικονομική αξιολόγηση.....	63
3.2 Οικονομική ανάλυση εγκατάστασης πυρηνικού εργοστασίου.....	66
3.3 Ισχύς και διάρκεια ζωής.....	66
3.4 Παγκόσμια οικονομικά στοιχεία.....	70
4 ΕΘΝΙΚΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ	74
4.1 Ελληνική προοπτική – Χωροθέτηση αντιδραστήρων.....	74

ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

4.2	Εγκατάσταση πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος στην Ελλάδα.....	76
4.3	Απαραίτητες Υποδομές.....	79
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	82
6	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	86
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	92
	Ελληνική Βιβλιογραφία.....	92
	Αγγλική Βιβλιογραφία.....	92
	Ηλεκτρονικές Πηγές	93

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΤΟΠΙΟ

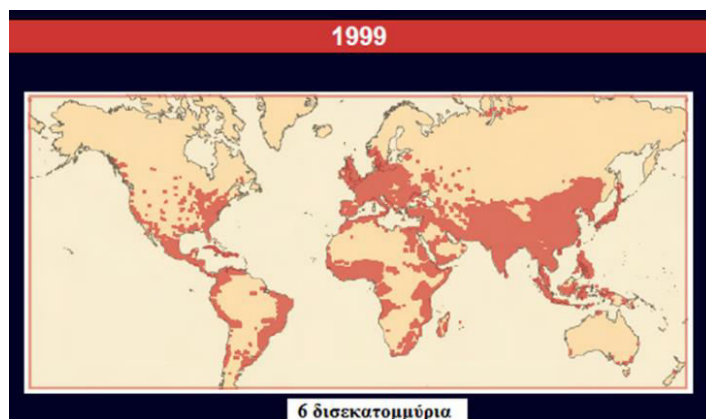
1.1 Συνοπτική ιστορική αναδρομή

Οι όροι άνθρωπος και ενέργεια είναι άμεσα συνδεδεμένοι από τα πρώτα χρόνια της ύπαρξης πάνω στον πλανήτη. Αρχικά ο άνθρωπος κυνηγός χρειαζόταν ενέργεια για να εξασφαλίσει την τροφή του και στη συνέχεια άρχισε να εκμεταλλεύεται την ενέργεια μεγαλύτερων οργανισμών (μυϊκή δύναμη ζώων) για να καλλιεργήσει τη γη.

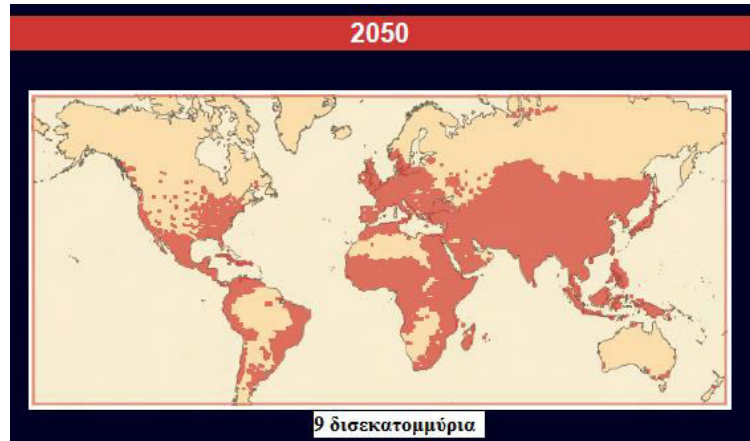
Η παρατήρηση του φυσικού περιβάλλοντος και η κατανόηση ότι οι διάφορες μορφές ενέργειας (υδραυλική, αιολική και ενέργεια καυσίμων) έδωσαν τη δυνατότητα στον άνθρωπο να εξελιχθεί και να φτάσει στα σημερινά τεχνολογικά επιτεύγματα. Ολόκληρες ιστορικές περίοδοι έχουν χαρακτηριστεί από τη δυνατότητα του ανθρώπου να διαχειρίζεται διάφορες μορφές ενέργειας, λίθινη εποχή, εποχή σιδήρου ή χαλκού και τέλος πιο πρόσφατα παράδειγμα την βιομηχανική επανάσταση. Πλέον η ανάπτυξη και ευημερία μιας κοινωνίας είναι άμεσα συνδεδεμένη με την εξασφάλιση των απαραίτητων πόρων για την παραγωγή ποσοτήτων ενέργειας για την κάλυψη των αυξανόμενων αναγκών.

Ο αυξανόμενος πληθυσμός του πλανήτη τις τελευταίες δεκαετίες απαιτεί όλο και μεγαλύτερα ποσά ενέργειας. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται ο πληθυσμός του πλανήτη το 1999 και στην Εικόνα 2 ο αναμενόμενος πληθυσμός το 2050. Η μεταβολή αυτή των 3 δισεκατομμυρίων είναι ασύμμετρη και παρουσιάζεται σε αναπτυσσόμενες χώρες. Σαν αποτέλεσμα δημιουργείται ακόμα μεγαλύτερο πρόβλημα στην ανισοκατανομή του πλούτου και στην κατανάλωση ενέργειας.

Οι παγκόσμιες ανάγκες ενέργειας παρουσιάζουν αυξητικές τάσεις από τη δεκαετία του 90 μέχρι και το 2004. Μάλιστα ως το 2030 οι μελέτες υποδεικνύουν αύξηση 63%.



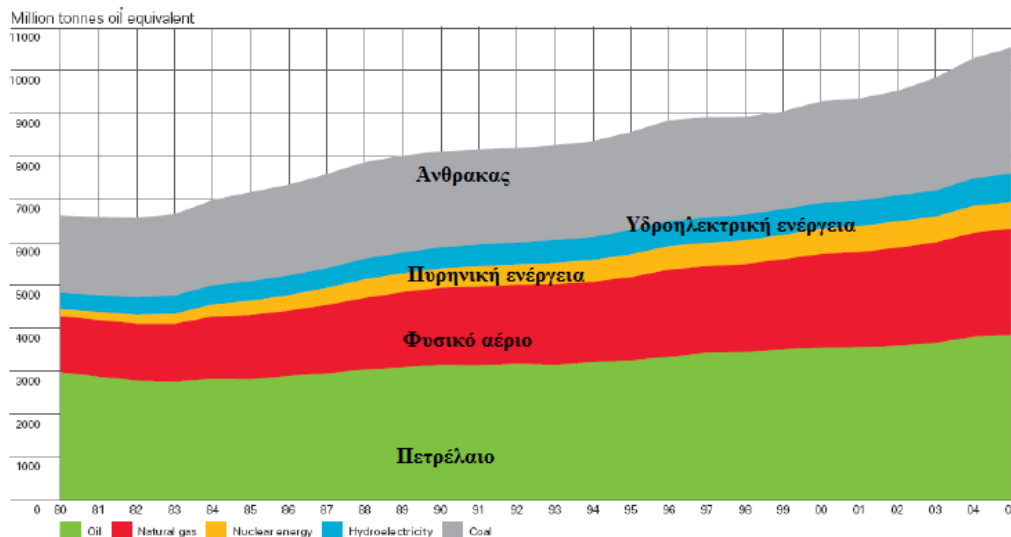
Εικόνα 1: Ο πληθυσμός του πλανήτη το 1999 (Πηγή: Γιώργος Γιαδικιάρογλου, (Απρίλιος, 2007))



Εικόνα 2: Ο πληθυσμός του πλανήτη το 2050 (Πηγή: Γιώργος Γιαδικιάρου, (Απρίλιος, 2007))

1.2 Ενεργειακό πρόβλημα

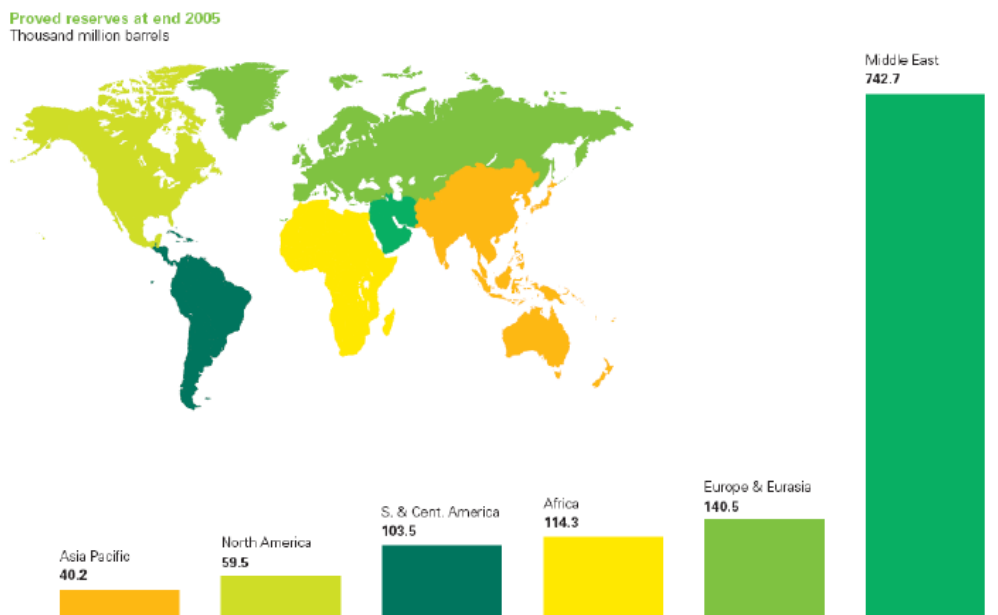
Οι παγκόσμιες απαιτήσεις για ενέργεια μεγαλώνουν συνεχώς καθώς αυξάνεται ο πληθυσμός και οι καθημερινές ανάγκες των κοινωνιών. Το αρνητικό στοιχείο της υπόθεσης είναι ότι οι ευρέως διαδεδομένες πηγές ενέργειας (Εικόνα 3) δεν είναι ανανεώσιμες και στην πλειοψηφία τους δεν αναπληρώνονται σε σύντομο χρονικό διάστημα καθώς απαιτούν φυσικές διεργασίες που κρατούν πολλά χρόνια. Η ουσία του ενεργειακού προβλήματος του πλανήτη είναι ότι υπάρχει αυξανόμενη ζήτηση ωφέλιμης ενέργειας για κατανάλωση με ταυτόχρονη μείωση των ενεργειακών αποθεμάτων.



Εικόνα 3: Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (Πηγή: BP Statistical review of world energy 2006)

Πρόσφατη έρευνα για τα επίπεδα παραγωγής και κατανάλωσης σε παγκόσμια κλίμακα έδειξε ότι για τον γαιάνθρακα τα αποθέματα επαρκούν για τα επόμενα 164 χρόνια, για το πετρέλαιο επαρκούν για τα επόμενα 41 και για το φυσικό αέριο για 67 αντίστοιχα. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται τα διαθέσιμα αποθέματα πετρελαίου. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι η Μέση Ανατολή με ποσοστό 742,7 δις βαρελιών είναι ο ηγέτης των αποθεμάτων που αποτελεί το

66% των παγκόσμιων κοιτασμάτων. Η Ρωσία ελέγχει παράλληλα το 25% των κοιτασμάτων φυσικού αερίου.



Εικόνα 4: Αποθέματα πετρελαίου 2005 (Πηγή: BP Statistical review of world energy 2006)

1.3 Περιγραφή ενεργειακού προβλήματος

Το ενεργειακό πρόβλημα έγινε οξύτερο με την ενεργειακή κρίση το 1973. Τα βασικότερα αίτια συνειδητοποίησης του προβλήματος ήταν:

- Ο περιορισμός της άντλησης του αργού πετρελαίου.
- Ο μονομερής καθορισμός τιμών από τον ΟΠΕΚ.
- Η επακόλουθη αύξηση της τιμής του.
- Η απόφαση του ΟΠΕΚ για εθνικοποιήσεις κοιτασμάτων αργού πετρελαίου.

Οι παράγοντες που τροφοδοτούν το ενεργειακό πρόβλημα είναι:

- Οι ποσότητες των συμβατικών ενεργειακών πηγών θα εξαντληθούν γρήγορα.
- Πολιτικά και μη γεγονότα (τρομοκρατικές οργανώσεις κτλ.) που επηρεάζουν αστάθμητα τις τιμές.

Είναι πολύ εύκολο να κατανοήσει κανείς τη σημασία της αύξησης της ενέργειας αν αναλογιστούμε τις διαφορετικές ανάγκες που έχει ακόμα και ένα συμβατικό σπίτι σήμερα με ένα αντίστοιχο περασμένων δεκαετιών. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγει κανείς ακόμα και αν συγκρίνει μεγαλύτερες εγκαταστάσεις όπως νοσοκομεία, εργοστάσια και δίκτυα υπολογιστών. Σύμφωνα με έρευνες ο πρωτόγονος άνθρωπος χρησιμοποιούσε καθημερινά ενέργεια 6,3 MJ ενώ ο σύγχρονος χρησιμοποιεί 1000MJ.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας σε Ευρώπη και Αμερική ανά έτος:

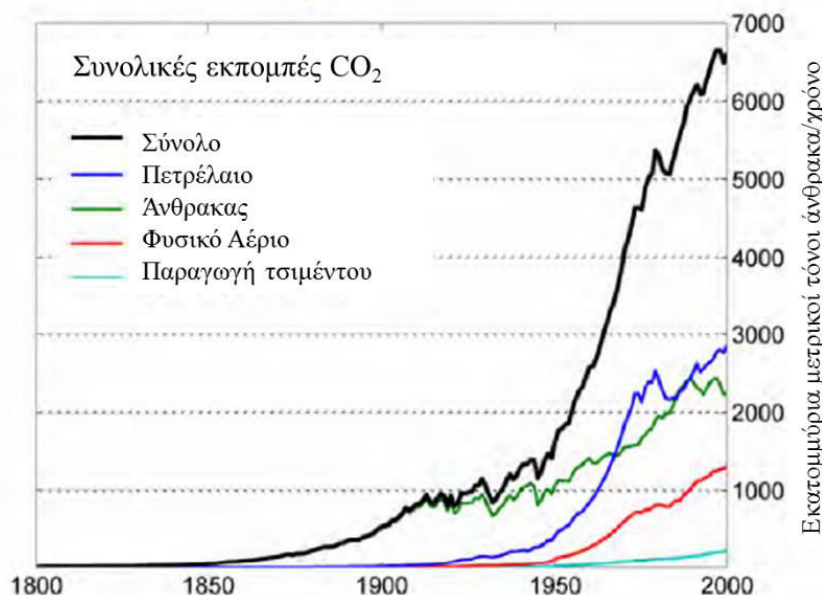
Πίνακας 1: Αποθέματα ορυκτών καυσίμων (x 10¹² kWh)

	Β. ΑΜΕΡΙΚΗ	ΚΕΝΤΡ. & Ν. ΑΜΕΡΙΚΗ	ΔΥΤ. ΕΥΡΩΠΗ	ΑΝ. ΕΥΡΩΠΗ	ΣΥΝΟΛΟ
ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ (1992)	139	124	38	105	406
ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ (1991)	96	54	62	536	748
ΑΝΘΡΑΚΑΣ (1992)	1824	71	716	2292	4903
ΣΥΝΟΛΟ	2059	249	816	2933	6057

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η Ανατολική Ευρώπη είναι ενεργειακά αυτοδύναμη με δυνατότητες ανάπτυξης (ενεργειακής), ενώ η Βόρεια Αμερική και ειδικά η Δυτική Ευρώπη έχουν μεγάλη εξάρτηση από τις παραγωγούς χώρες. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να αναπτύξουν νέες μορφές ενέργειας ώστε να γίνουν ενεργειακά αυτοδύναμες ή τουλάχιστον λιγότερο εξαρτώμενες.

1.3.1 Μόλυνση του περιβάλλοντος

Η αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων προκαλεί ανησυχίες για τη συνεχόμενη μόλυνση του περιβάλλοντος. Τα δύο μεγάλα ενεργειακά ζητήματα που σχετίζονται άμεσα με την παραγωγή ενέργειας είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η έκλυση μεγάλων ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα. Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται η εξέλιξη εκπομπών CO₂ από τα ορυκτά καύσιμα.



Εικόνα 5: Εξέλιξη ρύπων CO₂ (Πηγή: Marland et al., 2003)

Μια σημαντική επισήμανση είναι ότι 900 τόνοι CO₂ ανά δευτερόλεπτο εκλύονται από την καύση ορυκτών καυσίμων. Το ποσοστό αυτό αποτελεί το 82% των ρύπων που ευθύνονται για την κλιματική αλλαγή μαζί με αέρια όπως

το μεθάνιο, το άζωτο κτλ. Η δυσκολία πρόβλεψης του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής έχει ευαισθητοποιήσει τα ισχυρά κράτη μπροστά σε έναν άγνωστο κίνδυνο. Έτσι υπέγραψαν μια σειρά μέτρων γνωστά ως πρωτόκολλο του Κιότο. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο τα συμβαλλόμενα κράτη δεσμεύτηκαν, ανάλογα με το επίπεδο της οικονομικής ανάπτυξης να μειώσουν τις εκπομπές ρύπων ως το 2012 σε σύγκριση με τις εκπομπές του 1990. Έτσι ορίστηκαν τρεις ευέλικτοι μηχανισμοί στήριξης:

- Μηχανισμός καθαρής ανάπτυξης (CDM)
- Προγράμματα από κοινού (JI)
- Εμπορία εκπομπών δικαιωμάτων (IET)

Παρόλα τα προβλήματα και τις προσπάθειες που καταβάλλονται από τις πρώτες ενεργειακές κρίσεις του 1970 το πετρέλαιο συνεχίζει να καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μερίδιο της παγκόσμιας κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας. Το θετικό είναι ότι οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συγκεντρώνουν συνολικά το 80% της συνολικής κατανάλωσης.

Επιπλέον, σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία, η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας αυξήθηκε πάνω από 3% το 2011. Η συνολική παραγωγή γαιάνθρακα αυξήθηκε κατά 6,6% ενώ αυξητικές τάσεις καταγράφηκαν και στα λοιπά ορυκτά καύσιμα με την παγκόσμια ζήτηση πετρελαίου να αυξάνεται κατά 1% και την κατανάλωση φυσικού αερίου κατά 2,1%.



Εικόνα 6: Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (2011)
(Πηγή: [1])

1.4 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα

Η θέσπιση του συστήματος εμπορίας αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου αποτελεί έναν τρόπο μείωσης των εκπομπών αερίων σε παγκόσμια κλίμακα. Η γενίκευση του μέτρου αυτού σε παγκόσμια κλίμακα και όχι μόνο στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), η επέκτασή του και σε άλλα αέρια εκτός θερμοκηπίου ή σε άλλες δραστηριότητες στοχεύει σε ενεργειακή οικονομία πράσινης σχεδίασης.

Οι βασικές διέξοδοι στην προσπάθεια που καταβάλλεται για να μειωθούν τα αέρια του θερμοκηπίου και της περιβαλλοντικής ρύπανσης είναι:

1. Η χρήση εναλλακτικών μορφών ενέργειας (ηλιακή, αιολική, βιομάζα κτλ.)
2. Η εξοικονόμηση ενέργειας (απομόνωση και αποθήκευση του CO₂).
3. Η χρησιμοποίηση της πυρηνικής ενέργειας.

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει την ενεργειακή πυκνότητα ενέργειας των παραπάνω μορφών ενέργειας. Η μέγιστη ηλιακή ισχύς που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης είναι της τάξης των 10 kW/m².

Πίνακας 2: Ισχύς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ανά m² επιφάνειας γης

Άνεμος	3 W/m ²
Βιομάζα	0.5 – 1.5 W/m ²
Φωτοβολταϊκά	3 – 15 W/m ²

Τα ορυκτά και τα πυρηνικά καύσιμα από την άλλη έχουν τεράστια ενεργειακή πυκνότητα. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες τιμές ορυκτών και πυρηνικών υλικών.

Πίνακας 3: Ενεργειακή πυκνότητα ορυκτών και πυρηνικών καυσίμων

	Ενεργειακή πυκνότητα (MJ/kg)	Λόγος προς άνθρακα
Άνθρακας	28	1
Πετρέλαιο	42	1.5
Φυσικό ουράνιο (U – 235)	574 x 10 ³	20 x 10 ³
Φυσικό ουράνιο (σχάση όλου του U-235 σε αναπαραγωγικό αντιδραστήρα)	82 x 10 ⁶	3 x 10 ⁶

Από τον Πίνακα 3 είναι εμφανής ο λόγος που οι ανανεώσιμες πηγές παρόλο που είναι αναγκαίες δεν μπορούν να καλύψουν όλες τις ενεργειακές ανάγκες. Ο λόγος αυτός είναι η ασυνέχειά τους καθώς και η μικρή ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας που τις χαρακτηρίζει. Αντίθετα η πυρηνική ενέργεια από σχάση μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα κάτι το οποίο δεν έχει κατορθώσει καμία άλλη διαθέσιμη πηγή ενέργειας. Σύμφωνα με τον John Rich (2006), η ανθρωπότητα δεν μπορεί να πετύχει θεωρητικά μια παγκόσμια καθαρή επανάσταση χωρίς τεράστια επέκταση της πυρηνικής ενέργειας για:

- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Παραγωγή υδρογόνου και ενέργειας για μπαταρίες για τα οχήματα του μέλλοντος.
- Για αφαλάτωση θαλασσινού νερού ως απάντηση για την ραγδαία επερχόμενη κρίση γλυκού νερού.

Ο όρος «πυκνότητα ισχύος» εκφράζει την πυκνότητα του ενεργειακού περιεχόμενου μιας πηγής ενέργειας. Στα στερεά, υγρά και αέρια ορυκτά \ καύσιμα το ενεργειακό περιεχόμενό τους εκφράζεται ανά μονάδα μάζας ή

όγκου και ορίζεται ως θερμογόνος δύναμη. Πιο συγκεκριμένα, για τα ορυκτά καύσιμα η θερμογόνος δύναμη ορίζεται ως η θερμική ενέργεια που εκλύεται κατά την καύση της μονάδας μάζας ή όγκου του καυσίμου που βρίσκεται σε κανονικές συνθήκες. Διακρίνεται σε κατώτερα και ανωτέρα θερμογόνο δύναμη.

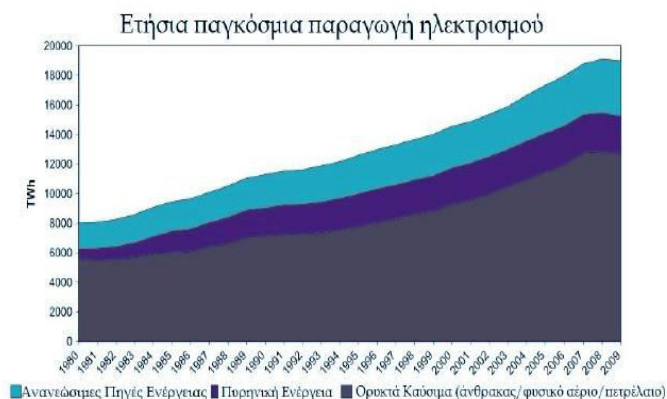
• *Ανωτέρα θερμογόνος δύναμη*

Όταν στα προϊόντα καύσης το νερό, ως προϊόν καύσης, βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, δεν έχει απορροφήσει δηλαδή μέρος από την εκλυόμενη θερμότητα καύσης ως λανθάνουσα θερμότητα, για να εξατμιστεί, η θερμογόνος δύναμη ονομάζεται ανωτέρα.

• *Κατώτερα θερμογόνος δύναμη*

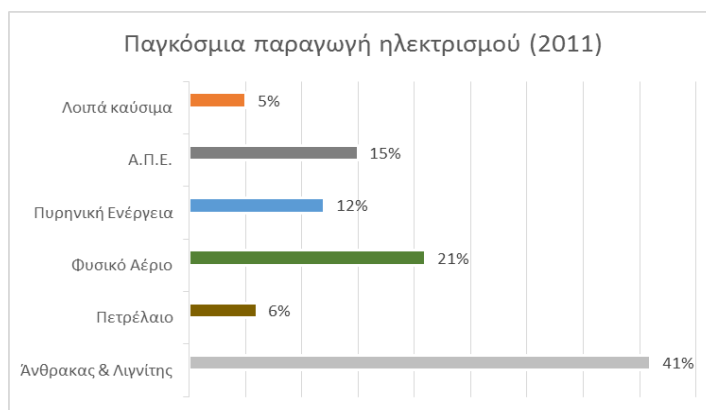
Όταν στα προϊόντα καύσης το νερό βρίσκεται σε αέρια κατάσταση (υδρατμοί), τότε έχει απορροφήσει μέρος από την εκλυόμενη θερμότητα καύσης και η θερμογόνος δύναμη, που έχει, κατά συνέπεια, μικρότερη τιμή από αυτή της ανωτέρας, ονομάζεται κατώτερα θερμογόνος δύναμη.

Στη βιβλιογραφία ασφαλώς υπάρχουν και άλλες απόψεις σχετικά με την επικινδυνότητα, το κόστος, τα κατάλοιπα κτλ.. Αρχικά τονίζεται το μεγάλο κόστος της πυρηνικής ενέργειας και τα ανεπαρκή μέτρα ασφαλείας. Συνίσταται στις κυβερνήσεις να επικεντρωθούν στην έρευνα για επαρκή ποσά ενέργειας από καθαρές, ασφαλείς και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως ο άνεμος, ο ήλιος, η βιομάζα ή η γεωθερμία. Η ενεργειακή πολιτική που πρέπει να ακολουθήσουν στο μέλλον οι χώρες πρέπει να στοχεύει στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στην καλύτερη απόδοση ενέργειας και στην αποθήκευση ενέργειας με ταυτόχρονη υποχώρηση της πυρηνικής τεχνολογίας. Τέλος, η πυρηνική ενέργεια και τα ατυχήματα που προέρχονται από αυτήν συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή καθώς δημιουργούν θανατηφόρα ραδιενεργά απόβλητα ή προκαλούν καταστροφικά πυρηνικά ατυχήματα. Τέλος, υπάρχει και ο κίνδυνος των πυρηνικών όπλων. Βέβαια όπως κάθε είδος τεχνολογίας έχει τις θετικές και τις αρνητικές πτυχές του συνεπάγεται ότι η χρήση της πυρηνικής τεχνολογίας για ηλεκτροπαραγωγή είναι απαραίτητη. Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται η ανακατανομή των ποσοστών που ανήκουν σε κάθε πηγή ενέργειας. Φαίνεται ότι ακόμα τα ορυκτά καύσιμα χρησιμοποιούνται περισσότερο, η πυρηνική ενέργεια έχει αυξησει κατά πολύ το ποσοστό της και ακολουθούν οι ανανεώσιμες πηγές.



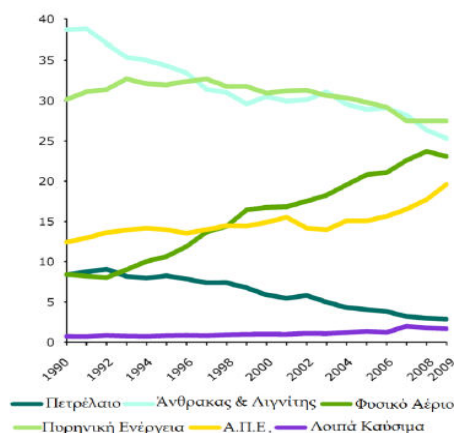
Εικόνα 7: Εξέλιξη παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας ανά τύπο καυσίμου (Πηγή: International Energy Agency – IEA, 1980 – 2009)

Στα τέλη του 2011 στοιχεία υποδεικνύουν ότι τα ορυκτά καύσιμα αντιστοιχούσαν σε ποσοστό 68% της παγκόσμιας ηλεκτροπαραγωγής. Στη συνέχεια ήταν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με ποσοστό 15% και τέλος η πυρηνική ενέργεια με ποσοστό 12%. Το υπόλοιπο 5% αντιστοιχεί σε άλλες πηγές ενέργειας. Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται η διάρθρωση της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρισμού ανά τύπο καυσίμου για το 2011.



Εικόνα 8: Διάρθρωση της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρισμού ανά τύπο καυσίμου για το 2011

Τα παραπάνω στοιχεία αντιστοιχούν σε παγκόσμια ποσοστά. Όσον αφορά την Ευρώπη η ηλεκτροπαραγωγή συμβάδισε με την γενική παγκόσμια τάση και έγινε προσπάθεια να γίνει απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Έτσι αυξήθηκε το ποσοστό του Φυσικού Αερίου εις βάρος του λιγνίτη και του πετρελαίου. Τα τελευταία 20 χρόνια το ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ορυκτά καύσιμα ελαττώθηκε κατά 19%. Τέλος η πυρηνική ενέργεια σταθερά κατέχει σημαντικό ποσοστό (Εικόνα 9) ως μέσο ηλεκτροπαραγωγής. Βέβαια, αυτό το υψηλό ποσοστό οφείλεται σε ορισμένες χώρες. Συγκεκριμένα μόνο 16 χώρες στην Ευρώπη διαθέτουν πυρηνικούς σταθμούς. Χώρες όπως η Νορβηγία, η Δανία, η Ιρλανδία και η Ελλάδα για διάφορους λόγους αυτή τη στιγμή αδυνατούν να υιοθετήσουν στα επόμενα χρόνια την πυρηνική ενέργεια ως μέσο ηλεκτροπαραγωγής.



Εικόνα 9: Διάρθρωση της ηλεκτροπαραγωγής στην Ευρώπη (Πηγή: European Environment Agency, (April 30, 2012), Electricity production by fuel, EU-27) .

1.5 Ηλεκτροπαραγωγή από πυρηνική ενέργεια σε παγκόσμιο επίπεδο

Το ατύχημα που συνέβη το 2011 στο πυρηνικό εργοστάσιο Fukushima της Ιαπωνίας ανέκοψε λίγο το σταθερό ρυθμό που είχε παρουσιάζει η πυρηνική ενέργεια ως μέσο ηλεκτροπαραγωγής. Συγκεκριμένα ως το 2009 είχαν εισαχθεί 7 καινούργια εργοστάσια στο παγκόσμιο δίκτυο και συνολικά η πυρηνική ενέργεια απέδιδε 376 GWe ηλεκτρικής ισχύος. Να σημειωθεί ότι τα μεγάλα εργοστάσια παράγουν 1 GW ηλεκτρικής ισχύος (GWe). Συνεπώς η μονάδα GWyr είναι μια φυσική ποσότητα για να χρησιμοποιηθεί σε θέματα συνολικής παραγωγής ισχύος. Για πληροφοριακούς λόγους ισχύει ότι: 1 GWyr = 8.76×10^9 kWh. Τέλος επισημαίνεται ότι ένα εργοστάσιο 1 GWe δεν παράγει 1 GWyr σε ένα έτος.

Με το ατύχημα όμως 13 σταθμοί απενεργοποιήθηκαν (4 στη Fukushima, 1 στο Ηνωμένο Βασίλειο και 8 στη Γερμανία). Συνεπώς το ποσό της ηλεκτρικής ισχύος στο τέλος του 2011 μειώθηκε κατά 2%. Το ατύχημα αυτό προκάλεσε στασιμότητα στη ραγδαία ανάπτυξη και κατασκευή πυρηνικών σταθμών καθώς από το 2003 ως το 2010 είχαν κατασκευαστεί 16 νέοι αντιδραστήρες ενώ το 2001 μόλις 4 τέθηκαν υπό κατασκευή.

Παρά το ατύχημα του 2011 η χρήση της πυρηνικής ενέργειας δεν ανακόπηκε. Σε παγκόσμια κλίμακα οι κύριοι πυλώνες της παραγωγής μέσω πυρηνικής ενέργειας είναι η Ρωσία, οι ΗΠΑ, η Κίνα και η Ινδία. Αυτές οι χώρες συνέχισαν την εγχώρια ηλεκτροπαραγωγή από πυρηνική ενέργεια και συνέχισαν να παρέχουν την απαιτούμενη τεχνογνωσία σε ανερχόμενα κράτη σε αυτόν τον κλάδο. Το 2012 η Ρωσία παρήγαγε 177.3 TWh (25.424 MWe) και σχεδιάζει την αύξηση του ρυθμού των ενεργών αντιδραστήρων από 31 σε 59. Όλα αυτά για να συμβούν απαιτούν τεράστιο προϋπολογισμό για ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και ικανοποίηση αυστηρότερων προτύπων ασφαλείας. Ως το 2015 42.7 δις δολάρια διατέθηκαν για την πυρηνική ανάπτυξη της χώρας. Εκτός από την ικανοποίηση ενός μεγάλου ποσοστού των ενεργειακών αναγκών της χώρας από την πυρηνική ενέργεια η Ρωσία στοχεύει σε τεράστια έσοδα από πώληση πυρηνικού εξοπλισμού και τεχνογνωσίας.

Η Ινδία με 20 πυρηνικούς αντιδραστήρες αποτελεί την 9^η δύναμη παγκοσμίως στον πυρηνικό κλάδο. Στα μελλοντικά σχέδια είναι να κατασκευαστούν άλλοι 5 και η ισχύς το 2020 να φτάσει τα 20 GWe (ποσοστό 9% συνολικής ηλεκτροπαραγωγής). Η ανερχόμενη δύναμη Κίνα διαθέτει 17 πυρηνικά εργοστάσια και άλλα 30 υπό κατασκευή και αποτελεί την πιο αναπτυσσόμενη χώρα σε αυτό τον τομέα. Η πυρηνική ενέργεια στην Κίνα αντιπροσωπεύει μόλις το 2% της ηλεκτροπαραγωγής της χώρας αλλά αποτελεί την πρώτη επιλογή για την αντικατάσταση του άνθρακα. Τα επόμενα πυρηνικά εργοστάσια της Κίνας θα εξασφαλίσουν 70—75 GWe. Και σε αυτή την περίπτωση επενδύονται τεράστια ποσά στον τομέα της πυρηνικής τεχνολογίας.

Στον Καναδά παρά το ατύχημα του 2011 η Εθνική Επιτροπή Ασφαλείας για την πυρηνική ενέργεια (Canadian Nuclear Safety Commission) ανανέωσε για 5 χρόνια τη σύμβαση λειτουργίας του πυρηνικού εργοστασίου στο Quebec. Στο Μεξικό η πυρηνική ενέργεια ενισχύθηκε κατά 20%. Στις ΗΠΑ ανανεώθηκαν από τη Ρυθμιστική Αρχή για την Πυρηνική Ενέργεια για 20 επιπλέον χρόνια οι άδειες πυρηνικών σταθμών Vermont Yankee, Salem 1 & 2, Prairie Island 1 & 2, Palo Verde 1 & 2, Kewaunee και Hope Creek. Οι

συνολικές άδειες στο διάστημα 2000-2001 έφτασαν τις 71 και άλλες 15 βρίσκονται σε αναμονή.

Όσον αφορά την πυρηνική ενέργεια στην Ευρώπη η πρωτοπόρος Γαλλία με εγκατεστημένη ισχύ 63GW και 74.9% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας από πυρηνική ενέργεια έδωσε άδεια για άλλα 10 χρόνια στον πυρηνικό αντιδραστήρα Fessenheim-1. Επίσης πυρηνικός αντιδραστήρας στην Ισπανία πήρε δεκαετή παράταση λειτουργίας. Επίσης, ολοκληρώθηκε η αναβάθμιση και ο εκσυγχρονισμός των εγκαταστάσεων στη Σλοβακία και στη Φινλανδία.

Από την άλλη πλευρά βέβαια υπάρχουν και περιπτώσεις όπου ο πυρηνικός σχεδιασμός αναθεωρήθηκε ή αναστάλη. Το Βέλγιο επανάφερε την κυβερνητική απόφαση του 2003 για τερματισμό του παλαιότερου πυρηνικού αντιδραστήρα της χώρας μέχρι το 2015. Η γερμανική κυβέρνηση προβλέπει τον παροπλισμό της πυρηνικής ενέργειας από την ηλεκτροπαραγωγή μέχρι το 2022 και ήδη έχουν παροπλιστεί 8 παλιοί αντιδραστήρες. Η Ελβετία αποφάσισε τη σταδιακή κατάργηση των πυρηνικών αντιδραστήρων μέχρι το 2034. Η Ιαπωνία δεσμεύτηκε να επαναπροσδιορίσει την ενεργειακή πολιτική της και τον περιορισμό εξάρτησης από πυρηνική ενέργεια.

Μετά από διεθνείς πιέσεις η Κίνα επειδή ήταν αδύνατο να παροπλίσει την ενεργειακή εξάρτησή της από την πυρηνική ενέργεια αύξησε τις ενεργειακές απαιτήσεις. Στη Γαλλία και την Ινδία το πυρηνικό πρόγραμμα παρέμεινε अपαράλαχτο. Ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency (IAEA)) εκτιμά πως μέχρι το 2030 θα υπάρχει σημαντική αύξηση έως και 100% στο μερίδιο της ηλεκτροπαραγωγής που κατέχει η πυρηνική ενέργεια με την παραγόμενη ισχύ από πυρηνικά εργοστάσια. Οι πιο αισιόδοξες προβλέψεις είναι μέχρι και 746 GWe και το μεγαλύτερο μέρος θα συμβεί σε χώρες που έχουν ήδη πυρηνική υποδομή.

1.6 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα

Η μη συμμετρική κατανομή του πληθυσμού της Ελλάδας με 3 μεγάλα αστικά κέντρα (Αθήνα, Θεσσαλονίκη και Πάτρα) όπου πραγματοποιείται το σύνολο σχεδόν της κατανάλωσης και με τα πολλά μικρά νησιά δημιουργεί ιδιομορφίες. Η Δυτική Μακεδονία με τα πλούσια κοιτάσματα σε λιγνίτη παράγει πάνω από το 50% της ηλεκτροπαραγωγής με θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Βέβαια δημιουργούνται αυξημένες απώλειες κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στα αστικά κέντρα κατανάλωσης. Σημαντικά αποθέματα λιγνίτη βρίσκονται επίσης και στη Δράμα και στη Μεγαλόπολη.

Οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί στην Ελλάδα καταλαμβάνουν το 66.5 % της εγκατεστημένης ισχύος της ηλεκτροπαραγωγής. Οι σταθμοί που εξαρτώνται από λιγνίτη αντιστοιχούν σε 4579MW, από πετρέλαιο σε 730MW και από φυσικό αέριο 4579MW. Επίσης, ποσοστό της τάξεως του 19.6% αντιστοιχεί σε υδροηλεκτρικά εργοστάσια και το υπόλοιπο 13.9% σε μονάδες ΑΠΕ (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας). Το ενεργειακό ισοζύγιο στην Ελλάδα διαμορφώνεται περίπου σε 57TWh όπου τα ποσοστά του ενεργειακού ισοζυγίου σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ) για το 2011 είναι:

▪ Λιγνίτης	53,15%
▪ Φυσικό Αέριο	28,3%

ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

- Πετρέλαιο 10,2%
- Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί 4,2%
- ΑΠΕ 4,15%

Όπως υποδηλώνουν τα επίσημα στοιχεία ο λιγνίτης προπορεύεται στην ηλεκτροπαραγωγή της Ελλάδας και σημαντική άνοδο παρουσιάζει το φυσικό αέριο. Ανερχόμενη δύναμη είναι οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας αν και υπάρχει μεγάλη απόκλιση από τους στόχους για τις ΑΠΕ για συμμετοχή μέχρι και 34% στο ποσοστό ηλεκτροπαραγωγής στο τέλος του 2020. Αναμένεται ο ηγετικός ρόλος που έχουν τα αιολικά πάρκα να μειωθεί από τα φωτοβολταϊκά.



Εικόνα 10: Εθνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (Πηγή: Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, [2])

1.6.1 Λιγνίτης

Ο λιγνίτης είναι ένα από τα πιο φτωχά ορυκτά καύσιμα και υπάρχουν μεγάλα αποθέματα στην Βόρεια Ελλάδα και στην περιοχή της Μεγαλόπολης. Υπολογίζεται ότι τα αποθέματα αυτά επαρκούν για κάλυψη ενεργειακών αναγκών για τα επόμενα πενήντα χρόνια. Συνεπώς, αποτελεί τη βάση της εγχώριας ηλεκτροπαραγωγής. Επίσης, το πλεονέκτημα του λιγνίτη είναι ότι επιτυγχάνει μεγάλους βαθμούς απόδοσης ανά μικρό κόστος μονάδας ενέργειας.

Η διαδικασία μεταφοράς του λιγνίτη από το σημείο εξόρυξης στο λιγνιτικό ατμοηλεκτρικό σταθμό γίνεται συνήθως με ιμάντες μεταφοράς. Από εκεί το

καύσιμο μεταφέρεται στο λέβητα για καύση. Υπάρχουν τρεις βασικές τεχνολογίες συστημάτων καύσης:

- Σταθερής κλίνης
- Ρευστοποιημένης κλίνης καυστήρες
- Αεριοποιημένος λιγνίτης



Εικόνα 11: Λιγνιτωρυχείο Πτολεμαΐδας (Πηγή: [3])

Βέβαια όπως και κάθε ορυκτό καύσιμο έτσι και ο λιγνίτης κατά την καύση του εκπέμπει ποσότητες αέριων ρύπων με πιο σημαντικούς το διοξείδιο του άνθρακα CO_2 , τα οξείδια του θείου SO_x , του αζώτου NO_x καθώς και αιωρούμενα σωματίδια. Η βελτίωση κάποιων παραμέτρων όπως η ροή αέρα εντός του λέβητα, η βελτίωση της καύσης, η χρήση φίλτρων περιορίζουν κάπως την εκπομπή ρύπων. Εκτός από τα αέρια και τα αιωρούμενα εκλυόμενα σωματίδια οι λιγνιτικοί σταθμοί παράγουν και υγρά βιομηχανικά απόβλητα και στερεά κατάλοιπα όπως η τέφρα, ο γύψος κατά την αποθείωση και η ουρία από την απονίτρωση. Μερικά από αυτά τα κατάλοιπα μεταπωλούνται σε άλλους κλάδους όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκεί, όπως για παράδειγμα στην οδοποιία. Δυστυχώς τα υπόλοιπα αν και επεξεργάζονται τις πιο πολλές φορές καταλήγουν σε μόλυνση του πλανήτη είτε λόγω υγειονομικής ταφής είτε επειδή εκλύονται σε ρέματα και άλλους υδροφόρους ορίζοντες.

Στην Εικόνα 12 που ακολουθεί παρουσιάζεται το κόστος εγκατάστασης ενός λιγνιτικού σταθμού και το οποίο είναι περίπου 2000 €/kW εγκατεστημένης ισχύος.

ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

2005€/kW	2010	2015	2020	2025	2030
Συνδυασμένος Κύκλος Φυσικού Αερίου ^{4*}	700	700	700	700	700
Αεριοστρόβιλος Φυσικού Αερίου ^{4*}	450	450	450	450	450
Αντλητικά Υ/Η ^{2*}	1900	1900	1900	1900	1900
Μικρά Υ/Η ^{2*}	1500	1500	1500	1500	1500
Φ/Β συστήματα οικιακός τομέας ¹	3300	2740	2180	1815	1450
Φ/Β συστήματα εμπορικός τομέας ¹	3000	2410	1820	1515	1210
Φ/Β συστήματα τομέας ηλεκτροπαραγωγής ¹	2800	2125	1450	1210	970
Θερμικά Ηλιακά Συστ. Ηλεκτροπαραγωγής	4800	4580	4360	4150	3930
Ανεμογεννήτριες Διασυνδεδεμένο	1300	1300	1300	1300	1300
Ανεμογεννήτριες σε Νησιά	1500	1500	1500	1500	1500
Ανεμογεννήτριες σε Υπεράκτια Πάρκα ^{2*}	2800	2800	2800	2800	2800
Γεωθερμία ^{3*}	2200	2200	2200	2200	2200
Λιγνιτικός Σταθμός ^{4*}	2000	2000	2000	2000	2000
Συμπαγωγή με Βιοαέριο ^{3*}	3700	3700	3700	3700	3700
Συμπαγωγή με Στερεά Βιομάζα ^{3*}	3300	3300	3300	3300	3300

Εικόνα 12: Κόστος εγκατάστασης μονάδας ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Πηγή: Μαρία Λοϊζίδου-Μαλαμή, Ενεργειακές προοπτικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής)

1.6.2 Φυσικό Αέριο

Το Φυσικό Αέριο αποτελεί την καθαρότερη πηγή ενέργειας αν εξαιρέσει κανείς τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Αποτελείται από μίγμα καύσιμων αερίων και κύριο συστατικό είναι το μεθάνιο. Τα τελευταία χρόνια το ποσοστό χρήσης του φυσικού αερίου στην ηλεκτροπαραγωγή σημειώνει άνοδο κυρίως επειδή έχει πολύ καλή ποιότητα καύσης και χαμηλή περιεκτικότητα ρυπογόνων ουσιών. Κατά την καύση του Φ.Α. εκπέμπεται 43% λιγότερο CO₂ από το λιθάνθρακα και 30% λιγότερο από το πετρέλαιο. Επίσης σημαντικά λιγότερα είναι τα ποσοστά έκλυσης ρυπογόνων σωματιδίων σε σχέση με τους λιγνιτικούς σταθμούς. Τέλος δεν παράγει στερεά απόβλητα όπως τα ορυκτά καύσιμα, όπως η τέφρα. Βέβαια κανένα ορυκτό καύσιμο δεν είναι άψογο οπότε και σε αυτή την περίπτωση εκλύεται μεγάλη ποσότητα μεθανίου που αποτελεί σημαντικό αέριο ρύπο για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με την Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) η καύση φυσικού αερίου παράγει μικρότερες ποσότητες βλαβερών ουσιών σε σχέση με το πετρέλαιο και το λιθάνθρακα.

Για το κόστος εγκατάστασης μονάδας φυσικού αερίου με αεριοστρόβιλους ανοικτού ή κλειστού τύπου απαιτούνται σχεδόν 3 χρόνια για την κατασκευή, κόστος 500-600€/ kW παραγόμενης ισχύος. Ο μέσος χρόνος λειτουργίας τέτοιων μονάδων είναι 20-25 χρόνια με έναν αριθμό εργαζομένων 50 άτομα περίπου.

Στην Ελλάδα τον Απρίλιο του 2015 η ΔΕΗ συγχρόνισε στο δίκτυο τη γεννήτρια του αεριοστρόβιλου 2 της νέας μονάδας φυσικού αερίου (Εικόνα 13) της ΔΕΗ στη Μεγαλόπολη. Αυτή ήταν στην ουσία η πρώτη φορά που η νέα μονάδα συνδέεται με το διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτροδότησης της

χώρας. Η μονάδα 5 βρίσκεται στο στάδιο δοκιμαστικής λειτουργίας της και ακόμα υπάρχουν αρκετές δοκιμές για να γίνουν και αρκετοί μήνες μέχρι να παραδοθεί κανονικά. Προς το παρόν η ενέργεια που θα παράγεται δεν θα ξεπεράσει τα 280 MW από τα 811 MW που είναι η ονομαστική ισχύς της μονάδας.



Εικόνα 13: Δοκιμαστική μονάδα φυσικού αερίου ΔΕΗ Μεγαλόπολης
(Πηγή: [4])

1.6.3 Πετρελαϊκοί Σταθμοί

Μετά την ενεργειακή κρίση του 1970 η άνοδος της τιμής του πετρελαίου και τα συνεχώς μειούμενα αποθέματα οδήγησαν σε σταδιακή αντικατάστασή του από άλλες πηγές. Βέβαια ακόμα και έτσι το πετρέλαιο χρησιμοποιείται ευρέως στην ηλεκτροπαραγωγή. Στις χώρες της Μέσης Ανατολής το ποσοστό του πετρελαίου στην ηλεκτροπαραγωγή αγγίζει ακόμα και το 100% σε ορισμένες περιπτώσεις.

Το αργό πετρέλαιο παράγει κατά την απόσταξη του πολλά προϊόντα αλλά στην ηλεκτροπαραγωγή χρησιμοποιούνται μόνο δύο:

- A) το μαζούτ σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς
- B) το ντίζελ (σε αεριοστροβιλικούς σταθμούς)

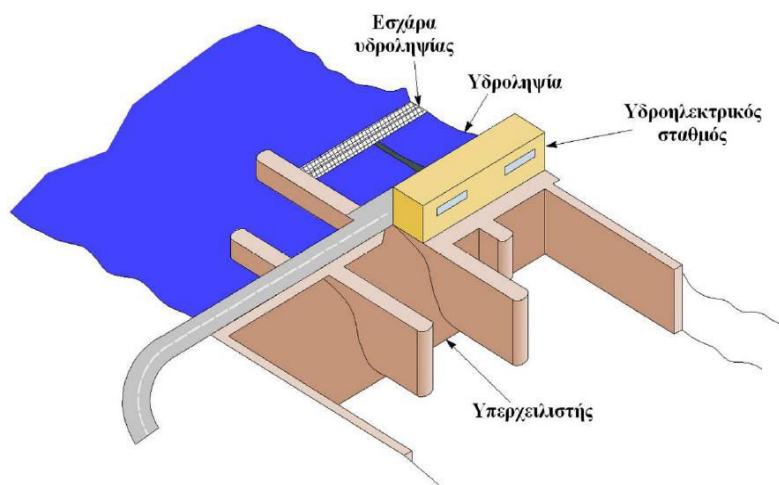
Οι αεριοστροβιλικοί σταθμοί με ντίζελ έχουν μικρό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης αλλά και χαμηλό βαθμό απόδοσης. Υπάρχουν ελάχιστοι τέτοιοι συνδεδεμένοι σε δίκτυα.

Στην Ελλάδα τέτοιοι σταθμοί βρίσκονται σε περιοχές όπως τα νησιά όπου η μεταφορά ορυκτού καυσίμου τύπου λιγνίτη έχει μεγάλο κόστος ή είναι αδύνατη. Επίσης σε τέτοιες περιπτώσεις χρειάζεται καύσιμο με υψηλότερη θερμογόνο δύναμη. Τέλος οι πετρελαϊκοί σταθμοί έχουν λιγότερες εκπομπές αερίων ρύπων. Στην Ελλάδα ο πιο χαρακτηριστικός πετρελαϊκός σταθμός είναι ο θερμικός σταθμός στο Λαύριο.

1.6.4 Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί (ΥΗΣ)

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζονται στον κύκλο του νερού και τη δυναμική που παρέχει η κίνησή του ωστόσο απαιτούνται κάποιες μετατροπές/υποδομές για την εκμετάλλευσή του. Συνοπτικά για έναν υδροηλεκτρικό σταθμό χρειάζεται η κατασκευή ενός φράγματος για τη δημιουργία ενός ταμιευτήρα (λίμνη) ώστε να τροφοδοτούνται οι υδροστρόβιλοι.

Το κόστος μιας τέτοια μονάδας είναι τεράστιο αλλά συνήθως γίνεται συνδυασμός πολλών εφαρμογών για παροχή νερού για ύδρευση, άρδευση και αντιπλημμυρική προστασία. Γενικά θεωρούνται οι ΥΗΣ ότι είναι μια καθαρή μορφή ενέργειας χωρίς αέρια θερμοκηπίου. Μια μέση ετήσια παραγωγή τάξεως 5000 GWh από ΥΗΣ μειώνει το CO₂ κατά 3-8 εκατ. τόνους/έτος.



Εικόνα 14: Τυπική διάταξη μικρού ΥΗΕ ροής, χαμηλής υδραυλικής πτώσης, στο οποίο ο ΥΗΣ είναι ενσωματωμένος στο φράγμα-εκχειλιστή (Πηγή: Δημήτριος Παπαντώνης. Μικρά υδροηλεκτρικά έργα. Αθήνα 2008.)

2 ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ

2.1 Θεωρία και φυσική της πυρηνικής ενέργειας

Η βασική μονάδα της ύλης είναι το άτομο και χαρακτηρίζεται από δύο αριθμούς:

- Ατομικός αριθμός Z : ο αριθμός των πρωτονίων στο πυρήνα.
- Μαζικός αριθμός A : ο αριθμός των πρωτονίων και των νετρονίων στον πυρήνα.

Οι πυρηνικές δυνάμεις είναι οι ελκτικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στη μάζα του πυρήνα όπου τα νετρόνια και τα πρωτόνια συγκρατούνται και ταυτόχρονα υπερνικούν τις απωστικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις μεταξύ των θετικά φορτισμένων πρωτονίων. Η εμβέλεια αυτών των δυνάμεων περιορίζεται σε αποστάσεις τάξεις μεγέθους του πυρήνα δηλαδή είναι της τάξεως 10^{-12} cm. Η ενέργεια της σταθερής οντότητας που ονομάζεται πυρήνας είναι χαμηλότερη από εκείνη των συστατικών του. Συνεπώς, για να γίνει διάσπαση του πυρήνα πρέπει να προσφερθεί ενέργεια. Η προσφερόμενη αυτή ενέργεια ονομάζεται ενέργεια σύνδεσης ή συνοχής. Η μάζα οποιουδήποτε πυρήνα είναι μικρότερη από το άθροισμα της μάζας των νουκλεονίων που τον συγκροτούν και ονομάζεται έλλειμα μάζας και ισοδυναμεί με την ενεργειακή διαφορά ανάμεσα στα ελεύθερα νουκλεόνια και τον πυρήνα.

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \quad (1)$$

Ο πυρήνας είναι ένα κβαντομηχανικό σύστημα και η εσωτερική του ενέργεια λαμβάνει συγκεκριμένες τιμές οι οποίες ονομάζονται στάθμες ενέργειας και έχουν μονάδα το ηλεκτρονιοβόλτ, eV. Η χαμηλότερη στάθμη ονομάζεται θεμελιώδης κατάσταση και η υπόλοιπες ονομάζονται καταστάσεις διέγερσης. Ένας πυρήνας σε κατάσταση διέγερσης είναι ασταθής και τείνει να επιστρέψει στη θεμελιώδη κατάσταση και με αυτό τον τρόπο απελευθερώνεται ενέργεια. Πολλοί φυσικοί πυρήνες είναι ασταθείς και είναι μεγάλοι σε μέγεθος. Αυτοί οι πυρήνες ονομάζονται ραδιενεργοί, δηλαδή μπορούν να μετατραπούν σε άλλον πυρήνα και να εκπέμπουν σωματίδια ή να μεταπηδήσουν σε άλλη ενεργειακή στάθμη με εκπομπή φωτονίων χωρίς εξωτερική διέγερση. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται ραδιενεργός διάσπαση. Ο πυρήνας που διασπάται είναι ο μητρικός και αυτός που δημιουργείται είναι ο θυγατρικός. Τα σωματίδια που εκπέμπονται φέρουν σημαντική ενέργεια και αποτελούν τη ραδιενεργό ακτινοβολία.

Ο πιο γνωστός όρος ραδιενέργεια ορίζεται ως η ιδιότητα της αυθόρμητης διάσπασης, δηλαδή της διάσπασης χωρίς εξωτερική διέγερση, των ραδιενεργών πυρήνων, με ταυτόχρονη εκπομπή ραδιενεργών ακτινοβολιών. Τα πιο γνωστά εκπεμπόμενα σωματίδια είναι τα ραδιονουκλίδια (σωματίδια α , β^- , νετρίνα, αντινετρίνα, ακτινοβολία γ , ποζιτρόνια β^+). Η πιθανότητα

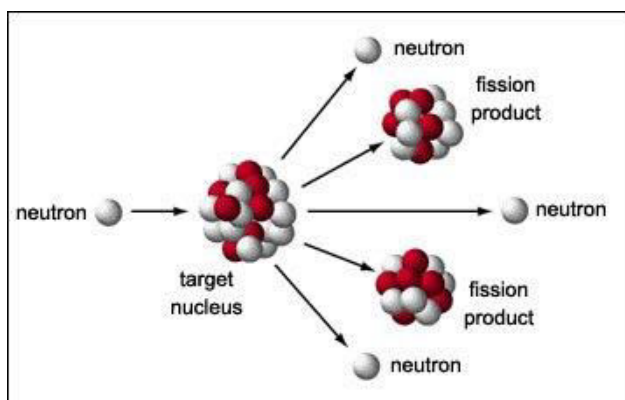
διάσπασης ενός ραδιενεργού πυρήνα σε ένα μικρό χρονικό διάστημα Δt είναι χαρακτηριστικό του είδους του πυρήνα και ανεξάρτητο της προηγούμενης ζωής του. Σύμφωνα με τη κβαντομηχανική υπάρχει μια μικρή αλλά πεπερασμένη πιθανότητα ο πυρήνας να τεμαχιστεί χωρίς την ύπαρξη κάποιας εξωτερικής διέγερσης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αυθόρμητη σχάση και παρατηρείται σε βαρείς πυρήνες, αν και είναι εξαιρετικά σπάνιο. Σχάσιμα ισότοπα ονομάζονται αυτά που έχουν βαρείς πυρήνες σε κατάσταση διέγερσης με μεγάλη πιθανότητα σχάσης όταν απορροφήσουν ένα ηλεκτρόνιο. Ως τέτοιο μόνο το ουράνιο U-235 βρίσκεται στη φύση σε σημαντικές ποσότητες. Το υπόλοιπο φυσικό ουράνιο, εκτός από κάποια ίχνη U-234 (περιεκτικότητα μικρότερη από 0,005% κατά βάρος), αποτελείται από U-238 σε ποσοστό 99,28% κατά βάρος. Για άλλα ισότοπα όπως το Th-232 χρειάζεται και ενέργεια σύνδεσης νετρονίων και επιπλέον κινητική ενέργεια.

Πυρηνική ή ατομική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τον μετασχηματισμό των ατομικών πυρήνων, ήτοι τις πυρηνικές αντιδράσεις. Πυρηνική αντίδραση ονομάζεται κάθε διαδικασία με την οποία μεταβάλλεται το ζεύγος (Z, A-Z) ή/και ενεργειακή κατάσταση του πυρήνα. Η πυρηνική ενέργεια είναι η δυναμική ενέργεια που υπάρχει αποθηκευμένη στον πυρήνα του ατόμου ως αποτέλεσμα των πυρηνικών δυνάμεων που ασκούνται μεταξύ των νουκλεονίων. Για να προκληθεί αυτή η αντίδραση απαιτείται πρόσκρουση ενός σωματιδίου βλήματος στον πυρήνα. Ο πυρήνας αποκτά επιπλέον ενέργεια από τη θεμελιώδη και η αντίδραση πραγματοποιείται σε 2 στάδια:

- Το νουκλεόνιο ενώνεται με τον πυρήνα και δημιουργείται ένας διεγερμένος σύνθετος πυρήνας.
- Ο σύνθετος πυρήνας διασπάται στα τελικά προϊόντα.

Επιγραμματικά αναφέρονται σε λίστα παρακάτω οι κατηγορίες αντιδράσεων με νετρόνια:

1. Ραδιενεργός σύλληψη (n, γ)
2. Εκπομπή φορτισμένων σωματιδίων
3. Ανελαστική σκέδαση
4. Ελαστική σκέδαση (n, n)
5. Αντίδραση (n, 2n)
6. Σχάση (Εικόνα 15)
7. Πυρηνική σύντηξη



Εικόνα 15: Προϊόντα πυρηνικής σχάσης (Πηγή: [5])

2.2 Πυρηνικοί αντιδραστήρες – τεχνολογική εξέλιξη

2.2.1 Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας των πυρηνικών αντιδραστήρων στηρίζεται στο φαινόμενο της σχάσης. Ένας πυρήνας ουρανίου U-235 συγκρούεται με ένα νετρόνιο και προκύπτει ένας σύνθετος πυρήνας σε διεγερμένη κατάσταση και στη συνέχεια χωρίζεται σε δύο μεγάλα τμήματα και απελευθερώνει ενέργεια μαζί με έναν μικρό αριθμό νετρονίων. Η ενέργεια αυτή είναι στο μεγαλύτερο μέρος της σε μορφή θερμότητας. Στον πυρηνικό αντιδραστήρα τα νετρόνια που απορρίπτει ο ένας διεγερμένος πυρήνας απορροφώνται από άλλους πυρήνες και ενεργοποιούν ξανά την ίδια διαδικασία που καλείται αλυσιδωτή αντίδραση. Στην ουσία η σχάση παράγει θερμότητα και το υλικό αναπαραγωγή της, τα νετρόνια. Για την εκμετάλλευση της θερμότητας υπάρχει ψυκτικό υλικό που απάγει τη θερμότητα και την μεταφέρει εκτός πυρήνα για τελική χρήση, στην περίπτωση αυτή για ηλεκτροπαραγωγή. Ο έλεγχος της ισχύος γίνεται με τον έλεγχο της παραγωγής νετρονίων δηλαδή ελέγχεται το ισοζύγιο του ρυθμού παραγωγής-απώλειας νετρονίων. Ορίζεται ο συντελεστής πολλαπλασιασμού k :

$$k = \frac{\text{Αριθμός σχάσεων σε μία γενιά}}{\text{Αριθμός σχάσεων προηγούμενης γενιάς}} \quad (2)$$

- $k > 1$: υπερκρίσιμο σύστημα διότι αυξάνεται ο ρυθμός παραγωγής νετρονίων.
- $k < 1$: υποκρίσιμο σύστημα, μειώνεται ο αριθμός των σχάσεων με το χρόνο.
- $k = 1$: Κρίσιμο σύστημα, σταθερός αριθμός σχάσεων.

2.2.2 Πυρηνικά καύσιμα

Όλοι οι αντιδραστήρες που βρίσκονται σε λειτουργία χρησιμοποιούν καύσιμα που βασίζονται στο ουράνιο (U) και σε κάποιες περιπτώσεις στο πλουτώνιο (Pu). Οι πιο γνωστές μορφές καυσίμου έχουν τη μορφή:

- Οξειδίου του φυσικού ουρανίου (UO₂) – Αντιδραστήρες CANDU.
- Οξειδίου του ουρανίου (UO₂) με εμπλουτισμένο ουράνιο U-235 σε αναλογία 1,5 – 4% - Αντιδραστήρες CANDU, BWR, PWR).
- Οξειδίου μίγματος ουρανίου και πλουτωνίου (Mixed Oxide MOX, (UPu)O₂, με βάση το φυσικό ή απεμπλουτισμένο ουράνιο 0,2% ²³⁵U). Η αναλογία ουρανίου και πλουτωνίου είναι 95% U, 5% Pu (αντιδραστήρες PWR) ή 75% U, 25% Pu (αντιδραστήρες LMFBR).

Όταν το σύστημα είναι υποκρίσιμο, δηλαδή το καύσιμο δε συμβάλλει σε αλυσιδωτή αντίδραση τότε το εξαντλημένο καύσιμο διαχειρίζεται ως εξής:

- επανεπεξεργασία του καυσίμου για την ανάκτηση του ουρανίου (απεμπλουτισμένο U) και του πλουτωνίου, και τη χρήση τους στην κατασκευή καυσίμου (MOX).
- αποθήκευση του καυσίμου σε ειδικούς χώρους εναπόθεσης χωρίς να υπάρχει η πρόθεση ανάκτησής τους.

Όταν το πυρηνικό καύσιμο ουράνιο περιέχει U-235 σε ποσοστό μεγαλύτερο του 0.7% κατά βάρος του φυσικού ουρανίου τότε ονομάζεται εμπλουτισμένο. Εμπλουτισμός καυσίμου ονομάζεται ο λόγος της μάζας U-235 προς τη μάζα U-235 και U-238 του καυσίμου. Σε σύγχρονους αντιδραστήρες ο εμπλουτισμός φτάνει ως και 3% περίπου. Το φυσικό ουράνιο χαρακτηρίζεται από ένα συντελεστή η ($\eta = 1.33$). Με τον εμπλουτισμό ο συντελεστής αυτός αυξάνεται και αυτό επιτυγχάνει την επίτευξη καλύτερων συστημάτων εντός του αντιδραστήρα. Βέβαια η διαδικασία εμπλουτισμού κοστίζει πολύ και δημιουργεί ανάγκες για συγκεκριμένες εγκαταστάσεις και τεχνολογία που έχει σα συνέπεια εξαρτήσεις από άλλα κράτη.

Ως κύκλος πυρηνικού καυσίμου ορίζεται μια σειρά από βιομηχανικές και πυρηνικές διεργασίες που αφορούν την παραγωγή ηλεκτρισμού από πυρηνικούς αντιδραστήρες σχάσεως. Ο κύκλος ξεκινά με την εξόρυξη του ουρανίου από το έδαφος και ολοκληρώνεται με τη διάθεση ραδιενεργών καταλοίπων που παράγονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του κύκλου όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 16.

Τα βασικά βήματα του κύκλου του πυρηνικού καυσίμου είναι:

1. Εξόρυξη και κατεργασία του ορυκτού ουρανίου.
2. Καθαρισμός και μετατροπή.
3. Εμπλουτισμός.
4. Κατασκευή καυσίμου.
5. Εξαντλημένο καύσιμο.
6. Επανεπεξεργασία και ανακύκλωση.
7. Διάθεση του εξαντλημένου καυσίμου
8. Κατάλοιπα
 - i. Χαμηλής ραδιενέργειας, που παράγονται σε όλα τα στάδια του κύκλου. (Low Level Waste, LLW).
 - ii. Μεσαίας ραδιενέργειας που παράγονται κατά τη λειτουργία του αντιδραστήρα και κατά την επανεπεξεργασία του καυσίμου. (Intermediate Level Waste, ILW).
 - iii. Υψηλής ραδιενέργειας τα οποία περιλαμβάνουν προϊόντα σχάσης ή σε πολλές περιπτώσεις είναι το ίδιο εξαντλημένο καύσιμο. (High Level Waste, HLW).

Όλα τα στάδια του κύκλου πυρηνικού καυσίμου παράγουν κατάλοιπα, για τα οποία απαιτείται προσεκτική διαχείριση και συγκράτησή τους για λόγους ασφαλείας. Η επανεπεξεργασία ενός τόνου εξαντλημένου καυσίμου παράγει:

- 0.1 m³ HLW, περιέχοντας περίπου το 99% της ραδιενέργειας του εξαντλημένου καυσίμου.
- 1 m³ ILW, περιέχοντας περίπου το 1% της ραδιενέργειας του εξαντλημένου καυσίμου.
- 4 m³ LLW, περιέχοντας το 0.001% της ραδιενέργειας του εξαντλημένου καυσίμου.

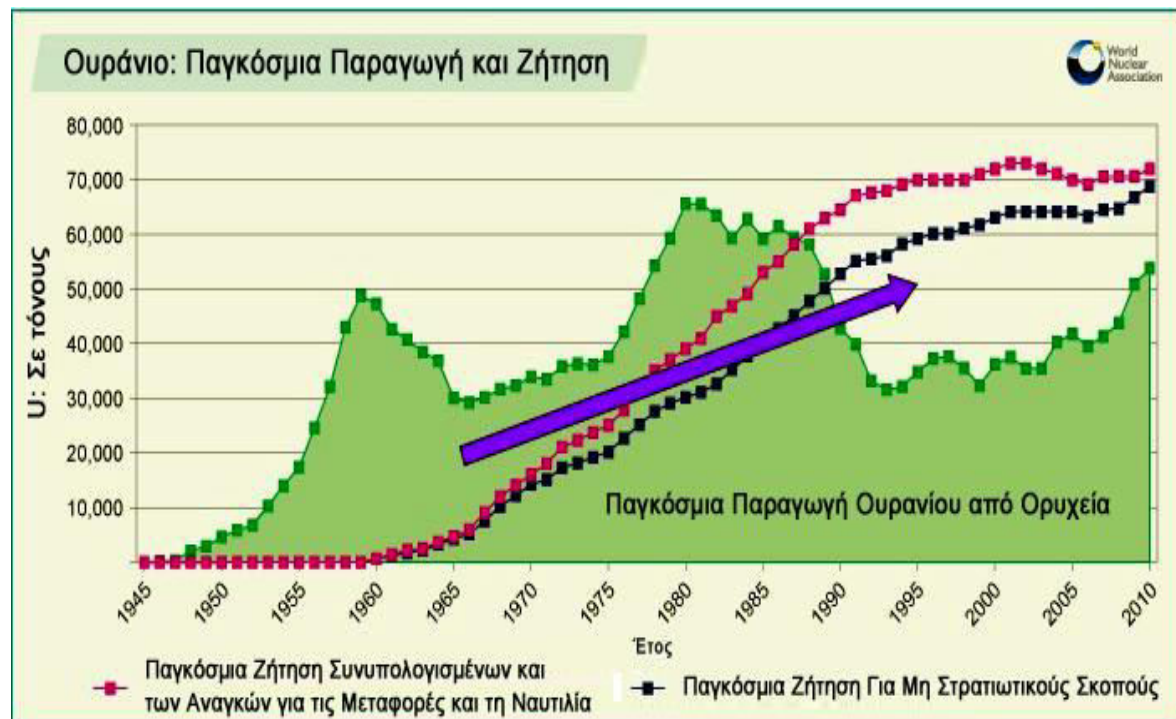
Στην Ελλάδα κοιτάσματα ουρανίου υπάρχουν το υπέδαφος της Βόρειας Ελλάδας στην περιοχή των Σερρών και της Δράμας και υπολογίζεται ότι φτάνουν τους 10.000 τόνους. Σύμφωνα με το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) υπάρχουν κοιτάσματα και στο Β. Αιγαίο. Οι

Σε παγκόσμια κλίμακα στην Εικόνα 18 παρουσιάζονται οι δέκα μεγαλύτεροι παραγωγοί ουρανίου. Οι κυριότερες πηγές παραγωγής ουρανίου εντοπίζονται στο Καζακιστάν, τον Καναδά, την Αυστραλία, το Νίγηρα, τη Ναμίμπια και τη Ρωσία.

Top 10 Producing Countries 2014		
Country	Output (tU)	% of World
Kazakhstan	23,127	41%
Canada	9134	16%
Australia	5001	9%
Niger	4057	7%
Namibia	3255	6%
Russia	2990	5%
Uzbekistan	2400	4%
USA	1919	3%
China	1500	3%
Ukraine	962	2%
All Other		3%
Top 10 Total	54,345	97%

Εικόνα 18: Παραγωγή Ουρανίου σε παγκόσμια κλίμακα (2014)
(Πηγή: [7])

Στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται το γράφημα της παγκόσμιας ζήτησης ουρανίου σε τόνους για ανάγκες ναυτιλίας, μεταφορών και για μη στρατιωτικούς σκοπούς.



Πηγή :World Nuclear Association

Εικόνα 19: Ουράνιο: Παγκόσμια Παραγωγή και Ζήτηση
(Πηγή: World Nuclear Association)

2.2.3 Δομή Πυρηνικών αντιδραστήρων

Πυρηνικός αντιδραστήρας ονομάζεται μια διάταξη κατάλληλα σχεδιασμένη για να πραγματοποιεί ελεγχόμενη αυτοσυντήρητη αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης. Το κεντρικό τμήμα ενός αντιδραστήρα είναι ο πυρήνας (core). Στον πυρήνα βρίσκονται οι ράβδοι καυσίμου, ο επιβραδυντής και οι ράβδοι ελέγχου. Η δομή της καρδιάς του πυρήνα αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία σε συνοπτική περιγραφή:

- Τοιχώματα δοχείου πίεσεως
- Κατασκευές υποστήριξης
- Κατασκευές υποστήριξης καυσίμου
- Κατασκευές οδηγών των διατάξεων ελέγχου και διακοπής
- Κατασκευές υποστήριξης οργάνων μέτρησης εντός του πυρήνα



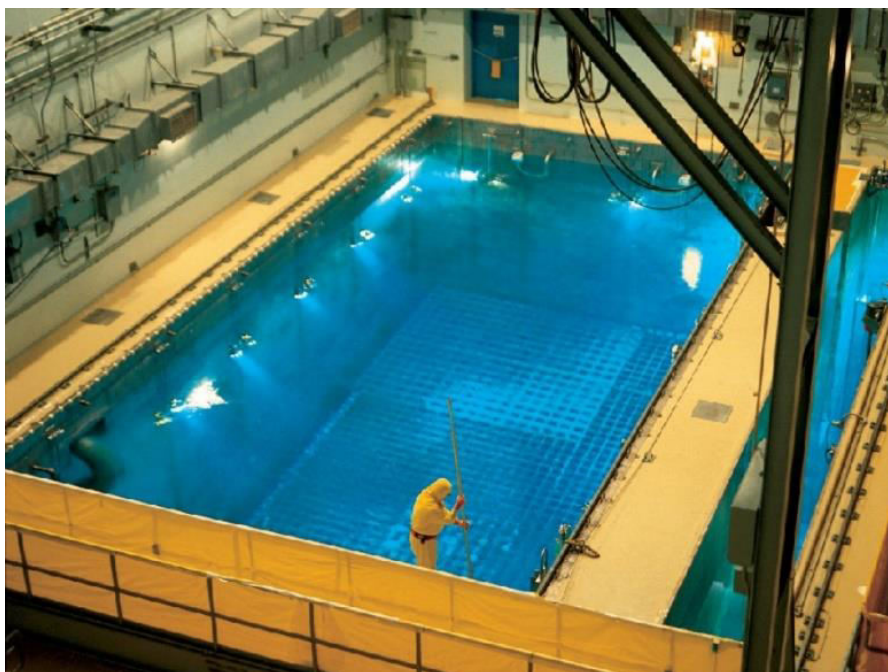
Εικόνα 20: Φωτογραφία του πυρήνα WWER-1000 (Πηγή: [8])

Το πυρηνικό καύσιμο περιέχει του πυρήνες που θα υποστούν σχάση. Το υλικό αυτό είναι υπεύθυνο για την αυτοσυντήρητη αλυσιδωτή αντίδραση και είναι στις περισσότερες εφαρμογές εμπλουτισμένο ουράνιο που βρίσκεται μέσα σε δισκία. Τα δισκία αυτά βρίσκονται μέσα σε ράβδους καυσίμου (fuel rod) ή συστάδες καυσίμου (fuel assembly) όπως φαίνεται στην Εικόνα 21.



Εικόνα 21: Ράβδοι καυσίμου CANDU (Πηγή: [9])

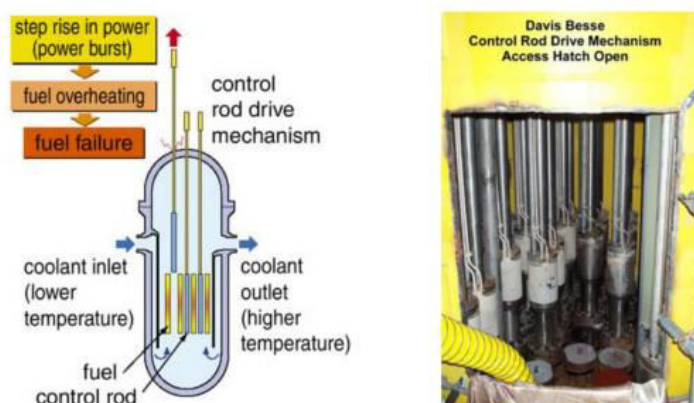
Η συστάδα αποτελεί τη μικρότερη μονάδα καυσίμου που μπορεί να τοποθετηθεί σε έναν αντιδραστήρα. Ο πυρήνας αποτελείται από μερικές εκατανόδες συστάδων. Κατά τη χρήση του πυρηνικού καυσίμου λόγω των σχάσεων παρατηρείται σταδιακά εξάντληση πυρηνικού καυσίμου (fuel burnup). Όταν η εξάντληση ξεπεράσει κάποιο κρίσιμο σημείο οι συστάδες αντικαθίστανται και παρέχεται νέα ποσότητα φρέσκου καυσίμου. Οι εξαντλημένες συστάδες που αφαιρούνται αποθηκεύονται σε δεξαμενή νερού - δεξαμενή εξαντλημένου καυσίμου (Εικόνα 22) για αρκετούς μήνες μέχρι τα επίπεδα ραδιενέργειας να μειωθούν αρκετά και να μην είναι βλαβερά για το περιβάλλον. Στη συνέχεια μεταφέρονται σε χώρους ανακύκλωσης ή ταφής. Υλικά όπως το νερό (βαρύ ύδωρ), το βηρύλλιο (Be) και το οξείδιο του βηρυλλίου (BeO) χρησιμοποιούνται ως επιβραδυντές (moderator) πυρηνικών αντιδραστήρων. Η λειτουργία τους έγκειται στον έλεγχο και την εξουδετέρωση των νετρονίων που κυκλοφορούν στον αντιδραστήρα ώστε η σχάση να πραγματοποιείται με επιθυμητό ρυθμό. Σε αντίθετη περίπτωση θα εκλύονταν μη διαχειρίσιμα ποσά θερμότητας.



Εικόνα 22: Δεξαμενή εξαντλημένου ύδατος (Πηγή: [10])

Μέσα στον αντιδραστήρα υπάρχουν και κάποια κινητά μέρη που ονομάζονται ράβδοι ελέγχου (control rods) και χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την απορρόφηση των νετρονίων καθώς ρυθμίζουν την παροχή τους και μεταβάλλουν τη μεταβλητή k (συντελεστής πολλαπλασιασμού) προς επιθυμητά σημεία. Επιπλέον, οι ράβδοι ελέγχου είναι υπεύθυνες για την κρισιμότητα του συστήματος, διατηρώντας το επίπεδο παραγωγής σε σταθερό επίπεδο, όταν το καύσιμο καταναλώνεται και τα προϊόντα της σχάσης που απορροφούν τα νετρόνια αυξάνονται στην καρδιά. Διάφορα υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των ράβδων ελέγχου: χάλυβας βορίου (το βόριο έχει υψηλή ενεργό διατομή, κατάλληλη για τη σύλληψη νετρονίων), άφνιο ή κάδμιο (εξαιρετικά ικανά για τη θερμική απορρόφηση νετρονίων), ασήμι καθώς και διάφορα κράματα των παραπάνω μετάλλων. Η

σχετικά υψηλή ενεργός διατομή σύλληψης νετρονίων του υδρογόνου επιβάλλει τη χρησιμοποίηση ελαφρά εμπλουτισμένου καυσίμου σε U-235. Η ενέργεια συνδέσεως του ηλεκτρονίου εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό του πυρήνα και από τη στοιβάδα στην οποία ανήκει. Επειδή ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να διεγερθεί μόνον όταν η ενέργεια του φωτονίου είναι επαρκής για να το ανεβάσει σε μία στοιβάδα μικρότερης ενέργειας συνδέσεως, η καμπύλη απορρόφησης των φωτονίων από ένα υλικό (ή η ενεργός διατομή) παρουσιάζει, κατά την προσέγγιση της ενέργειας συνδέσεως μίας στοιβάδας, χαρακτηριστικά μέγιστα (ακμές, edges). Σε μεγάλες ενέργειες, πέραν της K-ακμής που αντιστοιχεί στην ενέργεια συνδέσεως της K-στοιβάδας ηλεκτρονίων, ελαττώνεται σημαντικά η απορρόφηση των φωτονίων από το συγκεκριμένο μέσο. Το σχήμα τους είναι συνήθως κυλινδρικό, αλλά επίσης μπορεί να είναι φύλλα, λεπίδες ή λεπίδες σε σχήμα σταυρού, οπότε μιλάμε για σταυροειδείς ράβδους. Απεικόνιση των ράβδων ελέγχου παρουσιάζεται στην Εικόνα 23.

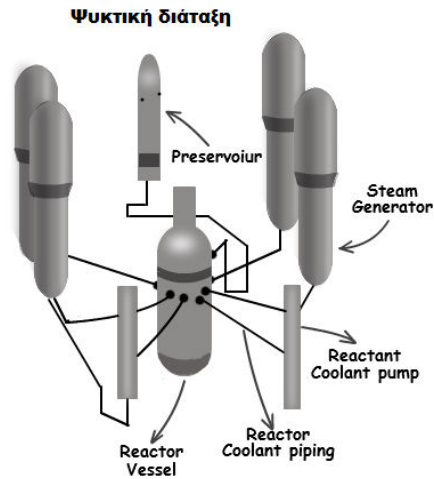


Εικόνα 23: Ράβδοι ελέγχου πυρηνικού αντιδραστήρα (Πηγή: [11])

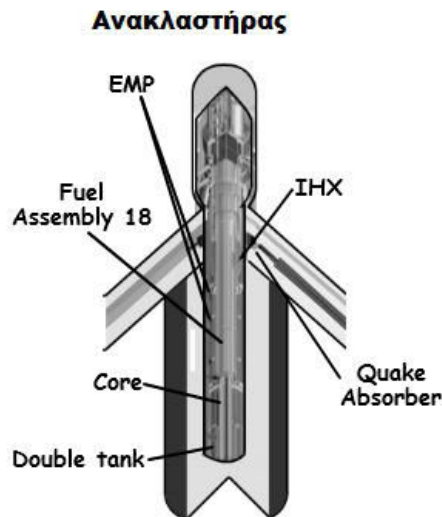
Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα ποσά θερμότητας μέσα στον πυρήνα είναι τεράστια συνεπώς είναι αναγκαία η ύπαρξη ψυκτικού μέσου απαγωγής μέρους αυτής της θερμότητας (Εικόνα 24). Οπότε γύρω από κάθε ράβδο ρέει ψυκτικό μέσο (coolant) που μπορεί να είναι νερό, βαρύ ύδωρ, CO₂, υγρό νάτριο ή ήλιο).

Σε αναπαγωγικούς αντιδραστήρες γύρω από τον πυρήνα βρίσκεται ένα υλικό που ονομάζεται μανδύας επώασης (blanket). Τα νετρόνια που ξεφεύγουν από την καρδιά του αντιδραστήρα εισέρχονται στο μανδύα και χρησιμοποιούνται σε αντιδράσεις μετατροπής. Υπάρχει ψύξη και σε αυτή την περιοχή γιατί και στον μανδύα εκλύονται μεγάλα ποσά θερμότητας.

Γύρω από το μανδύα επώασης υπάρχει ο ανακλαστής (reflector) (Εικόνα 25). Ο ανακλαστής έχει ως σκοπό να ωθεί μέσω ανάκλασης τα νετρόνια που διαφεύγουν από τον πυρήνα πίσω σε αυτόν και έτσι μειώνονται οι απώλειες. Είναι πολύ σημαντικό εξάρτημα γιατί μειώνεται ο ρυθμός καυσίμου που απαιτείται για να είναι κρίσιμος ένας αντιδραστήρας. Τα χαρακτηριστικά του υλικού πρέπει να εξασφαλίζουν μεγάλη διατομή σκέδασης ηλεκτρονίων, μικρή διατομή απορρόφησης και άλλες ιδιότητες παρόμοιες με τον επιβραδυντή. Σχεδόν πάντα τα υλικά των δύο αυτών εξαρτημάτων είναι ίδια.

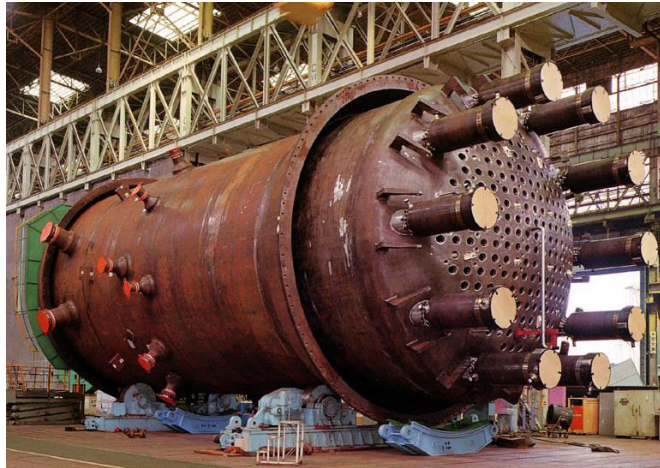


Εικόνα 24: Ψυκτική διάταξη πυρηνικού αντιδραστήρα (Πηγή: [12])



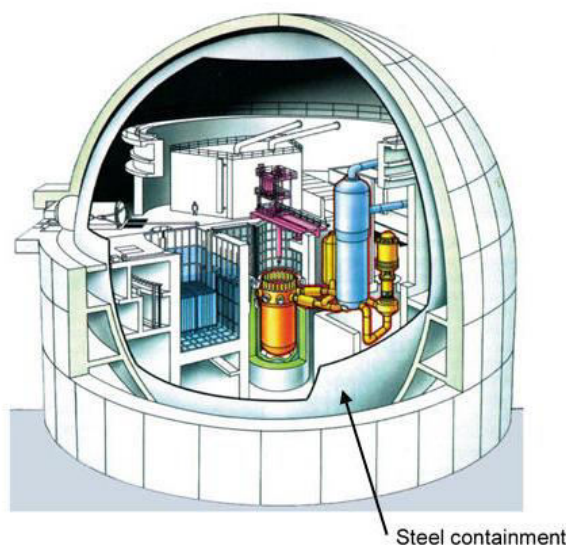
Εικόνα 25: Ανακλαστήρας νετρονίων (Πηγή: [13])

Εξαιτίας των τεράστιων θερμικών φορτίων και της ραδιενέργειας μέσα στον πυρήνα δημιουργούνται αλλοιώσεις και της δομής και των ιδιοτήτων των υλικών. Έτσι δημιουργούνται διάφορες θερμικές τάσεις και καταπονούνται τα υλικά. Για αυτό το λόγο μεταξύ του πυρήνα και των εξαρτημάτων παρεμβάλλεται σίδηρος ή χαλύβδινο έλασμα πάχους μερικών εκατοστών με σκοπό την απορρόφηση των ακτινοβολιών και τη μείωση της έντασης εντός ανεκτών ορίων για την προστασία των υλικών. Αυτό το έλασμα είναι η θερμική θωράκιση (thermal shield). Όλες οι παραπάνω διατάξεις περικλείονται μέσα σε ένα δοχείο βρίσκονται υπό πίεση και καλείται δοχείο πίεσης (pressure vessel). Επίσης γύρω από το δοχείο πίεσης υπάρχει και βιολογική θωράκιση που έχει στόχο την εξασθένηση των ακτινοβολιών. Αυτή η θωράκιση είναι ή δοχείο νερού ή σκυρόδεμα ικανοποιητικού πάχους (Εικόνα 26).



Εικόνα 26: Δοχείο πίεσης καυτού νερού (Πηγή: [14])

Τέλος όλα τα προαναφερθέντα εξαρτήματα που περικλείουν ποσά θερμότητας και ραδιενέργειας περιβάλλονται από το δοχείο εγκλωβισμού (containment vessel). Αυτό το δοχείο είναι σκυρόδεμα πάχους μεγαλύτερου του ενός μέτρου και εσωτερικά έχει στεγανό χαλύβδινο έλασμα. Σε περίπτωση ατυχήματος έχει σκοπό τη μη διαρροή επικίνδυνων υλικών στο περιβάλλον. Ο χώρος αυτός ελέγχεται συστηματικά και καθαρίζεται από ειδικά φίλτρα ώστε να διασφαλίζεται ότι τα ραδιενεργά σωματίδια ή επιβλαβείς ακτινοβολίες.



Εικόνα 27: Γερμανικός πυρηνικός αντιδραστήρας με ασάλινο δοχείο εγκλωβισμού (Πηγή: [15])

2.2.4 Ασφαλής λειτουργία αντιδραστήρων

Οι αναφορές γύρω από την ασφάλεια που πρέπει να υφίσταται στα πυρηνικά εργοστάσια είναι εκτενείς και πολύπλοκες. Η ανάγκη για την τόσο μεγάλη ανάλυση γεννάται λόγω της επικινδυνότητας που διατρέχει το περιβάλλον και ο άνθρωπος σε περίπτωση οποιασδήποτε διαρροής ραδιενεργών προϊόντων που παράγονται κατά τη σχάση. Η βασική αρχή κατά

την οποία στήνεται και δομείται η ασφάλεια ενός πυρηνικού εργοστασίου ονομάζεται «άμυνα εις βάθος». Τα κύρια χαρακτηριστικά που διέπουν την αρχή αυτή είναι:

- Αρχικός στόχος είναι να εκμηδενιστεί η πιθανότητα για κάποιο ατύχημα.
- Σε ένα δυσμενές σενάριο κατά το οποίο θα ξεκινήσει κάποιο ατύχημα, θα πρέπει να υπάρχουν και να εφαρμοστούν όλες οι απαραίτητες ενέργειες ώστε να αποτραπεί η εξέλιξή του και να τεθεί ο πυρηνικός αντιδραστήρας σε κατάσταση ασφαλούς λειτουργίας. Ο συντελεστής ασφαλείας που διέπει την πιθανότητα ατυχήματος πρέπει να έχει σημαντική προσαύξηση σε σχέση με τους κανονισμούς που έχει θέσει το εκάστοτε κράτος στο οποίο πρόκειται να εγκατασταθεί ένας πυρηνικός αντιδραστήρας.
- Παρά τον προσεκτικό σχεδιασμό υπάρχει πάντα η πιθανότητα να συμβεί κάποιο μεγάλο ατύχημα. Στην περίπτωση αυτή, πρέπει να υπάρχουν αποτελεσματικοί τρόποι αντιμετώπισης, ώστε να μειωθούν στο ελάχιστο οι επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον.

Η λογική και οι κανονισμοί που διέπουν την άμυνα εις βάθος δεν αναφέρονται μόνο στην ασφαλή λειτουργία του πυρηνικού αντιδραστήρα, αλλά ακολουθούν και τα επιμέρους βήματα όπως αυτό της διαχείρισης των ραδιενεργών προϊόντων. Για αυτόν τον λόγο, υπάρχει αρμόδια Αρχή η οποία δημιουργεί όλα τα κατάλληλα πλαίσια για την προστασία του περιβάλλοντος από την ραδιενεργή μόλυνση. Όπως και με την λειτουργία του πυρηνικού αντιδραστήρα, έτσι και για τις μετέπειτα φάσεις η αρμόδια Αρχή είναι υποχρεωμένη να χωρίσει σε επιμέρους στάδια τις διαδικασίες για την αποφυγή ατυχήματος. Η Αρχή κάθε κράτους δεν είναι αυτόνομη για τις διατάξεις τις οποίες θα θέσει σε λειτουργία. Έτσι, συντάσσονται συνολικά από την Ευρωπαϊκή Ένωση και είναι ανεξάρτητες οικονομικά και διοικητικά από τις χώρες στις οποίες εδράζονται.

Λόγω της μη ύπαρξης μεγάλης εμπειρίας γύρω από τα συστήματα ασφαλείας πυρηνικών εργοστασίων όλες οι προσπάθειες που γίνονται για την βελτίωσή τους στηρίζονται κυρίως σε προγενέστερα εργοστάσια αλλά και στην ανάλυση ατυχημάτων που έχουν συμβεί. Έτσι μέσα από αυτήν την ανάλυση βρίσκονται τρόποι με τους οποίους θα μπορούσε να αποφευχθεί ξανά στο μέλλον κάποιο ατύχημα. Η όλη διαδικασία είναι πολύ χρονοβόρα και με κόστος που μπορεί αν φτάσει έως και το ένα τέταρτο της συνολικής επένδυσης ενός πυρηνικού εργοστασίου.

2.2.5 Υφιστάμενοι ενεργοί πυρηνικοί αντιδραστήρες

Ο αριθμός των εν λειτουργία αντιδραστήρων είναι αρκετά μεγάλος. Αναφορικά έως και το τέλος του 2015 (Εικόνα 28) που βρίσκονταν εν λειτουργία σχεδόν τετρακόσιοι πενήντα αντιδραστήρες και αναμένονταν να ολοκληρωθεί η κατασκευή ακόμα τριάντα. Ευρεία χρήση πυρηνικών αντιδραστήρων παρατηρείται για την λειτουργία πολεμικών πλοίων και υποβρυχίων που ξεπερνούν τους διακοσίους.

Country	Operational reactors		Reactors under construction		Nuclear electricity supplied in 2014	
	No. of units	Net capacity MW(e)	No. of units	Net capacity MW(e)	TW(e)-h	Share of total %
ARGENTINA	3	1627	1	25	5.3	4.1
ARMENIA	1	375			2.3	30.7
BELARUS			2	2218	NA	NA
BELGIUM	7	5927			32.1	47.5
BRAZIL	2	1884	1	1245	14.5	2.9
BULGARIA	2	1926			15.0	31.8
CANADA	19	13500			98.6	16.8
CHINA	23	19007	26	25756	123.8	2.4
CZECH REP.	6	3904			28.6	35.8
FINLAND	4	2752	1	1600	22.6	34.7
FRANCE	58	63130	1	1630	418.0	76.9
GERMANY	9	12074			91.8	15.8
HUNGARY	4	1889			14.8	53.6
INDIA	21	5308	6	3907	33.2	3.5
IRAN, ISL. REP.	1	915			3.7	1.5
JAPAN	48	42388	2	2650	0.0	0.0
KOREA, REP. OF	23	20717	5	6370	149.2	30.4
MEXICO	2	1330			9.3	5.6
NETHERLANDS	1	482			3.9	4.0
PAKISTAN	3	690	2	630	4.6	4.3
ROMANIA	2	1300			10.8	18.5
RUSSIA	34	24654	9	7371	169.1	18.6
SLOVAKIA	4	1814	2	880	14.4	56.8
SLOVENIA	1	688			6.1	37.3
SOUTH AFRICA	2	1860			14.8	6.2
SPAIN	7	7121			54.9	20.4
SWEDEN	10	9470			62.3	41.5
SWITZERLAND	5	3333			26.5	37.9

Εικόνα 28: Πυρηνική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αντιδραστήρες σε λειτουργία και υπό κατασκευή έως 31/12/ 2015 (Πηγή: Nuclear Power “Reactors in the World”, IAEA, 2015)

Προκειμένου να μπορούν να προσδιοριστούν κάποια μεγέθη, όπως η εμπειρία όσον αφορά την τεχνολογική ανάπτυξη, έχει θεσπιστεί ένας αριθμός που ονομάζεται «έτη αντιδραστήρα» («reactor years»). Για τον προσδιορισμό αυτού του αριθμού αρκεί να πολλαπλασιάσουμε τους ενεργούς αντιδραστήρες επί των χρόνων λειτουργίας τους. Αναφορικά η επιστήμη επί τους παρόντος αναφέρεται σε περίπου δώδεκα χιλιάδες έτη τεχνολογικής γνώσης. Μέσα από αυτή τη μέτρηση είναι δυνατός και ο υπολογισμός του μεγέθους των ατυχημάτων που έχουν συμβεί ανά έτος στον αριθμό «έτη αντιδραστήρα».

Η Αρχή που εδρεύει και δραστηριοποιείται στις ΗΠΑ έχει θέσει σαφείς οδηγίες για τον σχεδιασμό των αντιδραστήρων, ώστε η πιθανότητα αστοχίας και συνεπώς ατυχήματος να είναι κάτω από μία ανά εκατό χιλιάδες έτη αντιδραστήρα. Ακολούθως, οι εταιρίες των ΗΠΑ που δραστηριοποιούνται αυτή τη στιγμή στο χώρο της ηλεκτρικής ενέργειας σχεδιάζουν πυρηνικούς αντιδραστήρες με όριο διαρροής μικρότερο του ενός ανά εκατό χιλιάδες έτη. Η τεχνολογική ανάπτυξη οδηγεί σε οφέλη και όσον αφορά την ασφάλεια. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η σχεδίαση των επόμενων αντιδραστήρων να γίνεται με δείκτη ασφαλείας μικρότερο του ενός ανά ένα εκατομμύριο έτη.

Η εξέλιξη στον σχεδιασμό των αντιδραστήρων έχει δημιουργήσει την ανάγκη για την κατηγοριοποίησή τους. Ο διαχωρισμός των κατηγοριών των αντιδραστήρων γίνεται βάσει πολλών χαρακτηριστικών και όχι ενός, όπως ο τρόπος λειτουργίας τους και η ισχύ την οποία παράγουν. Ένα τμήμα των

αντιδραστήρων, που δεν αναλύεται σε αυτήν την εργασία, είναι οι θερμικοί αντιδραστήρες. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι διότι η ισχύς την οποία παράγουν δεν γίνεται αντικείμενο εκμετάλλευσης προς παραγωγή ενέργειας. Ως αποτέλεσμα αυτού, έχουν δημιουργηθεί πέντε βασικές κατηγορίες αντιδραστήρων:

- Οι πρώτης γενιάς αντιδραστήρες δημιουργήθηκαν αρκετά χρόνια πίσω, στην δεκαετίες πενήντα και εξήντα και ο στόχος δεν ήταν να τεθούν σε λειτουργία για την παραγωγή ενέργειας. Πρόκειται κυρίως για αερόψυκτους αντιδραστήρες σχάσης Magnox. Σκοπός ήταν η μελέτη και ο σχεδιασμός ενός πυρηνικού αντιδραστήρα εφόσον δεν υπήρχε προγενέστερη τεχνολογική γνώση επί του θέματος. Αυτός είναι και ο λόγος που σήμερα κανένας από τους αντιδραστήρες αυτούς δεν λειτουργεί. Χαρακτηριστικοί αντιδραστήρες που δημιουργήθηκαν βάση αυτού του τύπου ήταν:
 - Shippingport 1975-1982, Πενσυλβάνια
 - Dresden-I 1960-1978, Illinois
 - Calder Hall 1956-2003, Ηνωμένο Βασίλειο.

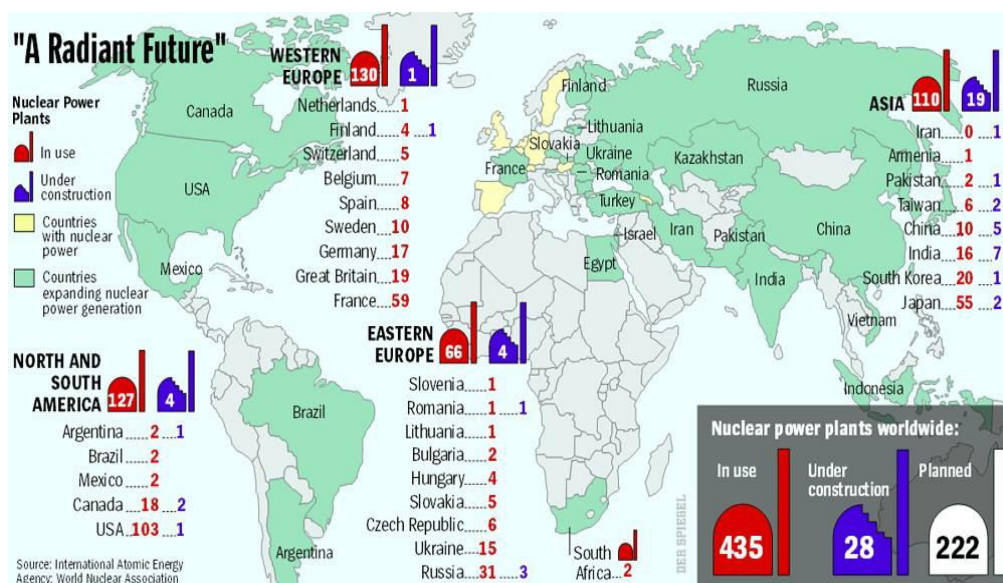
- Οι δεύτερης γενιάς αντιδραστήρες δημιουργήθηκαν μέσα από την γνώση που εισέπραξαν οι μελετητές σχεδιάζοντας την πρώτη γενιά. Είχαν εμπορική κυρίως χρήση και ο χρόνος ζωής που τους δινόταν βάσει σχεδιασμού ήταν περίπου σαράντα χρόνια. Αποσκοπούσαν κυρίως στο κομμάτι της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμα και σήμερα λόγω της μεγάλης αξιοπιστίας τους βρίσκονται εν λειτουργία με ολοένα και πιο αναβαθμισμένα συστήματα ασφαλείας, φυσικά. Κατά το παρελθόν και στα τόσες χιλιάδες χρόνια παρουσίας του αντιδραστήρα έχει παρατηρηθεί μόνο ένα σοβαρό για το περιβάλλον ατύχημα. Σε αυτού του τύπου τους αντιδραστήρες είχε ξεκινήσει η δημιουργία συστημάτων ασφαλείας που δεν απαιτούσαν στην ύπαρξη φυσικού προσώπου· για παράδειγμα, οι βαλβίδες εκτόνωσης αποτελούσαν ένα αυτόνομο και αυτόματο σύστημα ελέγχου. Για την καλύτερη κατανόηση τους χωρίστηκαν σε ελαφρού και βαρέως ύδατος.

- Οι αντιδραστήρες της τρίτης γενιάς θεωρούνται υψηλών προδιαγραφών και προηγμένης τεχνολογίας, διότι είναι αποτέλεσμα των μελετών που έχουν γίνει στους αντιδραστήρες προηγούμενων γενεών. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά που τους διακρίνουν από τους αντιδραστήρες δεύτερης γενιάς είναι ότι:
 - Διαθέτουν πιο απλό αλλά πιο εξελιγμένο σχεδιασμό, ώστε να αποτρέπονται πιθανά σφάλματα και να έχουν πιο ομαλή λειτουργία.
 - Η αντοχή τους στο χρόνο πλέον δεν είναι τα τριάντα χρόνια, όπως οι παλαιότεροι αλλά πλέον αγγίζουν τα εξήντα χρόνια ζωής. Ακόμα και αυτό το όριο μπορεί να βελτιωθεί και να δοθεί μία παράταση στο χρόνο ζωής του αντιδραστήρα μετατρέποντας το δοχείο πίεσής του.
 - Η τήξη της καρδιάς του αντιδραστήρα είναι το συχνότερο πρόβλημα που εμφανίζεται κατά την λειτουργία του. Πλέον στην ανανεωμένης γενιάς έχει μειωθεί πολύ το ποσοστό αυτό.

- Οι εξωτερικοί παράγοντες, όπως πτώση ενός αεροπλάνου, δεν παύουν να αποτελούν πιθανά ατυχήματα. Στης τρίτης γενιάς έχει προβλεφθεί, ώστε να μην υπάρχει διαφυγή ραδιενεργών προϊόντων στον περιβάλλον.
- Με την βελτίωση της εκμετάλλευσης του σχάσιμου υλικού επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αυτονομία του αντιδραστήρα.

Οι αντιδραστήρες τρίτης γενιάς που έχουν αναπτυχθεί είναι δύο τύπων:

- Ζέοντος ύδατος (ABWR: Advanced Boiling Water Reactor)
- Πεπιεσμένου ύδατος (APR: Advanced Pressurized Reactor, EPR: European Pressurized Reactor, Evolutionary Power Reactor)



Εικόνα 29: Αντιδραστήρες ανά τον κόσμο (Πηγή: [16])

- Υπάρχει και η κατηγορία «Τρίτη γενιά +» για ανάπτυξη στο εγγύς μέλλον με πιο χαρακτηριστικά είδη τα ακόλουθα:
 - APWR, Advanced PWR
 - VVER-1200/329M Reactor
 - Advanced CANDU Reactor, ACR-1000
 - AP1000 (Στα πρότυπα του AP600 αλλά μεγαλύτερης ισχύος)
 - European Pressurized Reactor, EPR
 - Economic Simplified Boiling Water Reactor, ESBWR
 - APR-1400 (Στα πρότυπα του System 80+)
 - EU-ABWR (Όπως ο ABWR με δυνατότητας εγκατάστασης στο Ευρωπαϊκό έδαφος).

Με πολύ πρόσφατη παρουσία, οι αντιδραστήρες τέταρτης γενιάς ξεκίνησαν να σχεδιάζονται το 1990. Στόχος τους ήταν να εκμεταλλευτούν στο έπακρο το καύσιμό τους να μειώσουν τα παραγόμενα ραδιενεργά προϊόντα και ταυτόχρονα να αυξήσουν τα επίπεδα ασφαλείας τους. Αδιαμφισβήτητη βελτίωση ήταν η ενσωμάτωση αρκετών συστημάτων παθητικής ασφαλείας, κάτι που οδήγησε στην επίτευξη των προαναφερθέντων στόχων.

- Στην τέταρτης γενιάς αντιδραστήρες κατατάσσονται οι αντιδραστήρες που επρόκειτο να κατασκευαστούν στο μέλλον. Στην παρούσα φάση γίνεται ο σχεδιασμός τους και πιστεύεται ότι κάποιοι πρότυποι θα έχουν

κατασκευαστεί μέχρι το 2020. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ο υψηλός βαθμός θερμοκρασίας στον οποίο δουλεύουν. Πιστεύεται ότι θα μπορούν να εξαντλήσουν το καύσιμο από άποψη αποθεμάτων, ώστε να μην υπάρχουν κατάλοιπα και να ανακυκλώσουν τα ραδιενεργά τους απόβλητα. Αυτά τα οφέλη έχουν και οικονομικό όφελος αλλά και περιβαλλοντικό. Υπολογίζεται ότι η απόδοσή τους θα είναι από εκατό μέχρι τριακόσια τις εκατό μεγαλύτερη σε σχέση με τους σημερινούς αντιδραστήρες στην ίδια ποσότητα καυσίμου. Τα είδη των αντιδραστήρων τέταρτης γενιάς είναι οι:

- Αντιδραστήρες που ψύχονται με υγρό μέταλλο
- Αντιδραστήρες με υψηλό θερμικό σημείο λειτουργίας
- Αντιδραστήρες υπερκρίσιμου νερού
- Αερόψυκτοι αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων
- Αντιδραστήρες τετηγμένου άλατος
- Αντιδραστήρες μετάδοσης κύματος

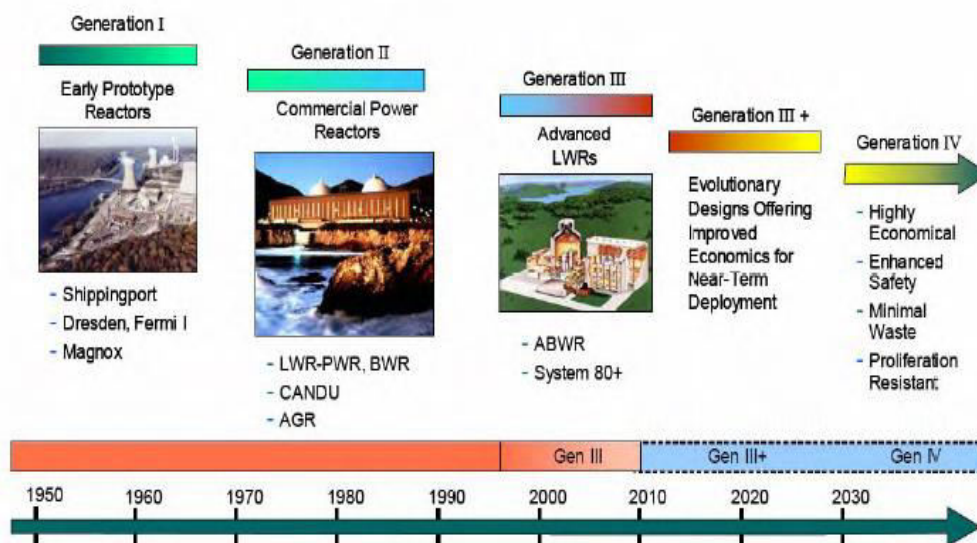
Τα παθητικά- όπως ονομάζονται- συστήματα ασφαλείας θεωρούνται ότι θα είναι η μελλοντική εξέλιξη των τρίτης γενιάς αντιδραστήρων (τέταρτη γενιά αντιδραστήρων). Όσο περισσότερο απλοποιούνται ο σχεδιασμός και τα συστήματα ενός αντιδραστήρα τόσο απομακρύνεται ο φόβος ατυχήματος με ότι συνεπάγεται αυτό. Έτσι μέσω των παθητικών συστημάτων θα είναι εφικτό να απομονωθούν συστήματα αντλιών και συστήματα μεταφοράς θερμότητας και να αντικατασταθούν με παθητικά συστήματα, όπως φυσική ροή θερμότητας προς το περιβάλλον και βαρύτητα. Αν εξαιρεθεί η περίπτωση της δημιουργίας ενός νέου αντιδραστήρα τέταρτης γενιάς που προσδοκάται να έχει κατασκευασθεί μέχρι το 2021 δεν προβλέπονται άλλοι πριν το 2030. Η καθυστέρηση αυτή οφείλεται στην αμοιβαία συμφωνία των χωρών για βελτίωση των αναγκών σε τρεις βασικούς τομείς: στον τομέα της βιωσιμότητας, των οικονομικών και της ασφάλειας και αξιοπιστίας.

- Βιωσιμότητα: Χαρακτηρίζεται κυρίως για την φιλικότητα της παραγωγής της ενέργειας προς τους χρήστες και το περιβάλλον. Επίσης, απαιτείται η αποδοτικότερη εκμετάλλευση των πρώτων υλών και ο εκμηδενισμός κατά το δυνατόν των αποβλήτων.
- Οικονομικοί στόχοι: Αποτελούν την οικονομική απόδειξη της υπεροχής της πυρηνικής ενέργειας σε σχέση με τις υπόλοιπες διαδικασίες παραγωγής ενέργειας.
- Ασφάλεια και αξιοπιστία: Καθοριστικός τομέας υψηλού ενδιαφέροντος με στόχους, όπως η άριστη λειτουργία χωρίς να υπάρχουν πιθανότητας προβλήματος την καρδιάς ή οποιουδήποτε άλλου ατυχήματος. Επίσης, είναι απαραίτητο να μην χρειάζεται να ληφθούν μέτρα εκτός του πυρηνικού εργοστασίου σε περίπτωση ανάγκης, όπως επίσης να καταστεί βέβαιο ότι η τεχνολογία αυτή δεν θα βοηθήσει την κατασκευή όπλων και δεν θα κινδυνεύει από τρομοκράτες.

2.2.6 Κατηγορίες πυρηνικών αντιδραστήρων

Υπάρχουν τέσσερις γενιές αντιδραστήρων έως και σήμερα όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω Εικόνα 30. Έως και το 2010 οι αντιδραστήρες κατατάσσονται στις Γενιές I, II και III. Στην Γενιά I που αρχίζει τη δεκαετία του 1950 συναντά κανείς τους πρώτους πρωτότυπους αντιδραστήρες (πχ.

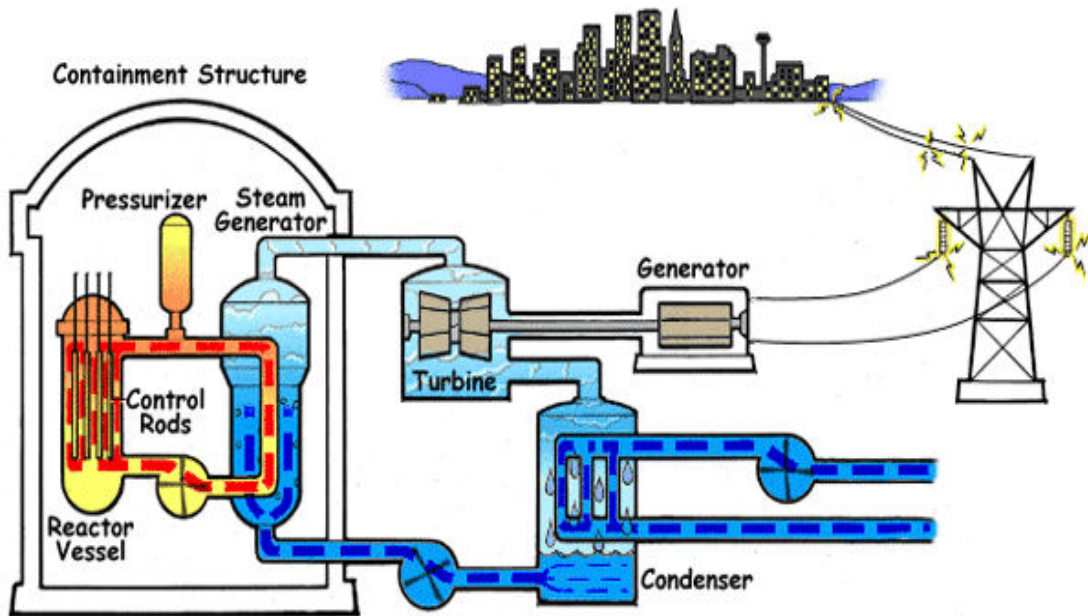
Shippingport (1957–1982), Dresden-1 (1960–1978), and Calder Hall-1 (1956–2003). Η Γενιά II (1970 – 1990) περιλαμβάνει εμπορικούς αντιδραστήρες ισχύος όπως οι LWR (Light Water Reactors/ Ελαφρού ύδατος αντιδραστήρες)-PWR (Pressurized Water Reactors/Πεπιεσμένου ύδατος αντιδραστήρες), CANDU και AGR. Οι αντιδραστήρες αυτοί χρησιμοποιούν ενεργά συστήματα ασφαλείας με ηλεκτρικές ή μηχανολογικές διεργασίες. Υπάρχουν επίσης και παθητικά συστήματα όπως οι βαλβίδες πίεσης. Στην τρίτη Γενιά III βρίσκονται οι Αναπτυγμένοι LWRs (Αντιδραστήρες Ελαφρού Ύδατος) αντιδραστήρες όπως οι ABWR στην Ιαπωνία που είναι αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος. Ο πιο διαδεδομένος αντιδραστήρας είναι ο BWR (Boiling Water Reactor) όπου χρησιμοποιείται καυτό νερό. Η επόμενη Γενιά III+ περιλαμβάνει τους αντιδραστήρες που θα σχεδιαστούν σύντομα ή που είναι τελευταίας τεχνολογίας. Ο αντιδραστήρας ERP (Evolutionary Pressurized Water Reactor/Πρωτοποριακός Αντιδραστήρας Πεπιεσμένου Ύδατος). Αυτοί οι αντιδραστήρες έχουν διπλά τοιχώματα με αερισμούς και συστήματα φιλτραρίσματος. Επίσης, έχουν αποσπώμενα συστήματα θέρμανσης και δεξαμενή νερού μέσα στο περίβλημα. Τέλος, η Γενιά IV περιλαμβάνει μελέτες για μετά το 2030 που επικεντρώνονται στην οικονομία, στην αυξημένη ασφάλεια και στην ελαχιστοποίηση των αποβλήτων. Οι ονομασίες των αντιδραστήρων της τέταρτης γενιάς είναι: Gas-Cooled Fast Reactor System (GFR), Lead-Cooled Fast Reactor System (LFR), Molten Salt Reactor System (MSR), Sodium-Cooled Fast Reactor System (SFR), Supercritical-Water-Cooled Reactor System (SCWR) και Very-High-Temperature Reactor System (VHTR). Το σύστημα GFR χαρακτηρίζεται ως αναπαραγωγικό με ψυκτικό μέσο το ήλιο ενώ το SFR είναι αναπαραγωγικός αντιδραστήρας, ταχέων νετρονίων με ψυκτικό υγρό το νάτριο. Ο MSR χαρακτηρίζεται ως σύστημα τετηγμένου άλατος, με χαμηλές πιέσεις (<0.5 MPa) και θερμοκρασία εξόδου 700-800 °C. Το σύστημα SCWR χαρακτηρίζεται ως ελαφρού αλλά υπερκρίσιμου ύδατος, το VHTR χαρακτηρίζεται από τεχνολογία «γραφίτη-ήλιου» για πολύ υψηλές θερμοκρασίες και παραγωγή υδρογόνου (1000 °C).



Εικόνα 30: Ιστορική εξέλιξη πυρηνικών αντιδραστήρων (Πηγή: [17])

2.2.6.1 Πυρηνικοί αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος PWR

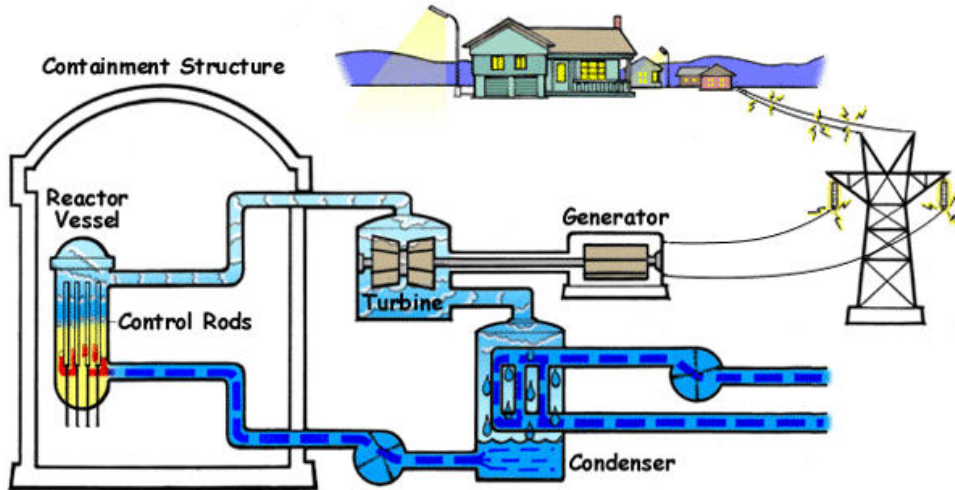
Θεωρείται από τους παλαιότερους τύπους αντιδραστήρα με χρήση ακόμα και σήμερα. Ο σχεδιασμός του έγινε από την Αμερική και τη Ρωσία με στόχο την χρήση του στην μετακίνηση των πλοίων και των υποβρυχίων. Το κύριο μέσο για την λειτουργία τους είναι το νερό για την επιβράδυνση του αντιδραστήρα αλλά και την ψύξη του. Η απόδοσή τους κυμαίνεται από τα εννιακόσια μέχρι τα χίλια πεντακόσια μεγαβάτ. Διακρίνονται από χαμηλή απόδοση, 35% περίπου, και ο όγκος τους δεν ξεπερνά τα τρεισήμισι μέτρα σε ύψος και διάμετρο μαζί με το μπετό που διαθέτουν για την θωράκισή τους. Αφού εισέλθει το νερό σε πίεση 150 atm και θερμοκρασία 295°C ακολουθεί την διαδρομή γύρω από την καρδιά του αντιδραστήρα και μετά μέσα σε αυτή. Η καύσιμη ύλη είναι σε μορφή ράβδων που καλύπτονται από ανοξειδωτο ασάλι ή εναλλακτικά περιβάλλονται από κράμα ζirkονίου. Για την λειτουργία του απαιτείται συστοιχία 225 ράβδων από τους οποίους οι 25 αποτελούν κομμάτι του ελέγχου και όχι του καυσίμου.



Εικόνα 31: Αντιδραστήρες τύπου PWR (Πηγή: [18])

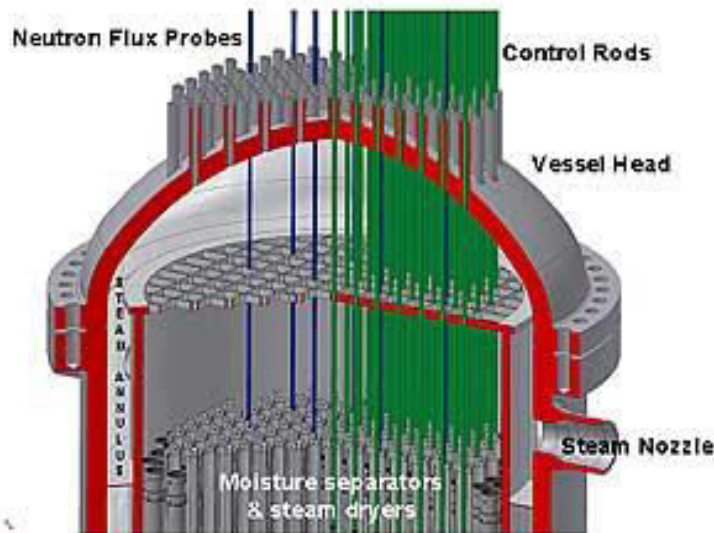
2.2.6.2 Πυρηνικοί αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος BWR

Παλαιότερα επικρατούσε η άποψη ότι αν ο βρασμός του νερού γίνει μέσα στην καρδιά του αντιδραστήρα τότε υπάρχει μεγάλο πρόβλημα ευστάθειας του αντιδραστήρα.



Εικόνα 32: Αντιδραστήρες τύπου BWR (Πηγή: [19])

Ύστερα από μελέτες αποδείχτηκε ότι αυτό έχει λόγω ύπαρξης σε ενδεχόμενο που η πίεση στην καρδιά μειωθεί σημαντικά. Ενώ αν η πίεση κρατηθεί σε υψηλά επίπεδα μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη ευστάθεια στο σύστημα.



Εικόνα 33: Σωλήνες καυσίμου αντιδραστήρα (Πηγή: [20])

Λόγω της απευθείας διάδοσης και παραγωγής του ατμού από την καρδιά σε αυτού του τύπου αντιδραστήρα δεν χρειάζεται να τοποθετηθεί συσκευή παραγωγής ατμού. Με το πέρασμα του ατμού από την καρδιά συμπαρασύρονται προϊόντα της σχάσης με αποτέλεσμα να προσδίδουν ραδιενεργό χαρακτήρα στον ατμό και να απαιτείται μόνωση των συστημάτων που διέρχεται, όπως ο στρόβιλος και οι αντλίες. Προκειμένου να επιτευχθεί ο

βρασμός του νερού στους 280°C η πίεση που επικρατεί μέσα στο πυρήνα είναι της τάξης των 70 atm.

2.2.6.3 Πυρηνικοί αντιδραστήρες Ελαφρού ύδατος

Το είδος αυτό των αντιδραστήρων είναι αποτέλεσμα της προσπάθειας που έγινε να για μείωση τους κόστους λειτουργίας και παραγωγής των πυρηνικών εργοστασίων και της πυρηνικής ενέργειας, αντίστοιχα. Τα παθητικά συστήματα που αναλύθηκαν προηγουμένως έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην προσπάθεια αυτή. Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος που ανήκουν στην «Τρίτη Γενιά» για ανάπτυξη στο εγγύς μέλλον χαρακτηρίζονται εξελιγμένοι (evolutionary) ALWs με κλασσικά συστήματα ασφάλειας. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου αντιδραστήρα είναι ο ABWR με ενεργά συστήματα ECCS που είναι αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος (BWR) στην Ιαπωνία και στην Ταιβάν. Ένα ακόμη παράδειγμα είναι ο αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος σε Κίνα, Γαλλία και Φιλανδία (ERP με ενεργά ECCS).

Η επόμενη γενιά αντιδραστήρων «Τρίτη γενιά +» για ανάπτυξη στο εγγύς μέλλον περιλαμβάνει αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος με παθητικά συστήματα ασφάλειας (Passive ALWRs). Σε αυτούς τους αντιδραστήρες γίνεται αντικατάσταση των ενεργών συστημάτων (αντλίες, γεννήτριες, κ.α.) με παθητικά συστήματα που βασίζονται για τη λειτουργία τους σε φυσικές δυνάμεις: βαρύτητα, αποθηκευμένη ενέργεια και παθητική απόρριψη θερμότητας στο περιβάλλον. Εξίσου καλή η καλύτερη ασφάλεια με πολύ σημαντική απλοποίηση του όλου συστήματος

2.2.6.4 Πυρηνικοί αντιδραστήρες Βαρέως Ύδατος

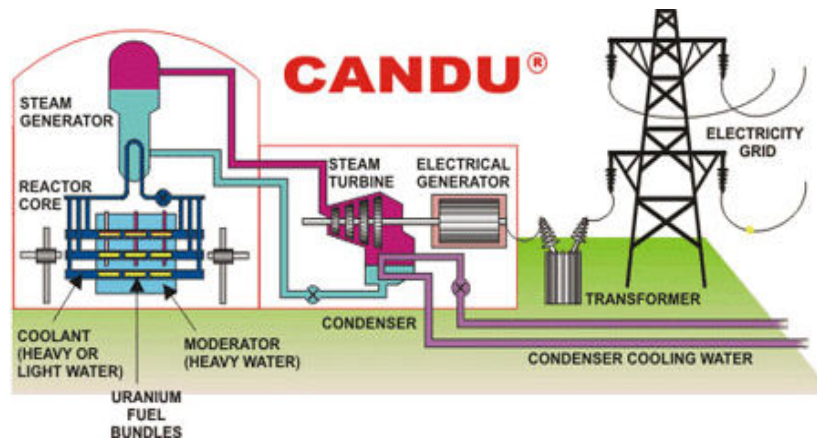
Οι Heavy Water Reactors- όπως ονομάζονται- χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη νερού για την επιβράδυνσή τους. Δημιουργός τους θεωρείται ο Καναδάς και ο σκοπός της δημιουργίας τους δεν ήταν η παραγωγή ενέργειας ή η εμπορική διάθεσή τους. Χρησιμοποιήθηκε στην περίοδο του Β Παγκοσμίου Πολέμου προς όφελος του πολέμου. Με την εξέλιξη του αντιδραστήρα από τον Καναδά έγινε δυνατή η λειτουργία φυσικού ουρανίου και ξεκίνησε ταχύτατα η εμπορική του χρήση. Δεν άργησε να επέλθει μέσα από αυτήν την καινοτομία η ανεξαρτητοποίηση του Καναδά από άλλα κράτη σε σχέση με την καύσιμη ύλη.

Ο επιβραδυντής που απαιτούνταν για την λειτουργία του αντιδραστήρα ήταν μεγάλου όγκου και για αυτόν τον λόγο και οι διαστάσεις της καρδιάς ήταν πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με καρδιές άλλων αντιδραστήρων. Αλληλένδετα, το δοχείο πίεσεως δεν γινόταν να μην έχει και αυτό μεγάλο όγκο. Τέλος, οι Heavy Water Reactors είχαν το τεράστιο σημασίας πλεονέκτημα, ότι οι αλλαγή του καυσίμου ήταν πλέον δυνατή κατά την διάρκεια λειτουργίας τους και δεν απαιτούσαν το να τεθεί εκτός λειτουργίας ο πυρηνικός αντιδραστήρας.

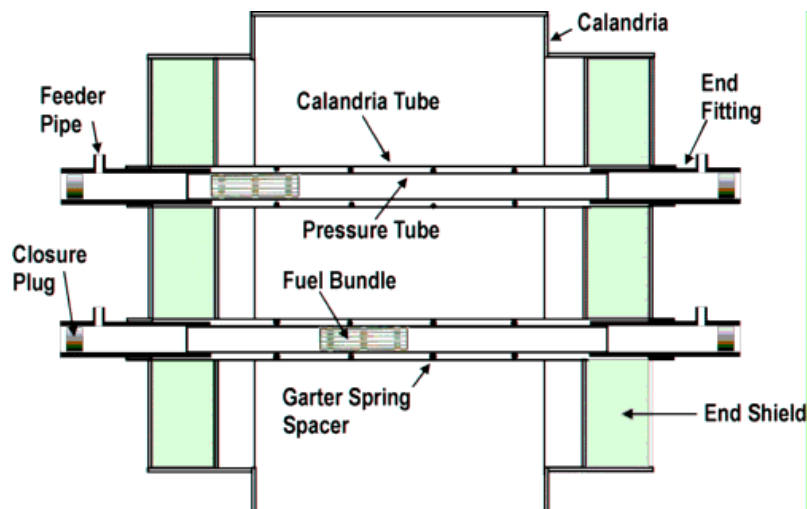
2.2.6.5 Πυρηνικός αντιδραστήρας τύπου CANDU

Ο CANDU, Canadian Deuterium – Uranium, θεωρείται το πιο αντιπροσωπευτικό παράδειγμα για αντιδραστήρες που αντί για ψυκτικό υγρό διαθέτουν νερό σε μεγάλη πίεση. Για να μειωθεί σημαντικά ο όγκος του δοχείου πίεσεως χρησιμοποιείται ένα σύστημα με σωλήνες ο καθένας εκ των οποίων διαθέτει το δικό του σύστημα πίεσης. Το μειονέκτημά τους σε σχέση

με τους Light Water Reactors είναι ότι δεν έχουν την δυνατότητα να ανυψώσουν την θερμοκρασία σε μεγάλο βαθμό και κατά συνέπεια δεν μπορούν να παράγουν ατμό μεγάλης πίεσης. Αποτέλεσμα της μικρής μεταβολής της θερμοκρασίας, από 266°C σε 310°C, είναι να πέφτει πολύ το ποσοστό της απόδοσής τους στο 30% περίπου. Τα οργανικά ψυκτικά υγρά έρχονται να δώσουν λύση στο πρόβλημα της διάβρωσης που παρατηρείται στους στροβίλους με χρήση υγρού ατμού. Έτσι, μειώνεται η ανάγκη για εξειδικευμένο εξοπλισμό και μειώνεται δραστικά το κόστος. Επίσης, η χρήση τους δίνει την δυνατότητα να αυξηθεί σημαντικά η θερμοκρασία στην έξοδο του αντιδραστήρα, αλλά πλέον δεν μπορεί να γίνει δεκτή η χρήση φυσικών καύσιμων υλών.



Εικόνα 34: Αντιδραστήρας τύπου CANDU (Πηγή: [21])



Εικόνα 35: Εσωτερικό αντιδραστήρα τύπου CANDU (Πηγή: [22])

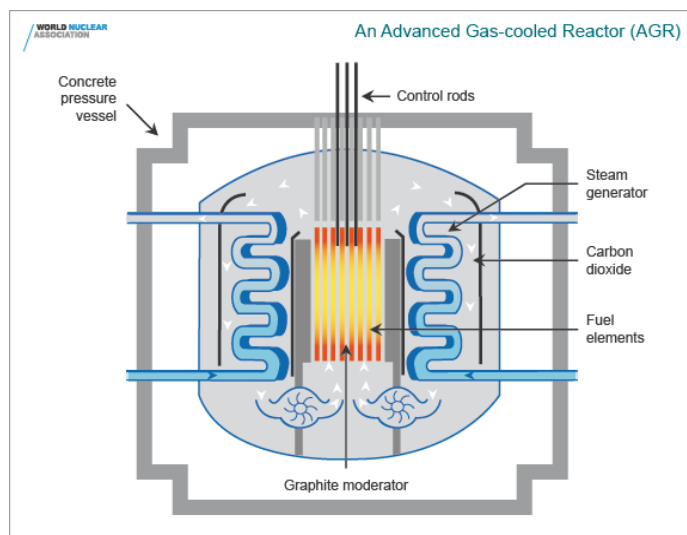
Ο αντιδραστήρας τύπου CANDU σε σχέση με αντιδραστήρες τύπου Pressured Water Reactors είναι σημαντικά μικρότερος διαθέτοντας όγκο καρδιάς κατά αναλογία ένα προς δέκα. Η καρδιά του είναι κατασκευασμένη από ανοξειδωτο ασάλι πάχους δύομισι εκατοστών με διαστάσεις που δεν ξεπερνάει τα οχτώ μέτρα σε ύψος. Σε περίπτωση που η εκάστοτε επένδυση απαιτεί την μείωση του όγκου αλλά και του κόστους του αντιδραστήρα, είναι δυνατή η χρήση εμπλουτισμένου ουρανίου αντί για φυσικό ουράνιο. Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, στον αντιδραστήρα τύπου Candu μέσω

της συστάδας των σωληνώσεων είναι δυνατή η αλλαγή του καυσίμου κατά την διάρκεια της λειτουργίας του. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός μηχανισμού που μετατοπίζει την παλιά συστάδα και τοποθετεί στην θέση της την καινούργια. Το σύστημα διαθέτει μικρούς σωλήνες, σε διάμετρο, πίεσης προκειμένου να είναι σταθερό. Ο κίνδυνος της διαρροής του ψυκτικού υγρού βέβαια δεν εξαλείφεται τελείως και για αυτόν τον λόγο διαθέτει δοχείο συλλογής του ψυκτικού σε περίπτωση ατυχήματος.

Χώρες όπως η Γερμανία και η Ιαπωνία έχουν δημιουργήσει κάποιες παραλλαγές του αντιδραστήρα Candu με την πρώτη να τοποθετεί δοχείο αντί για συστοιχία σωληνώσεων και την δεύτερη να τοποθετεί στους σωλήνες κοινό ύδωρ που βρίσκονται μέσα στην καρδιά του αντιδραστήρα σε συνθήκες βρασμού και ονομάζει τον αντιδραστήρα Fugen.

2.2.6.6 Αερόψυκτοι πυρηνικοί αντιδραστήρες

Το ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιείται σε έναν αντιδραστήρα είναι το χαρακτηριστικό βάσει του οποίου θα προσδιοριστεί αν είναι αερόψυκτος ή υδρόψυκτος. Οι αερόψυκτοι χρησιμοποιούν ως ψυκτικό μέσο γραφίτη και κάποιο αέριο. Τα αέρια που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι διοξείδιο του άνθρακα και ήλιο. Οι αντιδραστήρες αυτοί πρωτοεμφανίστηκαν στην Αμερική κατά την διάρκεια του Β παγκοσμίου πολέμου και παρουσίαζαν μεγάλο βαθμό απόδοσης. Οι πρώτοι εμπορικοί τύποι ήταν ο Magnox και ο UNGG από την Αγγλία και την Γαλλία αντίστοιχα. Είχαν δυνατότητα να χρησιμοποιούν φυσικό καύσιμο, αλλά δεν είχαν την δυνατότητα για περαιτέρω επεξεργασία των σωληνώσεων καυσίμου. Η διαφορά του Αγγλικού μοντέλου από το Γαλλικό ήταν ο προσανατολισμός των ράβδων που περιέχουν το καύσιμο.



Εικόνα 36: Αερόψυκτοι πυρηνικοί αντιδραστήρες (Πηγή: [23])

Η μη ύπαρξη υγρού ψυκτικού μέσου έδωσε σαφές προβάδισμα τους αερόψυκτους αντιδραστήρες, διότι αφενός δεν χρειαζόταν δοχείο εκτόνωσης, αφετέρου είχαν πολύ μεγαλύτερο δείκτη ασφαλείας επειδή δεν κινδύνευαν από διαρροή του ψυκτικού υγρού. Επίσης η απαλλαγή από το ψυκτικό υγρό μείωσε τις πιθανότητες ατυχήματος διότι δεν υπήρχε πλέον το φαινόμενο του βρασμού του ψυκτικού υγρού που συναντάμε σε πολλές περιπτώσεις. Ο γραφίτης τοποθετείται προκειμένου να επιτευχθεί η επιβράδυνση του

αντιδραστήρα και το ήλιο ως ψυκτικό μέσο. Ένα ακόμα θετικό της χρήσης του ηλίου είναι η αντίστασή του στην απορρόφηση νετρονίων. Κάτι που το καθιστά μη ραδιενεργό.

Οι αντιδραστήρες αυτού του τύπου χρησιμοποιήθηκαν αρκετά στην παραγωγή ενέργειας αλλά δεν έχουν καμία ομοιότητα μεταξύ τους εξαιτίας των συνεχών βελτιώσεων και τροποποιήσεων που δέχτηκαν. Για παράδειγμα, το δοχείο που διαθέτουν σχεδιάστηκε να είναι από μέταλλο, αλλά υπάρχουν και κάποιες περιπτώσεις που διαθέτουν δοχείο από μπετό. Επίσης, υπάρχουν σφαιρικοί αντιδραστήρες αερίου αλλά και κυλινδρικοί.

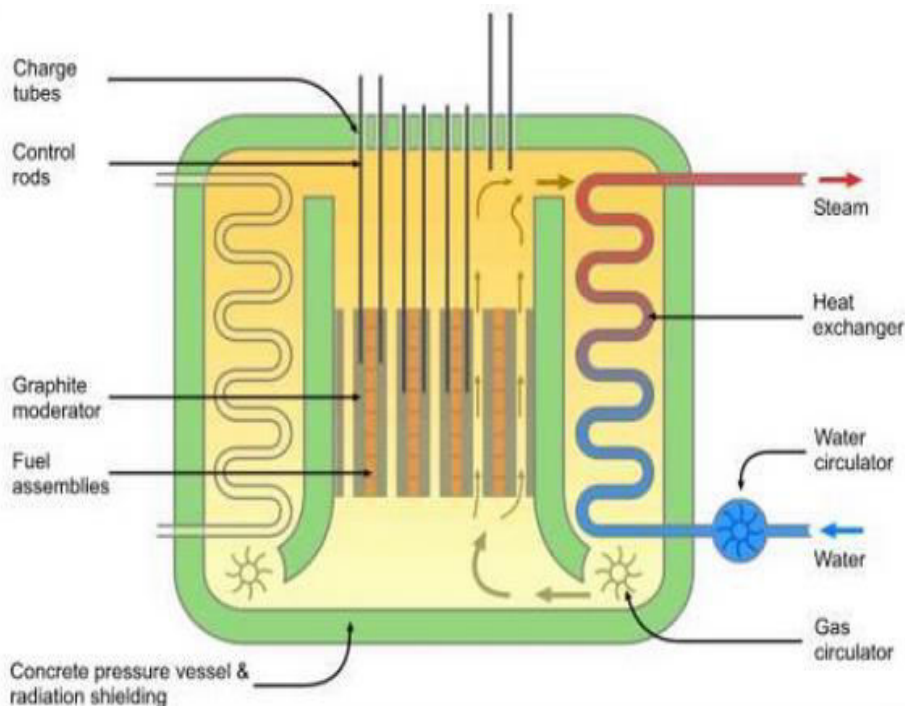
Το πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε κατά τον σχεδιασμό των συγκεκριμένων αντιδραστήρων ήταν ότι λόγω της χρήσης φυσικό καυσίμου απαιτούνται συχνές αλλαγές των σωληνώσεων. Τα αποθέματα των φυσικών καυσίμων δεν έχουν την αυτονομία που μπορεί να επιτευχθεί με το εμπλουτισμένο ουράνιο. Έτσι έπρεπε να σχεδιαστούν με κύριο χαρακτηριστικό την ύπαρξη μηχανισμού αλλαγής των σωληνώσεων του καυσίμου κατά την διάρκεια της λειτουργίας του αντιδραστήρα. Ο τελευταίος αντιδραστήρας αυτής της κατηγορίας σταμάτησε να λειτουργεί το 2014 στον πυρηνικό σταθμό Wylfa.

Η χρήση αερίου ως ψυκτικό μέσο εφαρμόστηκε και στους αντιδραστήρες βαρέως ύδατος και δημιουργήθηκαν τέσσερα μοντέλα τα οποία είναι: Lucens (Ελβετία), EL4 (Γαλλία), Bohunice KS150 (Σλοβακία), Niederaichbach (Μόναχο). Τα χαρακτηριστικά που άλλαξαν με την αλλαγή του ψυκτικού μέσου σε αέριο ήταν ο προσανατολισμός των σωληνώσεων του καυσίμου σε οριζόντιο και η πολύ υψηλή θερμοκρασία εξόδου που πλέον έφτανε τους πεντακόσιους βαθμούς.

2.2.6.7 Αερίψυκτοι Αντιδραστήρες (Προηγμένοι) – Advanced Gas Cooled Reactors – AGR)

Πρόκειται για αντιδραστήρες βρετανικής κατασκευής 2^{ης} γενιάς (εξέλιξη της Magnox) που λειτουργούν με μεγάλες θερμοκρασίες αερίου και πετυχαίνουν υψηλό βαθμό απόδοσης.

Το σχέδιο του αντιδραστήρα επιτυγχάνει ίδια κατάσταση ατμού στην είσοδο του στροβίλου όπως με έναν συμβατικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής. Η τυπική ισχύς εξόδου του γενικού σχεδίου που περιλαμβάνει 2 AGR είναι 550-670 MWe. Στον πυρήνα συναντώνται κάθετα κανάλια καυσίμου με υλικά από γραφίτη σε οργανωμένα δικτυώματα. Το ψυκτικό υγρό ρέει σε ειδικά κανάλια ανάμεσα στα δικτυώματα. Επιτυγχάνεται υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας περίπου στους 648 C. Ανοξείδωτος χάλυβας χρησιμοποιείται σαν προστατευτικό του γραφίτη για να προφυλαχθεί από την οξειδωση. Το σύννηθες καύσιμο είναι εμπλουτισμένο οξειδίο του ουρανίου. Η δομή ενός τέτοιου τύπου αντιδραστήρα φαίνεται στην Εικόνα 36. Η νοοτροπία και βασική ιδέα του σχεδιασμού στοχεύει στην επίτευξη υψηλού βαθμού απόδοσης, έχει επιτευχθεί και 41% που είναι ιδιαίτερος υψηλότερος από το 34% των σταθμών PWRs. Ο πρώτος αντιδραστήρας του τύπου αυτού τέθηκε σε παραγωγή το 1976 και οι πιο χαρακτηριστικοί εν ενεργεία είναι στην Αγγλία (Dugness B., Hartlepool κτλ.).

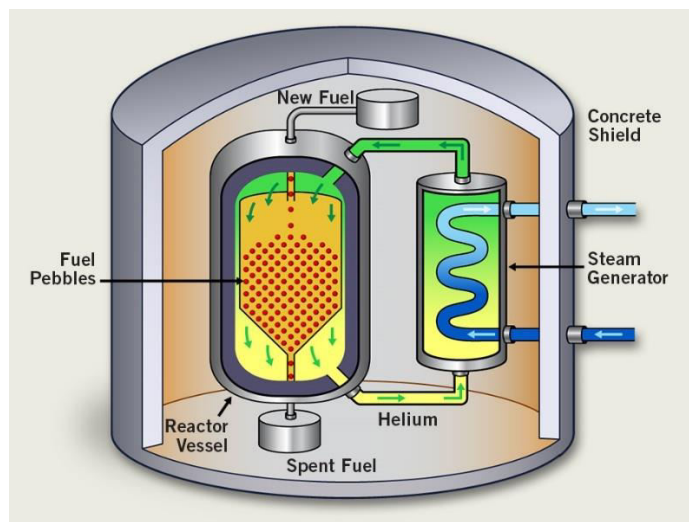


Εικόνα 37: Δομή Αντιδραστήρα AGR (Πηγή: [24])

2.2.6.8 Αερίψυκτοι αντιδραστήρες υψηλής θερμοκρασίας – (Very) High temperature Gas-Cooled Reactor [(V) – HTGR]

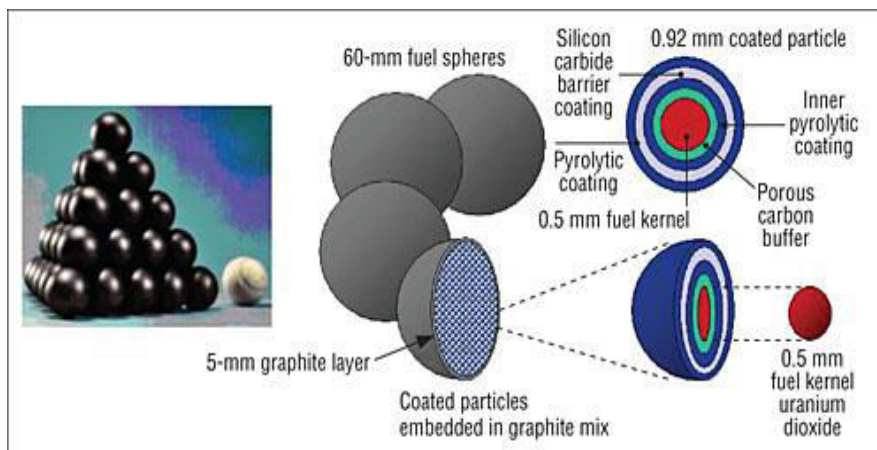
Πρόκειται για αντιδραστήρες σχεδιασμένους σε ΗΠΑ και Γερμανία που χρησιμοποιούν γραφίτη ως επιβραδυντικό μέσο και ως μέσο ψύξης το ήλιο. Είναι θερμικοί αντιδραστήρες 4^{ης} γενιάς. Το ήλιο αναμειγνύεται σε μικρές ποσότητες με ραδιενεργά αέρια που προέρχονται από την καύση. Το κύριο καύσιμο είναι ένα μίγμα εμπλουτισμένου ουρανίου U-235 και θορίου. Όταν ο αντιδραστήρας δεν αναπαράγει το ουράνιο U-235 πρέπει να είναι πάντα διαθέσιμο ενώ κατά τη λειτουργία το θόριο μετατρέπεται σε U-233. Το κόστος κατασκευής μειώνεται ανάλογα με το βαθμό εμπλουτισμού καθώς σχεδιάζονται μικρότεροι αντιδραστήρες. Το καύσιμο τοποθετείται σε συστάδες ράβδων ανά 6 και θωρακίζεται. Όλη η διάταξη στη συνέχεια τοποθετείται σε στεγανό δοχείο εγκλωβισμού.

Η λειτουργία των HTGR αντιδραστήρων μοιάζει με εκείνη των AGR. Ο άμεσος κύκλος λειτουργίας περιλαμβάνει την κίνηση του ήλιου όπου ψύχει τον αντιδραστήρα και διέρχεται από ειδικά κανάλια γραφίτη και στη συνέχεια περνά από τους αμοπαγωγούς ξανά πίσω στους κυκλοφορητές. Παράγεται υψηλής πίεσης (16MPa) και θερμοκρασίας (540 °C) ατμός και εξασφαλίζεται απόδοση της τάξεως του 40%. Το κύριο πλεονέκτημα είναι η υψηλή θερμοκρασία ψυκτικού ηλίου (815 – 870 °C) και η απευθείας χρήση του ηλίου στον αμοστρόβιλο των γεννητριών. Τέλος, η θερμοκρασία της θερμότητας που απορρίπτεται είναι υψηλή και η ενέργειά της χρησιμοποιείται σε εφαρμογές αφαλάτωσης. Με αυτό τον τρόπο ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται σε 50%. Η δομή ενός τέτοιου αντιδραστήρα φαίνεται στην Εικόνα :38.

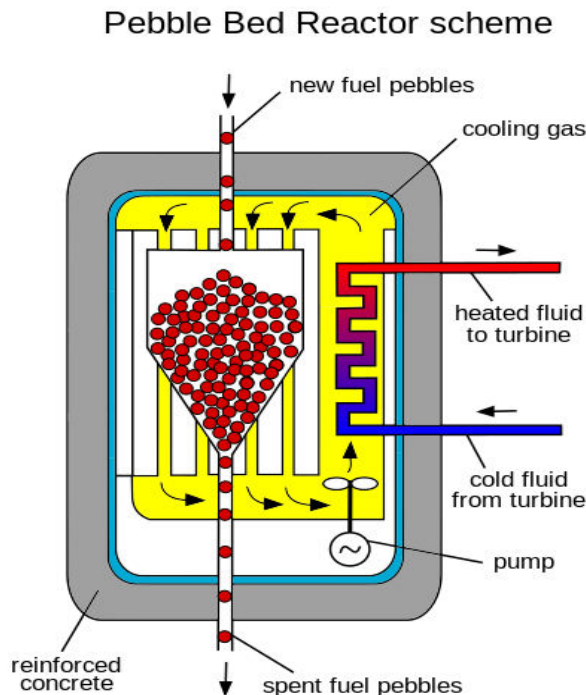


Εικόνα 38: Δομή αεριοψυκτού αντιδραστήρα υψηλής θερμοκρασίας (Πηγή: [25])

Μια υποκατηγορία των HTGR είναι οι αντιδραστήρες Pebble-bed (PBR). Οι PBR χρησιμοποιούν γραφίτη ως επιβραδυντή και είναι στην ουσία αεριοψυκτοί αντιδραστήρες υψηλής πίεσης. Έχουν σφαιρικό σχήμα και μέσα σε αυτό το σχήμα είναι διαμορφωμένο το καύσιμο. Τα σφαιρίδια έχουν μέγεθος σαν μια μπάλα του τένις και περιέχουν σφαιρίδια μικρο-καυσίμου που αποτελούνται από πυρολυτικό γραφίτη. Τα σωματίδια ονομάζονται TRISO και αποτελούνται συνήθως από ουράνιο U-235. Ο πυρήνας ενός PBR αποτελείται από χιλιάδες pebbles η ψύξη των οποίων επιτυγχάνεται από αέριο όπως το ήλιο, το άζωτο ή το διοξείδιο του άνθρακα. Χρησιμοποιούν αέριο ψυκτικό χαμηλής πίεσης και δεν χρειάζονται σωληνώσεις ανάμεσα στα σφαιρίδια. Επίσης η ασφάλεια είναι υψηλότερη λόγω απουσίας υδρογόνου και το αέριο ψυκτικό δεν μπορεί να απορροφήσει νετρόνια και να γίνει ραδιενεργό. Επιπλέον θετικό στοιχείο είναι ότι οι αντιδραστήρες αυτοί είναι συμβατοί με άλλα καύσιμα όπως θόριο, πλουτώνιο ή εμπλουτισμένο ουράνιο. Μπορεί να γίνει αλλαγή του καυσίμου χωρίς να σταματήσει η λειτουργία. Τα σφαιρίδια όταν αδειάζουν οδηγούνται σε χώρο επεξεργασίας πυρηνικών αποβλήτων.



Εικόνα 39: Σφαιρίδια πυρηνικού καυσίμου (Πηγή: [26])



Εικόνα 40: Δομή αντιδραστήρα PBR (Πηγή: [27])

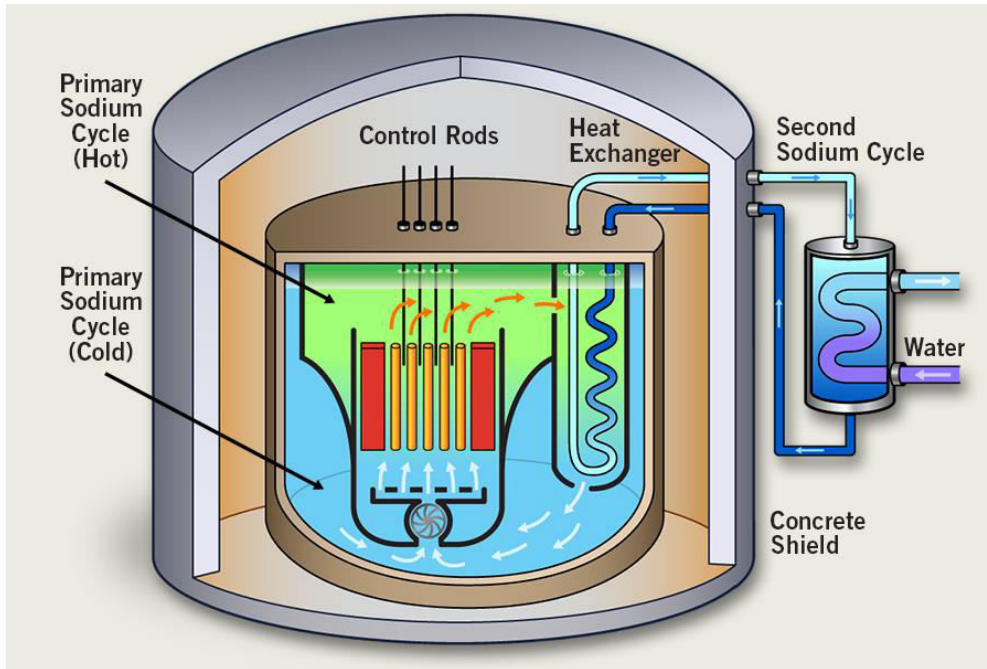
Χρησιμοποιούν παθητικά συστήματα ψύξης μέσω φυσικής κυκλοφορίας του ψυκτικού σε περίπτωση ατυχήματος. Με χρήση του φαινομένου Doppler αν παρατηρηθεί αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται η ισχύς. Αυτό το στοιχείο ασφαλείας δεν μπορεί να συμβεί σε αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος καθώς απαιτούνται συστήματα ενεργού ελέγχου. Με αυτό τον τρόπο ακόμα και αν όλα τα συστήματα της διάταξης λιώσουν ο αντιδραστήρας δεν εκρήγνυται και δεν λιώνει το εσωτερικό του πυρήνα. Ο αντιδραστήρας βρίσκεται σε μια ήρεμη κατάσταση και παραμένει εκεί. Ο αντιδραστήρας ακτινοβολεί θερμότητα αλλά το πυρηνικό καύσιμο μπορεί να απομακρυνθεί και να επισκευαστούν τα μηχανικά μέρη.

2.2.6.9 Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες

Οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες (Fast Breeder Reactor – FBR) είναι αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων. Αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως το μέλλον της πυρηνικής τεχνολογίας. Το καύσιμο που χρησιμοποιούν είναι το ισότοπο U-238 ή το θόριο. Το σημαντικό τους πλεονέκτημα είναι ότι τα κατάλοιπα εμπλουτισμού του ουρανίου – κυρίως το U-238 – μπορούν να χρησιμοποιούνται ως καύσιμο σε αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες.

Η επιστημονική κοινότητα υποστηρίζει ότι οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες είναι το μέλλον της πυρηνικής βιομηχανίας καθώς υπάρχουν επιφυλάξεις σχετικά με τα αποθέματα ουρανίου και το αυξανόμενο κόστος του. Οι χώρες που διαθέτουν πυρηνικούς σταθμούς αλλά δεν διαθέτουν κοιτάσματα ουρανίου και αναγκάζονται να το εισάγουν είναι αναγκασμένες να το εκμεταλλεύονται πλήρως. Έτσι λοιπόν χώρες όπως η Ιαπωνία, η Γαλλία, Η Γερμανία και η Αγγλία ήδη χρησιμοποιούν αυτή την κατηγορία

αντιδραστήρων. Στην Εικόνα 41 απεικονίζεται η δομή ενός τέτοιου αντιδραστήρα.



Εικόνα 41: Δομή αναπαραγωγικού αντιδραστήρα (Πηγή: [28])

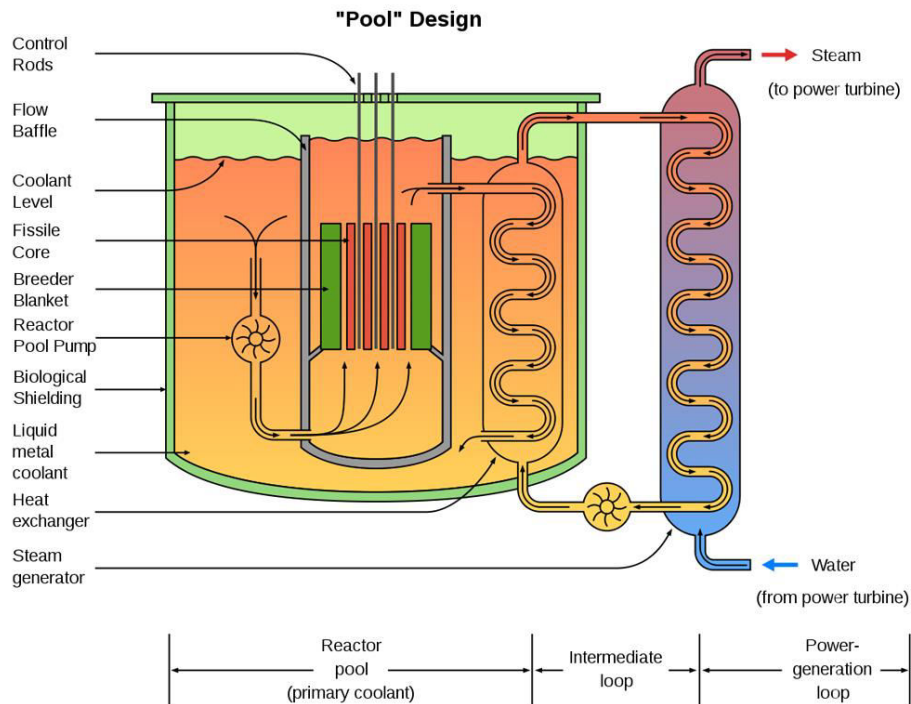
Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι βασικές υποκατηγορίες των αναπαραγωγικών αντιδραστήρων. Πρόκειται για τους:

- Αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων υγρού μετάλλου
- Αναπαραγωγικούς αεριοψυκτους αντιδραστήρες
- Αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες τετηγμένων αλάτων
- Αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος

2.2.6.10 Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων υγρού-μετάλλου (Liquid Meta Cooled Fast Breeder Reactor – LMFBR)

Είναι το πιο συνηθισμένο μοντέλο αντιδραστήρα που συναντάται για ηλεκτροπαραγωγή και χρησιμοποιεί ως καύσιμο μίγμα πλουτωνίου – ουρανίου. Ο πυρήνας τροφοδοτείται με πλουτώνιο και ο μανδύας επώασης με εμπλουτισμένο ουράνιο. Επίσης στους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες αυτής της κατηγορίας δεν υπάρχει επιβραδυντής και στο εσωτερικό του πυρήνα υπάρχει μόνο το ψυκτικό και οι ράβδοι καυσίμου. Στην Εικόνα παρουσιάζεται η δομή του αναπαραγωγικού αντιδραστήρα ταχέων νετρονίων υγρού-μετάλλου.

Liquid Metal cooled Fast Breeder Reactors (LMFBR)



Εικόνα 42: Δομή αναπαραγωγικού αντιδραστήρα ταχέων νετρονίων υγρού-μετάλλου (Πηγή: [29])

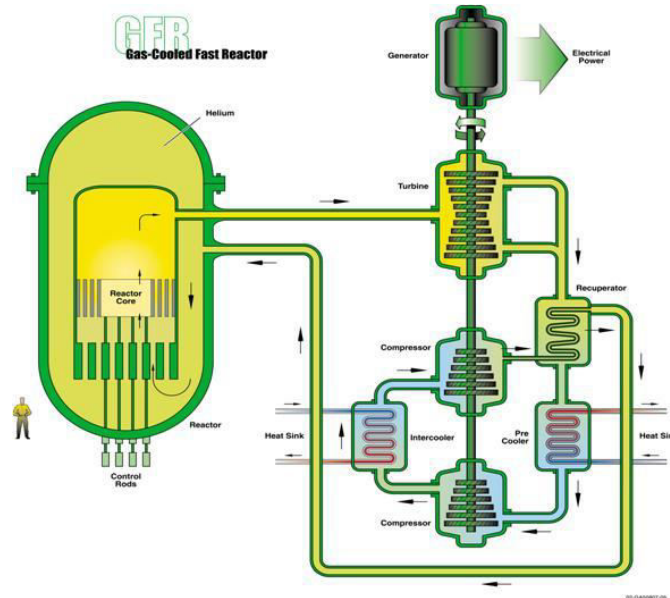
Οι περισσότεροι αντιδραστήρες LMFBR χρησιμοποιούν ως ψυκτικό μέσο το νάτριο το οποίο δεν προκαλεί επιβράδυνση στα νετρόνια και έχει μεγάλη ικανότητα απορρόφησης θερμότητας και έτσι επιτυγχάνεται λειτουργία με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Αυτό συμβάλλει στις μικρές απαιτούμενες διαστάσεις του πυρήνα. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό αυτού του τύπου αντιδραστήρα είναι η απουσία δοχείου πίεσης καθώς το ρευστό δεν βράζει και βρίσκεται περίπου σε ατμοσφαιρική πίεση. Μια ακόμα σημαντική ιδιότητα του νατρίου ως ψυκτικό μέσον είναι ότι δεν φθείρει το εσωτερικό του πυρήνα όπως το νερό. Παράγει ωστόσο λευκό καπνό καθώς αντιδρά με το νερό. Οι αντιδραστήρες LMFBR έχουν μικρότερη εκπομπή ακτινοβολίας από τους LWR καθώς οι διαρροές είναι διακρίνονται εύκολα με τον λευκό καπνό.

Το νάτριο μπορεί και απορροφά νετρόνια και γίνεται ραδιενεργό. Είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός δεύτερου κυκλώματος νατρίου γιατί δεν είναι δυνατή η απευθείας χρήση του για παραγωγή ατμού σε ατμοπαραγωγικούς σταθμούς. Χρησιμοποιούνται δύο κυκλώματα νατρίου όπου το κύριο περιέχει το ραδιενεργό νάτριο και το δεύτερο με μη ραδιενεργό νάτριο που με βοήθεια εναλλακτών μεταφέρει τη θερμότητα από το κύριο στις ατμοπαραγωγικές μονάδες.

2.2.6.11 Αναπαραγωγικοί αεριοψυκτοί αντιδραστήρες (Gas Cooled Fast Reactor – GCFR)

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει αντιδραστήρες 4^{th} γενιάς που χρησιμοποιούν ένα κράμα πλουτωνίου ουρανίου ως καύσιμο και βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο ακόμα. Ο πυρήνας που χρησιμοποιεί αυτός ο υπό

ανάπτυξη αντιδραστήρα έχει την ίδια δομή με τον LMFBR. Το ψυκτικό ήλιο έχει θερμοκρασία εισόδου περίπου 300 °C και θερμοκρασία εξόδου 520 °C και με κατευθυντήριες διατάξεις οδηγείται σε τρεις ατμοπαραγωγούς. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει ραδιενεργό νάτριο οπότε δεν χρειάζονται ενδιάμεσοι εναλλάκτες θερμότητας.



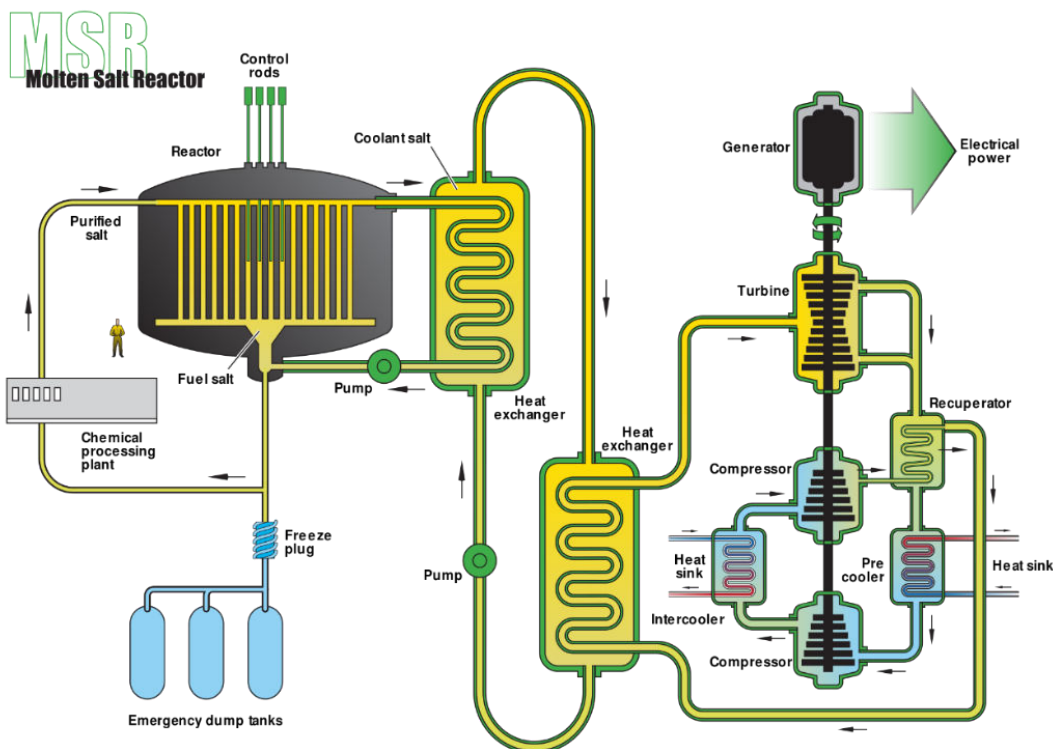
Εικόνα 43: Δομή Αναπαραγωγικού αεριοψυκτού αντιδραστήρα (Πηγή: [30])

Η χρήση ηλίου βελτιώνει σημαντικά το λόγο αναπαραγωγής καθώς δεν επιβραδύνονται τα νετρόνια όπως στα άλλα είδη αντιδραστήρων. Η συντήρηση αυτού του είδους αντιδραστήρα λόγω μη υπερβολικά ραδιενεργών ψυκτικών γίνεται σε μικρό χρονικό διάστημα. Οι βλάβες εντοπίζονται με οπτικά μέσα στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Θεωρείται πολύ πιο οικονομικός αντιδραστήρας σε σχέση με τον LMFBR.

2.2.6.12 Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες τετηγμένων αλάτων

Οι αντιδραστήρες τετηγμένων αλάτων (Molten – Salt breeder Reactor – MSBR) είναι θερμικοί αντιδραστήρες που λειτουργούν με υψηλές θερμοκρασίες και επιτυγχάνουν ψηλούς βαθμούς απόδοσης της τάξεως του 44% με χαμηλές πιέσεις χωρίς να έχουν ανάγκη δοχείου πίεσης. Ως καύσιμη ύλη χρησιμοποιούν θόριο και U-233 όπου τα καύσιμα, το γόνιμο υλικό και το ψυκτικό είναι όλα αναμειγμένα σε ομογενοποιημένο υγρό. Έτσι χρησιμοποιούνται φθοριούχα άλατα που θερμαίνονται μέχρι να λιώσουν σε μη ιξώδες υγρό. Τα άλατα δεν καταστρέφονται από την ακτινοβολία και παραμένουν αδρανή χωρίς αντιδράσεις και εκρήξεις.

Στην Εικόνα 44 παρουσιάζεται η δομή του αντιδραστήρα MSBR. Το εσωτερικό του πυρήνα αποτελείται από διάταξη γραφίτη με κανάλια για διέλευση του μίγματος τετηγμένων αλάτων.

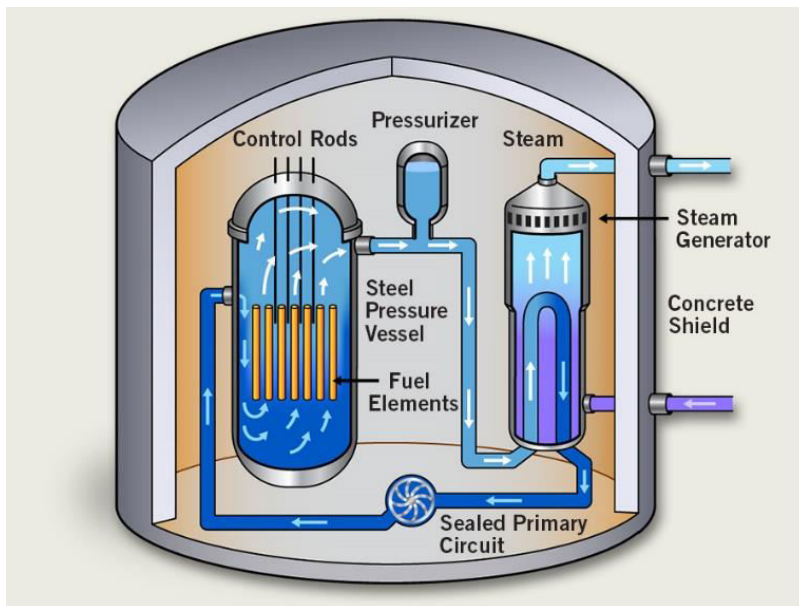


Εικόνα 44: Δομή του αντιδραστήρα τετηγμένων αλάτων (Πηγή: [31])

Η ενέργεια απορροφάται απευθείας από το υγρό το οποίο έχει αποκτήσει υψηλή θερμοκρασία και οδηγείται σε βρόγχο ψύξης. Στη συνέχεια αφού πρώτα αφαιρεθούν τα προϊόντα της σχάσης το ψυκτικό επιστρέφει στην καρδιά του αντιδραστήρα. Αυτοί οι αντιδραστήρες μπορούν να λειτουργούν χωρίς ανεφοδιασμό για μεγάλα χρονικά διαστήματα και εξοικονομούν νετρόνια απαιτώντας μικρότερες ποσότητες καυσίμου 1 – 1,2kg/ υλικό σχάσης/ MWe ισχύος εξόδου. Ωστόσο το αρνητικό στοιχείο είναι το υψηλό κόστος συντήρησης γιατί το ραδιενεργό μίγμα περνά διάμεσο πολλών εγκαταστάσεων.

2.2.6.13 Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος

Αυτοί οι αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (Light Water Breeder Reactors) παρά τις αντιθέσεις των σχεδιαστών ότι δεν γίνεται να κατασκευαστούν λόγω υψηλής απορρόφησης νετρονίων από το νερό, είναι διαθέσιμοι πλέον. Βέβαια έχουν χαμηλότερο βαθμό απόδοσης γιατί το καύσιμο είναι χαμηλότερο και η ποσότητα νερού. Το καύσιμο υλικό είναι το Th-232 το οποίο βρίσκεται σε σχετική αφθονία φυσικών πηγών. Οι αντιδραστήρες LWBR βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο υπό ανάπτυξη και στόχος τους είναι να βελτιώσουν τον τρόπο με τον οποίο αξιοποιούνται τα πυρηνικά καύσιμα.



Εικόνα 45: Δομή αναπαραγωγικού αντιδραστήρα ελαφρού ύδατος
(Πηγή: [32])

2.2.6.14 Πυρηνικοί Αντιδραστήρες Σύντηξης

Πρόκειται για αντιδραστήρες οι οποίοι αν και βρίσκονται χρόνια σε ερευνητικό πλαίσιο ακόμα χαρακτηρίζονται από πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Δε στηρίζονται στην πυρηνική σχάση αλλά στην σύντηξη. Στην πυρηνική σύντηξη πραγματοποιείται συνένωση 2 ελαφρών πυρήνων και δημιουργείται ένας βαρύτερος. Εκλύονται τεράστια ποσά ενέργειας κατά το σχηματισμό αυτό. Για να επιτευχθεί η ελεγχόμενη σύντηξη πάνω στη Γη πρέπει πρώτα να δημιουργήσουμε συνθήκες ανάλογες μ' εκείνες του Ήλιου. Οι ερευνητές πρότειναν διάφορους αντιδραστήρες σύντηξης. Στο εσωτερικό τους ένα αεριώδες νέφος από ισότοπα, το πλάσμα, θερμαίνεται σε θερμοκρασίες πάνω από 100 εκατομμύρια βαθμούς Κελσίου, ώστε τα ισότοπα να συντηκονται. Εδώ η απαιτούμενη θερμοκρασία είναι πολλαπλάσια της ηλιακής, γιατί δεν έχουμε τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε συνθήκες πίεσης ανάλογες μ' εκείνες που επικρατούν στον Ήλιο. Πρόκειται για το μεγαλύτερο τεχνικό πρόβλημα. Πράγματι, η ανάπτυξη τόσο υψηλών θερμοκρασιών και η συμπίκνωση του θερμού πλάσματος στα όρια ενός γήινου αντιδραστήρα δεν αποτελεί υπόθεση ρουτίνας. Η πυρηνική σύντηξη στη Γη αποτελεί ζητούμενο για πολλούς ερευνητές τα τελευταία πενήντα χρόνια. Αν το επιτύχουν το όφελος θα είναι διπλό. Αφενός θα αποκτήσουμε μια αστείρευτη πηγή ενέργειας που θα παράγεται από το πιο άφθονο στοιχείο της φύσης, το νερό, αφετέρου θα απαλλαγούμε από τα ορυκτά καύσιμα και τους ρύπους που εκπέμπονται από τη χρήση τους. Γι' αυτό η πυρηνική σύντηξη είναι καθαρή πηγή ενέργειας. Η ελεγχόμενη σύντηξη είναι η καλή όψη των πυρηνικών αντιδράσεων. Η καθαυτή αντίδραση σύντηξης δεν αφήνει ραδιενεργά κατάλοιπα, αν και το τρίτιο είναι ραδιενεργός μορφή του υδρογόνου. Επίσης ένας αντιδραστήρας σύντηξης δεν μπορεί να υποστεί τήξη. Η ποσότητα καύσιμου υλικού είναι τόσο μικρή, ώστε σύντομα εξαντλείται. Επιπλέον η

αντίδραση σύντηξης είναι τόσο δύσκολο να συντηρηθεί, ώστε οποιαδήποτε βλάβη ή ατύχημα στον αντιδραστήρα θα τη σταματούσε ακαριαία. Τέλος, στην περίπτωση διαφυγής του τριτίου αυτό ανεβαίνει αμέσως στα ψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Βασικό πρόβλημα είναι η μεγάλη ροή νετρονίων που παράγονται ως προϊόν κάθε αντίδρασης σύντηξης. Αυτά καθιστούν με το πέρασμα του χρόνου ραδιενεργά τα εσωτερικά τοιχώματα του αντιδραστήρα. Η μεγαλύτερη πρόκληση όμως για τους επιστήμονες είναι το πώς θα ελέγξουν αποτελεσματικά τις τεράστιες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται μέσα στους αντιδραστήρες. Σε αυτούς τους αντιδραστήρες δε θα χρησιμοποιείται ως καύσιμο το βαρύ θόριο ή ουράνιο αλλά το υδρογόνο που βρίσκεται σε αφθονία και δεν είναι ραδιενεργό. Προφανώς οι αντιδραστήρες σύντηξης θα είναι λιγότερο επικίνδυνοι καθώς το μόνο ραδιενεργό στοιχείο που θα παράγεται είναι το τρίτιο, που θεωρείται γενικά ασφαλές για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Το αρνητικό στοιχείο είναι ότι απαιτούνται τεράστιες πιέσεις για τη σύντηξη και το οικονομικό κόστος γίνεται τεράστιο.

2.2.7 Περιπτώσεις ατυχημάτων

Παρόλο που τα μέτρα ασφαλείας και οι προληπτικοί σχεδιασμοί που γίνονται έχουν υπάρξει περιπτώσεις αστοχίας που οδήγησαν σε ατύχημα. Το θετικό ήταν ότι μόνο τρία εξ αυτών είχαν σοβαρές επιπτώσεις στον άνθρωπο και το περιβάλλον. Τα έξι κυριότερα ατυχήματα θεωρούνται:

- Κιστίμ, Ρωσία, 29 Σεπτεμβρίου 1957
- Cumberland, Βορειοδυτική Αγγλία, 10 Οκτωβρίου 1957
- Three Mile Island, ΗΠΑ, 28 Μαρτίου 1979
- Τσέρνομπιλ, Ουκρανίας, 26 Απριλίου 1986
- Tokaimura, Ιαπωνία, 30 Σεπτεμβρίου 1999
- Fukushima, Ιαπωνία, 11 Μαρτίου 2011

Τα ατυχήματα του Τσέρνομπιλ, της Fukushima και του Three Mile Island κατέχουν τις πρώτες θέσεις στην λίστα των μεγαλύτερων ατυχημάτων στην ιστορία. Εκτενέστερα:

- **Three Mile Island, ΗΠΑ, 28 Μαρτίου 1979**

Στην Πενσυλβάνια των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής λειτουργούσε μονάδα παραγωγής ενέργειας από το 1974. Είχαν εγκατασταθεί δύο αντιδραστήρες τύπου PWR με σχεδόν όμοια ισχύ (800 MWe-900MWe αντίστοιχα).

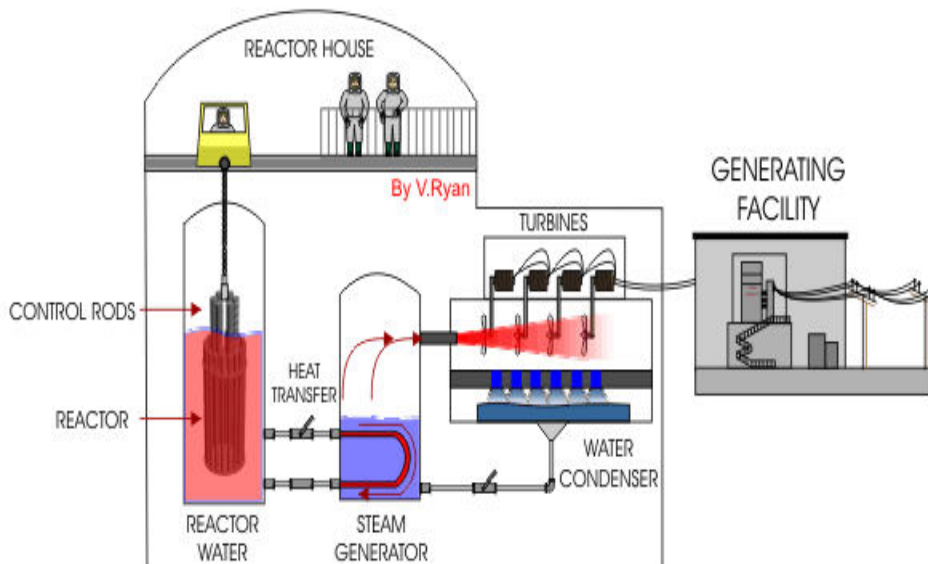
Στις 28 Μαρτίου 1979 και ενώ ο ένας αντιδραστήρας ήταν κλειστός λόγω εργασιών ανανέωσης της καύσιμης ύλης του και ο δεύτερος δούλευε στο 96% της ισχύος του, σταμάτησαν λόγω βλάβης οι αντλίες του εφεδρικού κυκλώματος που είναι υπεύθυνο για την ψύξη. Ως βλάβη δεν θεωρείται ιδιαίτερης σημασίας, ενώ ο ρόλος του κυκλώματος αυτού ήταν η απαγωγή θερμότητας από τον πρωτεύον σύστημα ψύξης της καρδιάς του αντιδραστήρα. Άμεση ήταν η αντίδραση των συστημάτων ασφαλείας με σκοπό να τεθεί εκτός λειτουργίας ο στρόβιλος και συνεπώς ο αντιδραστήρας.

Έτσι η δημιουργία σχάσεων διακόπτεται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα- της τάξεως των δευτερολέπτων. Ακολούθως, λόγω της μεγάλης θερμότητας που υπήρχε στον αντιδραστήρα εξαιτίας της μέχρι τότε λειτουργίας του, αυξήθηκε τόσο η πίεση με αποτέλεσμα το άνοιγμα των βαλβίδων εκτόνωσης και την διοχέτευση του ψυκτικού υγρού της καρδιάς του αντιδραστήρα στο δοχείο εκτόνωσης.



Εικόνα 46: The Three Mile Island facility near Harrisburg, Pennsylvania, (Πηγή: [33])

Παρόλο που η θερμότητα μειώθηκε και τα συστήματα ελέγχου έδειξαν ότι η βαλβίδα εκτόνωσης έκλεισε, αυτό δεν συνέβη ποτέ. Η βαλβίδα συνέχισε να είναι ανοιχτή και να αφήνει στο ψυκτικό υγρό να μεταφέρεται στο δοχείο εκτόνωσης.



Εικόνα 47: Διάγραμμα αντιδραστήρα TMI (Πηγή: [34])

Αποτέλεσμα της εσφαλμένης λειτουργίας της βαλβίδας εκτονώσεως ήταν να μην έχει γίνει αντιληπτό από τους εργαζομένους ότι έχει αρχίσει η αντίστροφη μέτρηση ενός σοβαρού ατυχήματος. Η καρδιά του αντιδραστήρα μην έχοντας πλέον ικανοποιητική ποσότητα ψυκτικού υγρού θερμάνθηκε

πάνω από το επιτρεπόμενο όριο και έλιωσε μεγάλο μέρος της καθιστώντας τον αντιδραστήρα πλέον εκτός λειτουργίας.

Οι εργαζόμενοι μην έχοντας σωστή πληροφόρηση από το όργανα που έδειχναν την θέση της βαλβίδας και χωρίς να έχει προβλεφθεί κατά τον σχεδιασμό του αντιδραστήρα η τοποθέτηση αισθητήρα μέτρησης της στάθμης του πτητικού υγρού, νόμισαν ότι υπάρχει υπερπλήρωση της καρδιάς και μείωσαν ακόμα περισσότερο την ροή του μέσα στην καρδιά. Το θετικό ήταν ότι παρόλο τα αλυσιδωτά λάθη που ακολούθησαν δεν παρατηρήθηκε καμία διαρροή του δοχείου πίεσεως. Ύστερα από μία ημέρα και αφού η ζημία είχε επέλθει, έγινε αντιληπτό το αίτιο του ατυχήματος και οι χειριστές προέβησαν στην ρίψη άφθονου πτητικού υγρού μέσα στην καρδιά του αντιδραστήρα.

Το ατύχημα αυτό ήταν η αιτία του πλήρους ανασχεδιασμού του αντιδραστήρα και των συστημάτων ασφαλείας σε ένα πυρηνικό εργοστάσιο. Οι αναλύσεις του ατυχήματος έδειξαν ότι οι αιτίες ήταν μία σειρά από λάθη που συνέβησαν από εργαζομένους και μηχανήματα. Από πλευράς σχεδιασμού, θα έπρεπε να υπάρχει άμεση πληροφόρηση προς τους χειριστές για την στάθμη του πτητικού υγρού, καθώς και για την θέση της βαλβίδας εκτόνωσης.

Η άγνοια του αντικειμένου από τους εργαζομένους και η ελλιπής εκπαίδευσή τους βοήθησε στην εξέλιξη του ατυχήματος και όχι στην αποτροπή του. Η κυβέρνηση των ΗΠΑ και η υπεύθυνη ρυθμιστική αρχή ανέλαβε να τροποποιήσει την εκπαίδευση του προσωπικού και έγινε πιο αυστηρή η διαδικασία με την οποία μπορούσε να αδειοδοτηθεί η λειτουργία ενός πυρηνικού εργοστασίου.

Οι αντιδράσεις των πολιτών ήταν έντονες και για αυτόν τον λόγο δεν εγκρίθηκε καμία άδεια για την κατασκευή πυρηνικού αντιδραστήρα εκείνο το χρόνο. Τα προληπτικά μέτρα και μετρήσεις από την γύρω περιοχή για την εξακρίβωση αν έχει επηρεαστεί το περιβάλλον ήταν εκτενή, αλλά χωρίς κανένα ανησυχητικό αποτέλεσμα. Μέσα από τα δείγματα γύρω από το σταθμό δεν παρουσιάστηκε οποιαδήποτε ανησυχητική συγκέντρωση ραδιενεργών προϊόντων, εκτός των ευγενικών αερίων.

Τα ευγενή αέρια τα οποία μετρήθηκαν στην ατμόσφαιρα γύρω από το σταθμό ήταν αποτέλεσμα τις σκόπιμης απελευθέρωσής τους στο περιβάλλον με σκοπό να περιοριστεί η πίεση που συνέχιζε να υφίσταται στο εσωτερικό του κυκλώματος ψύξης της καρδιάς του αντιδραστήρα και να γίνει δυνατή η διοχέτευση του πτητικού υγρού. Τα δείγματα που πάρθηκαν δεν περιορίστηκαν αλλά ήταν εκτενή από αέρα, φυτά, ζώα και νερό για πολλούς μήνες μετά το ατύχημα.

Μέχρι να αποδειχτεί ότι η απελευθέρωση των αερίων στο περιβάλλον δεν είναι επιζήμια για τον άνθρωπο ο κυβερνήτης της περιοχής πρότεινε στους πολίτες (γυναίκες και μικρά παιδιά) να μην βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη των επτά χιλιομέτρων γύρω από τον αντιδραστήρα. Για τα επόμενα δεκαεπτά έτη οργανισμοί όπως:

- Environmental Protection Agency
- NRC
- Department of Health
- Υπουργείο Υγείας

ασχολήθηκαν εκτενέστερα με το ατύχημα προκειμένου να διαπιστώσουν αν σε επόμενες δεκαετίες θα εμφανιστούν προβλήματα στην υγεία των

κατοίκων της γύρω περιοχής. Τα χρόνια αυτά πάρθηκαν μετρήσεις από περίπου τριάντα χιλιάδες άτομα με τελικό συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει συσχέτιση του ατύχηματος του αντιδραστήρα με μεταβολή στην υγεία των ανθρώπων της περιοχής. Όλες οι μετρήσεις ποσοστού ραδιενέργειας ήταν πολύ μικρότερες από την φυσική ραδιενέργεια, λιγότερο του 5%, με ελάχιστες εξαιρέσεις που πλησίαζαν το 40% αλλά ακόμα και σε αυτή την περίπτωση δεν ήταν επιβλαβή. Η μόνη παρατήρηση που έγινε ήταν ψυχολογικές μεταπτώσεις των πολιτών της γύρω περιοχής για σύντομο χρονικό διάστημα ύστερα από το ατύχημα.

Η επαναλειτουργία του πυρηνικού αντιδραστήρα άργησε για πολλά χρόνια διότι διήρκεσε πάνω από μία δεκαετία η απομάκρυνση του κατεστραμμένου καυσίμου από το εσωτερικό του. Το κόστος του όλου εγχειρήματος πλησίασε το ένα δις δολαρίων και στα μέσα της δεκαετίας του '80 επαναλειτούργησε η μονάδα ένα του πυρηνικού εργοστασίου που όμως πλέον διέθετε αυξημένα μέτρα ασφαλείας και είχε περάσει σε αυτήν όλη η γνώση που είχε αποκομισθεί από την καταστροφή της πρώτης μονάδας.

- **Τσέρνομπιλ, Ουκρανίας, 26 Απριλίου 1986**



Εικόνα 48: Εργοστάσιο Τσέρνομπιλ (Πηγή: [35])

Το ατύχημα που συνέβη στο Τσέρνομπιλ της Ουκρανίας το 1986 θεωρείται το μεγαλύτερο και πιο καταστροφικό στην ιστορία. Τα ραδιενεργά του απόβλητα απλώθηκαν σε χιλιάδες χιλιόμετρα γύρω από το εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας και οι καιρικές συνθήκες ευνόησαν την εξάπλωση σχεδόν σε όλο το Βόρειο ημισφαίριο. Παρατηρήθηκαν αυξημένες μετρήσεις ραδιενέργειας σε χώρες όπως ο Καναδάς, οι ΗΠΑ και η Ιαπωνία.

Γεωγραφικά το Τσέρνομπιλ βρίσκεται στα σύνορα με την Ρωσία και περιστοιχίζονταν από χωριά και πόλεις της τάξης των 120000 κατοίκων η καθεμία. Παραπλεύρως του εργοστασίου υπάρχει και ο ποταμός και το αντίστοιχο χωριό, που επλήγει άμεσα από τον ατύχημα, Πρίπιατ.

Στις εγκαταστάσεις του σταθμού είχαν εγκαθιδρυθεί τέσσερις πυρηνικοί αντιδραστήρες σχεδιασμένοι βάση των κανονισμών του *Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalnyy* (RMBK). Σήμερα δεν λειτουργεί κανένας από αυτούς ύστερα από διαδοχικό κλείσιμο και των τεσσάρων. Ο τέταρτος αντιδραστήρας ήταν ο υπεύθυνος για το ατύχημα του 1986, ο δεύτερος έκλεισε πέντε χρόνια μετά ύστερα από φωτιά που ξέσπασε στις εγκαταστάσεις του και ο πρώτος και ο τρίτος έκλεισαν με διαφορά τριών χρόνων το 2000 ύστερα από διεθνείς πιέσεις.

Η ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου εργοστασίου ήταν ότι τροφοδοτούσε με ηλεκτρική ισχύ όλα τα συστήματα για την λειτουργία του από την ισχύ που το ίδιο παρήγαγε. Για αυτόν τον λόγο, υπήρχαν ζεύγη στο ενδεχόμενο που συμβεί οτιδήποτε και σταματήσει η λειτουργία του αντιδραστήρα και συνεπώς η λειτουργία των αυτόματων συστημάτων να μπορέσουν να τροφοδοτηθούν με ρεύμα τα συστήματα ασφαλείας. Εκείνη την ημέρα θα διεξαγόταν μία άσκηση ασφαλείας που θα αναπαριστούσε ακριβώς αυτό το ενδεχόμενο.

Ύστερα από μελέτες και αναλύσεις που διεξήχθησαν τα αίτια για το ατύχημα ήταν:

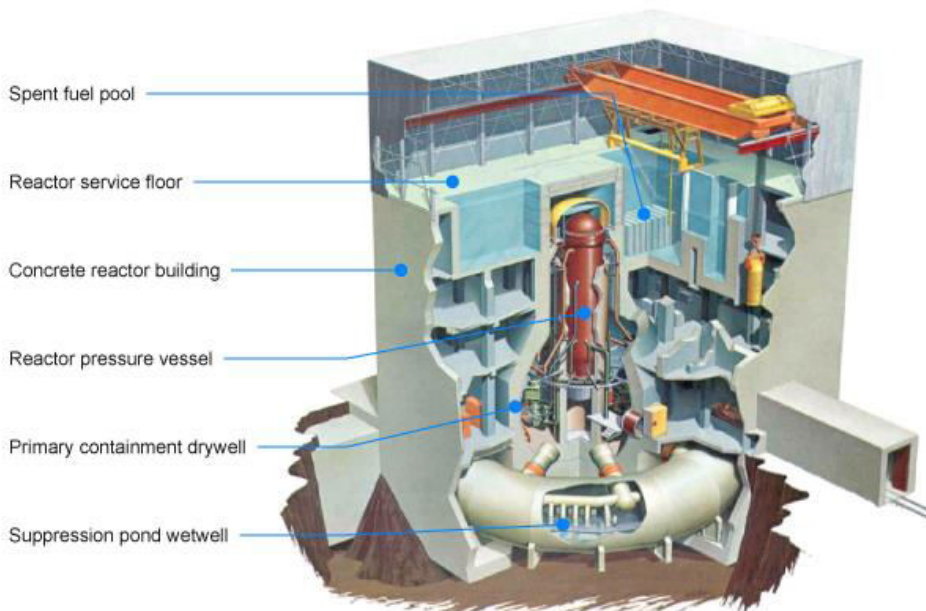
- Κακός σχεδιασμός: Καθοριστικό γεγονός για το ατύχημα πριν καν ξεκινήσει η διαδικασία της άσκησης ήταν ο σχεδιασμός των συγκεκριμένων αντιδραστήρων. Αυτό συνέβαινε διότι από κατασκευής οι αντιδραστήρες τύπου RMBK είναι πολύ ασταθής κατά την λειτουργία τους σε χαμηλές τιμές ισχύος. Η αρμόδια αρχή ήταν ενήμερη για το χαρακτηριστικό αυτό του αντιδραστήρα αλλά δεν προέβει σε καμία προληπτική ενέργεια ώστε να αποφευχθεί κάποιο πιθανό ατύχημα. Αμέσως μετά το ατύχημα και μαζί με την οικονομική βοήθεια των δυτικών χωρών αναβαθμίστηκαν τα συστήματα των υπόλοιπων εν λειτουργία αντιδραστήρων σε ολόκληρη την Σοβιετική Ένωση, ώστε να μην συμβεί ξανά κάτι παρόμοιο.
- Ελλιπής εκπαίδευση προσωπικού: Μία σειρά από λάθη που έγιναν από το προσωπικό που εργαζόταν στην βάρδια είχε σαν αποτέλεσμα να βοηθήσει την εξέλιξη του ατυχήματος και όχι την αναστολή του. Οι εργαζόμενοι δεν ακολούθησαν τις διατάξεις ασφαλείας και έκλεισαν τα αυτόματα συστήματα ασφαλείας ενώ απαγορευόταν και παράκουσαν τις εντολές για τον ελάχιστο αριθμό ράβδων για τον έλεγχο της καρδιάς του αντιδραστήρα. Σε περίπτωση που τα συστήματα ασφαλείας λειτουργούσαν κανονικά θα ήταν δυνατός ο περιορισμός της έκτασης της καταστροφής. Έτσι, όταν έγινε αντιληπτό από τους εργαζομένους δεν υπήρχε διαθέσιμος χρόνος για αντίδραση.

Η απότομη αύξηση της απόδοσης μαζί με την αύξηση της θερμοκρασίας λόγω των κλειστών συστημάτων ασφαλείας οδήγησε στην εξάτμιση μέρους της καύσιμης ύλης και ταχεία μετατροπή του ψυκτικού υγρού σε ατμό. Η έκρηξη που ακολούθησε ήταν αποτέλεσμα της εκτόνωσης του ατμού στο περιβάλλον. Όλα τα εξαρτήματα του αντιδραστήρα, όπως η καρδιά και το καπάκι βάρους αρκετών τόνων, μαζί με τμήματα του κτηρίου διαλύθηκαν και εκτοξεύτηκαν εκτός αυτού. Το ραδιενεργό καύσιμο ήταν εκτεθειμένο στην ατμόσφαιρα κάτι που ανέβασε τα όρια ραδιενέργειας και προκάλεσε τον θάνατο σε αρκετούς πυροσβέστες που κατέφθασαν για να σβήσουν τις φωτιές που είχαν ξεσπάσει. Προκειμένου να μην περάσει το ραδιενεργό καύσιμο στον υδροφόρο ορίζοντα, αποφασίστηκε η δημιουργία μίας πλάκας

από μπετό η οποία είχε ενσωματωμένο σύστημα για την ψύξη. Μέσω του συστήματος αυτού, θα μπορούσε να επιτευχθεί η σταθεροποίηση του ψυκτικού υγρού. Η πλάκα αυτή τοποθετήθηκε κάτω από τον αντιδραστήρα μέσω μίας σήραγγας που δημιουργήθηκε. Προκειμένου να απομονωθεί το περιβάλλον από τα ραδιενεργά αέρια που εκλύονταν από την καρδιά του αντιδραστήρα, δημιουργήθηκε μία σαρκοφάγος από τριακόσιους χιλιάδες τόνους μπετό.

- **Φουκουσίμα (11 Μαρτίου 2011)**

Η Ιαπωνία διαθέτει 55 πυρηνικούς αντιδραστήρες οι έξι εκ των οποίων βρίσκονται στη Φουκουσίμα I (Fukushima Dai-ichi). Από αυτούς παράγεται το 29% της ενέργειας που καταναλώνεται στη χώρα. Οι 6 αντιδραστήρες στη Φουκουσίμα στεγάζονταν σε τρία κτήρια και το τέταρτο κτήριο ήταν αποθήκη των πυρηνικών αποβλήτων. Οι αντιδραστήρες ήταν τύπου BWR (Boiling Water Reactor) ζέοντος ύδατος. Καύσιμη ύλη ήταν το ουράνιο 235 ή μίγμα πλουτωνίου (238, 239, 240, 242, 244) και ουρανίου (235).



Εικόνα 49: Η δομή του αντιδραστήρα BWR στη Φουκουσίμα (Πηγή: [36])

Την ημέρα του σεισμού λειτουργούσαν οι αντιδραστήρες 1,2, και 3 και οι υπόλοιποι βρίσκονταν σε συντήρηση. Με το σεισμό εισήχθησαν οι ράβδοι ελέγχου ανάμεσα στα πυρηνικά καύσιμα σε όλους τους αντιδραστήρες. Αυτή η διαδικασία καλύπτει τα καύσιμα ώστε να διακοπεί η θέρμανση του νερού και να σταματήσουν οι αλυσιδωτές αντιδράσεις. Παρόλα αυτά οι θερμοκρασίες στα καύσιμα είναι τεράστιες και χρειάζονται λίγες μέρες ώστε να ψυχθούν και να αποφευχθεί το λιώσιμο της κατασκευής από την άνοδο της θερμοκρασίας και τη διαρροή ραδιενέργειας. Τα προβλήματα χειροτέρεψαν λίγο μετά το τσουνάμι που χτύπησε το εργοστάσιο μετά το μεγάλο σεισμό.

Μετά το σεισμό υπήρξε διακοπή ηλεκτρικού ρεύματος συνεπώς το σύστημα ψύξης ήταν αδύνατο να λειτουργήσει. Τέθηκαν σε λειτουργία γεννήτριες diesel που μπορούσαν να εξασφαλίσουν ψύξη για κάποιες επιπλέον ώρες ωστόσο με το τσουνάμι καταστράφηκαν και αυτές. Δεν υπήρχε τρόπος να αποφευχθεί η άνοδος της θερμοκρασίας και της πίεσης στο

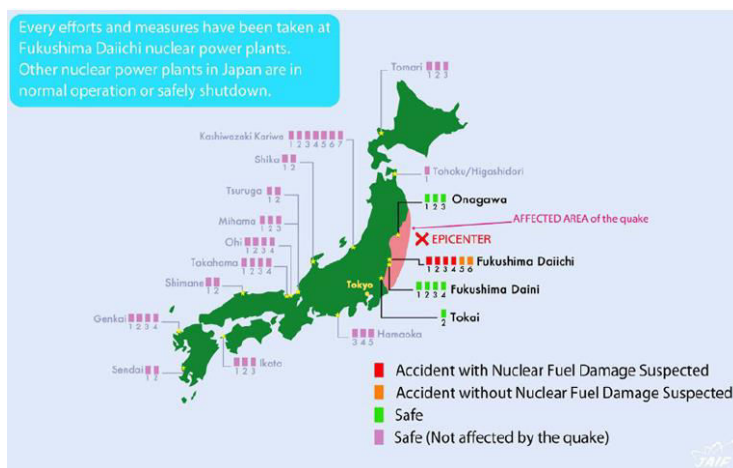
εσωτερικό του πυρήνα. Το πρώτο βήμα ήταν η απελευθέρωση ραδιενεργού νέφους υδρογόνου ώστε να αποφευχθεί η έκρηξη από την άνοδο της πίεσης. Παράλληλα το καύσιμο ζirkόνιο απέκτησε θερμοκρασία 1200 C και αντέδρασε με το νερό δίνοντας οξείδιο του ζirkονίου και υδρογόνο. Μόλις ο ραδιενεργός ατμός βγήκε από τις βαλβίδες εκτόνωσης τότε το υδρογόνο αντέδρασε με το οξυγόνο του αέρα ή του νερού και πραγματοποιήθηκε έκρηξη. Το κέλυφος του πυρήνα δεν καταστράφηκε αλλά κατέρρευσε μερικώς το εξωτερικό περίβλημα που είχε στόχο να απομακρύνει την πίεση.

Δεν υπήρχε κανένας τρόπος να ψυχθεί το σύστημα χωρίς ηλεκτρική ενέργεια οπότε οι αρμόδιες αρχές αποφάσισαν να ψύξουν το σύστημα με απευθείας θαλασσινό νερό στην τελευταία προσπάθεια να αποφευχθεί η πλήρης τήξη του κελύφους του πυρήνα. Όμως είχε ήδη πραγματοποιηθεί τήξη στο εσωτερικό των πυρήνων και τα καύσιμα είχαν καταστραφεί και εξέπεμπαν ραδιενεργό ατμό. Τα συστατικά του ατμού ήταν ραδιενεργό κάσιο – 137 και ιώδιο – 131. Δυστυχώς οι ηλεκτρικοί πίνακες που ρύθμιζαν τη λειτουργία των ηλεκτρογεννητριών του συστήματος ψύξης βρίσκονταν στο πλημμυρισμένο από το τσουνάμι υπόγειο.

Στις 12 Μαρτίου 2011 σημειώθηκε η πρώτη έκρηξη και η ραδιενέργεια που εκλύθηκε είχε φτάσει στο ανώτατο επιτρεπτό όριο. Η περιοχή φυσικά κηρύχθηκε σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης και σε ακτίνα 20 χιλιομέτρων εκκενώθηκαν τα πάντα. Σε απόσταση 3 χιλιομέτρων κηρύχθηκε και το Φουκουσίμα ΙΙ.

Οι Ιάπωνες στην αναφορά τους στη Διεθνή Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (IAEA) ανέφεραν ότι το ασφάλινο κέλυφος του αντιδραστήρα δεν έχει υποστεί ζημιά και δεν υφίσταται κίνδυνος επιπέδου Τσέρνομπιλ ή Πενσιλβάνια. Η κλίμακα πυρηνικών ατυχημάτων έχει εύρος από 1 έως 7 και αρχικά το ατύχημα στη Φουκουσίμα αξιολογήθηκε ως επιπέδου 4 και στο τέλος ως επιπέδου 7, όπου μέχρι σήμερα μόνο αυτό και το Τσέρνομπιλ είναι επιπέδου 7. Οι άμεσες συνέπειες του νέφους ήταν 190 άνθρωποι σοβαρά μολυσμένοι με ραδιενέργεια. Στη συνέχεια το νέφος κατευθύνθηκε στη Ρωσική Χερσόνησο Καμτσάτκα και την επόμενη μέρα το πυρηνικό εργοστάσιο της Οναγκάουα κηρύχθηκε σε έκτακτη ανάγκη λόγω αυξημένων ποσοστών ραδιενέργειας.

Στις 14 Μαρτίου σημειώθηκε ισχυρός μετασεισμός και προκλήθηκαν 2 εκρήξεις όπου αργότερα ανακοινώθηκε πρόβλημα στο σύστημα ψύξης και του αντιδραστήρα 2.



Εικόνα 50: Θέσεις πυρηνικών εργοστασίων Ιαπωνίας (Πηγή: [37])

Στις 15 Μαρτίου σημειώθηκαν άλλες 2 εκρήξεις στον αντιδραστήρα 2 ενώ παράλληλα είχε ξεσπάσει φωτιά στον αντιδραστήρα 4. Με την έκρηξη σημειώθηκε ζημιά στο εσωτερικό περίβλημα του αντιδραστήρα 2 με αποτέλεσμα να σημειωθεί διαρροή ραδιενεργών υγρών και ατμού. Οι τιμές ραδιενέργειας ξεπερνούσαν κατά 400 φορές το ανώτατο επιτρεπτό όριο.



Εικόνα 51: Θέση αντιδραστήρων και προσπάθεια κατάσβεσης της πυρκαγιάς
(Πηγή: [38])

❖ Κλίμακα πυρηνικών ατυχημάτων

Βαθμίδα 7

- Ατύχημα στη μονάδα 4 του Τσέρνομπιλ (Ουκρανία, 26 Απριλίου 1986).
- Νέα αξιολόγηση ατυχήματος Φουκουσίμα (Ιαπωνία 2011)

Βαθμίδα 6

- Ατύχημα στο σταθμό επεξεργασίας αποβλήτων στη Ρωσία (Kyshtym – 1957)

Βαθμίδα 5

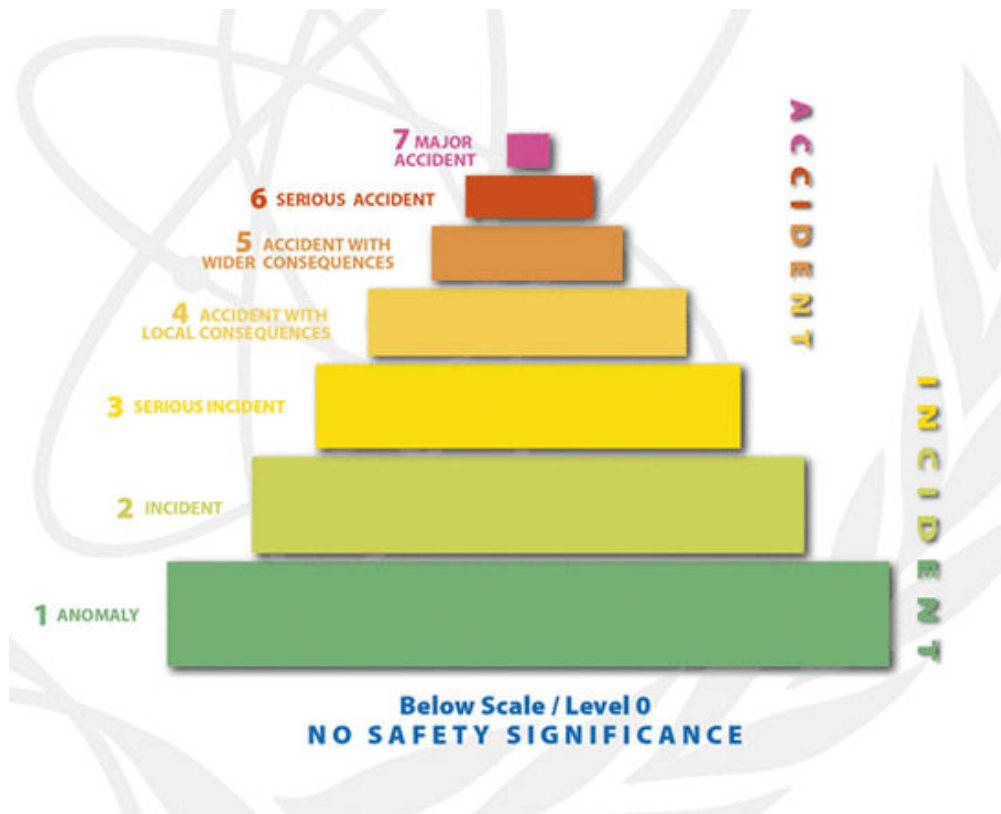
- Μερική τήξη του πυρήνα του αντιδραστήρα στο πυρηνικό εργοστάσιο Three-Mile Island (ΗΠΑ – 1979)
- Διαροή ραδιενεργών υλικών στο Windscale (Ηνωμένο Βασίλειο – 1957).

Βαθμίδα 4

- Διαρροή ραδιενεργών υλικών στο Windscale (Ηνωμένο Βασίλειο – 1973).
- Βλάβες σε πυρηνικές εγκαταστάσεις (Γαλλία 1980)

ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

- Έκθεση εργατών σε ακτινοβολία (Αργεντινή 1983)
- Αρχική αξιολόγηση ατυχήματος Φουκουσίμα (Ιαπωνία 2011)



Εικόνα 52: Κλίμακα ατυχήματος (Πηγή: [39])

3 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

3.1 Κατασκευή - οικονομική αξιολόγηση

Η πυρηνική ενέργεια είναι μια τεχνολογία έντασης κεφαλαίου (capital – intensive technology). Ο χαρακτηρισμός αυτός δίνεται ως μέτρο της αποδοτικότητας μια επιχείρησης στην ανάπτυξη των περιουσιακών της στοιχείων. Υπολογίζεται ως ποσοστό της συνολικής αξίας των ενεργητικών στοιχείων εσόδων από τις πωλήσεις που δημιουργούνται σε μια δεδομένη περίοδο. Η ένταση κεφαλαίου δείχνει πόσα χρήματα επενδύονται για την παραγωγή ενός δολαρίου των εσόδων από τις πωλήσεις. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι το κόστος της πυρηνικής ηλεκτρικής ενέργειας από τις νέες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής κυμαίνονται από \$ 30 έως \$ 57/MWh, ανάλογα με το κόστος της επένδυσης (\$ 200- \$2500/kW), προεξοφλητικό επιτόκιο (10% -15%), χρόνο κατασκευής (5-7 έτη) και οικονομική ζωή (25-40 χρόνια) και την εκμάθηση της τεχνολογίας. Το οριακό κόστος των πρώτων-του κάθε είδους αντιδραστήρα ή οι δυσμενείς οικονομικές παράμετροι θα αυξήσουν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας σε \$47- \$81/MWh. Το κόστος της πυρηνικής ενέργειας είναι συγκρίσιμο με του άνθρακα ή του φυσικού αερίου (Εικόνα 53). Η τιμή του άνθρακα μεταξύ \$ 10 και \$ 25/tCO₂ κάνει την πυρηνική ενέργεια οικονομικά ανταγωνιστική. Το κόστος από πυρηνική ενέργεια εκτιμάται σε € 2,37 c/kWh, άνθρακα €2,81 c/kWh και φυσικό αέριο € 3,23 c/kWh. Με επιβάρυνση των εκπομπών CO₂ με € 20/tCO₂ οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνονται σε € 4,43 c/kWh για άνθρακα και € 3,92 c/kWh για φυσικό αέριο.

	nuclear	coal	gas
Finland	2.76	3.64	-
France	2.54	3.33	3.92
Germany	2.86	3.52	4.90
Switzerland	2.88	-	4.36
Netherlands	3.58	-	6.04
Czech Rep	2.30	2.94	4.97
Slovakia	3.13	4.78	5.59
Romania	3.06	4.55	-
Japan	4.80	4.95	5.21
Korea	2.34	2.16	4.65
USA	3.01	2.71	4.67
Canada	2.60	3.11	4.00

Εικόνα 53: Κόστος kWh (2010) (Πηγή: OECD/IEA NEA 2005)

Αρκετές χώρες έχουν αντιμετωπίσει μεγάλη αναμονή στην κατασκευαστική περίοδο πυρηνικών εργοστασίων λόγω ζητημάτων αδειοδότησης και αποδοχής από το κοινό. Προσθέτοντας το υψηλό επενδυτικό κόστος, αυτό έχει ως αποτέλεσμα το τελικό κόστος να είναι υψηλότερο από τις αρχικές εκτιμήσεις. Πάντα υπάρχουν αβεβαιότητες πάνω από το πραγματικό κόστος της πυρηνικής ενέργειας και του επενδυτικού κινδύνου.

Το 2004 μελέτη που διεξήχθη από τον τομέα ενέργειας των ΗΠΑ, του Πανεπιστημίου του Σικάγο πρότεινε μια μελέτη κόστους ηλεκτροπαραγωγής από μια καινοτόμο κατασκευή πυρηνικού σταθμού όπου τα οικονομικά μεγάλη κυμαίνονται από 47–71 \$/MWh. Σε αυτά τα οικονομικά στοιχεία περιλαμβάνεται κόστος 35% για την καινοτομία, ένα στοιχειώδες 3% ασφάλιστρο κινδύνου χρηματοδότησης και οι φόροι που ισχύουν στις Ηνωμένες Πολιτείες. Μετά την αρχική κατασκευή των πρώτων σταθμών και την τεχνογνωσία (3-10% ποσοστό εκμάθησης) το κόστος αναμένεται να μειωθεί σε 31 – 46\$ / MWh ακόμα και χωρίς πολιτικά κίνητρα.

Η μελέτη συνοψίζεται σε ένα (overnight capital cost) κόστος κεφαλαίου 1200\$/ kWh για ώριμα σχέδια, 1500\$ / kWh για νέα σχέδια και 1800\$ / kWh για προηγμένα σχέδια που φέρουν το πρώτο του είδους επιπλέον κόστος. Οι υπόλοιπες υποθέσεις της μελέτης λαμβάνουν υπόψη:

- Διάρκεια ζωής έργου: 40 – 60 έτη
- Διάρκεια κατασκευής: 5 – 7 έτη
- Παράγοντας ικανότητας: 85%
- 50% επένδυση από δανειοδότηση και 50% από ίδια κεφάλαια με ποσοστό απόδοσης 10 και 15%
- Κόστος καυσίμου: 4.3\$ / MWh
- Φόρος αποβλήτου: 1\$ / MWh

Συμπερασματικά η ηλεκτροπαραγωγή από καινοτόμο πυρηνική ενέργεια είναι λιγότερο οικονομική σε σχέση με τις μελέτες των ορυκτών καυσίμων (33 - 45\$ / MWh). Ωστόσο η γνώση της τεχνολογίας θα μειώσει το χάσμα μεταξύ του κόστους των δύο μεθόδων. Επιπροσθέτως, η αποφυγή ρύπων CO₂ από την πυρηνική ενέργεια μετατρέπει το πυρηνικό εργοστάσιο σε πιο ανταγωνιστικό οικονομικά.

Άλλη έρευνα του 2005 κατατάσσει το κόστος της πυρηνικής ηλεκτροπαραγωγής μεταξύ 30-50 \$/MWh με 10% ρυθμό μείωσης και καθόλου φόρο. Στην πυρηνική βιομηχανία συνήθως χρησιμοποιείται ο όρος κόστος κεφαλαίου σε μια νύχτα (Overnight Capital Cost - OCC). Το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται όταν διερευνάται το κόστος κατασκευής ενός σταθμού σε μονάδες μέτρησης \$/kW. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού του κόστους είναι ένα πυρηνικό εργοστάσιο 1000MW σε κατασκευή εν μία νυκτί με κόστος 5000\$/kW θα είχε OCC = 5δισ \$. Η επένδυση OCC κυμαίνεται από 1000 – 2000\$ /kW και ο χρόνος κατασκευής στα 5 – 7 χρόνια. Η μελέτη εκτιμά ότι το κόστος της ηλεκτροπαραγωγής από άνθρακα κυμαίνεται στα 35 – 60\$ / MWh (επένδυση 1000 – 1500\$ / kW, 4 χρόνια κατασκευή) και αντίστοιχα ότι το κόστος της ηλεκτροπαραγωγής από φυσικό αέριο είναι στα 40 – 63\$ / MWh (κόστος αερίου 4.5/GJ, κόστος επένδυσης 400 – 800\$/kW, 2-3 χρόνια κατασκευή).

Η μελέτη IEA World Energy Outlook 2006 συγκρίνει (2015) το κόστος της ηλεκτροπαραγωγής από πυρηνική ενέργεια, κάρβουνο, αέριο και ενέργεια

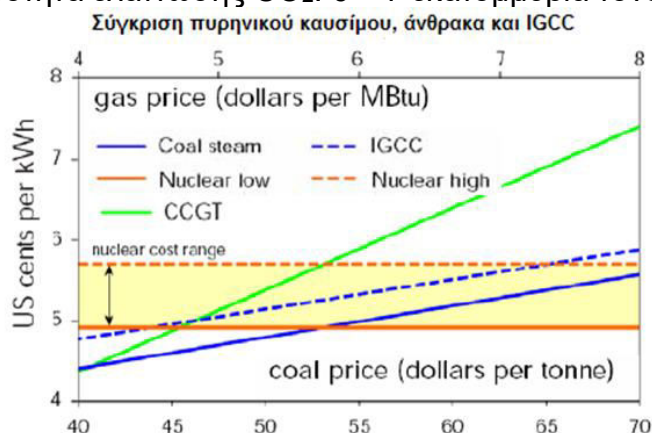
ανέμου και εκτιμά ότι το κόστος της πυρηνικής επένδυσης είναι 2000\$/kW και 2500 \$/kW με δύο ρυθμούς έκπτωσης:

- Χαμηλός (ποσοστό επιστροφής χρέους/ιδίων κεφαλαίων 12.8%, ανάκτηση κεφαλαίων μέσα σε 40 χρόνια)
- Υψηλός (ποσοστό επιστροφής χρέους/ιδίων κεφαλαίων 10-15%, ανάκτηση κεφαλαίων μέσα σε 25 χρόνια)

Χρησιμοποιώντας το χαμηλό ρυθμό μείωσης και το κόστος επένδυσης, η πυρηνική επιλογή είναι η πιο οικονομική λύση με 49\$/MWh. Με την επιλογή του υψηλού ρυθμού μείωσης το πυρηνικό κόστος γίνεται 57 \$/MWh το οποίο και πάλι είναι πιο οικονομικό από τη μονάδα του αερίου αλλά πιο ακριβό από το κάρβουνο. Αύξηση της τάξεως του 50% στην τιμή του ουράνιου, αερίου και κάρβουνου οδηγούν σε αύξηση της τιμής του πυρηνικού ηλεκτρισμού κατά 3%, κατά 20% λόγω άνθρακα και κατά 38% του ηλεκτρισμού που παράγεται από αέριο. Συνεπώς η πυρηνική ενέργεια είναι κατά πολύ πιο οικονομική επιλογή ακόμα και με υψηλό κόστος κεφαλαίου 2500 \$/kW. Με τον υψηλό ρυθμό μείωσης η πυρηνική ενέργεια έχει κόστος υψηλότερο (68 – 81 \$/MWh) από τις άλλες επιλογές αλλά αποφεύγεται η εκπομπή ρύπων CO₂ οπότε γίνεται πιο ανταγωνιστική επιλογή. Ο κύκλος καυσίμου περιλαμβάνει βασικό ουράνιο 25%, μετατροπή σε οξειδία 5%, εμπλουτισμός 30%, κατασκευή καυσίμου 15% και έως 25% επεξεργασία αποβλήτων (απευθείας ταφή, μετα-επεξεργασία ή ανακύκλωση). Σε μερικές χώρες το κόστος της απευθείας ανάθεσης αποβλήτων υπολογίζεται σε 1 \$/MWh. Τα κόστη παροπλισμού ποικίλουν από 200 έως 500\$/kW (1-2 \$/MWh). Στα πυρηνικά εργοστάσια όλες οι εξωτερικές δαπάνες εσωτερικεύεται και συλλέγονται εκ των προτέρων.

Τα αποτελέσματα μελέτης για 3^{ης} γενιάς αντιδραστήρα LWR (AREWA) με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά (Πίνακες 4, 5):

- Απόδοση 36%
- Διάρκεια ζωής 60 έτη
- Συντελεστής ικανότητας 90%
- Χρόνος κατασκευής 5-7 έτη
- Πυρηνικά απόβλητα:
 - LLW/ILW – 200-350m³/GWέτος
 - HLW 10 – 20 m³/ GWέτος
 - 3 m³/ GWέτος ύστερα από ανακύκλωση
- Δυνατότητα ελάττωσης CO₂: 6 – 7 εκατομμύρια τόνους/ GWέτος



Εικόνα 54: Σύγκριση πυρηνικού καυσίμου, άνθρακα και IGCC (Πηγή: IEA WEO 2006)

3.2 Οικονομική ανάλυση εγκατάστασης πυρηνικού εργοστασίου

Στην Ελλάδα του μνημονίου και της υπερβολική φορολόγησης η ηλεκτρική ενέργεια έχει σημειώσει αύξηση πάνω από 70% σε επτά χρόνια (2008 – 2014) σύμφωνα με έρευνα της Eurostat.

Σύμφωνα με τα στοιχεία της ευρωπαϊκής στατιστικής αρχής η ηλεκτρική ενέργεια στην Ελλάδα αυξήθηκε κατά 5,2 % στο δεύτερο εξάμηνο του 2014 σε σχέση με το αντίστοιχο 6μηνο του 2013.

Μια μέση οικογένεια στην Ελλάδα πληρώνει σύμφωνα με τα τελευταία στοιχεία του 2014 πλέον 0,1790 ευρώ για κάθε κιλοβατώρα ηλεκτρικής ενέργειας (Εικόνα 55). Με μια υπόθεση ότι καταναλώνει 5000 κιλοβατώρας σε ένα έτος τότε το συνολικό κόστος υπολογίζεται περίπου σε 895 ευρώ το χρόνο. Κατά τη διάρκεια της οικονομικής κρίσης λόγω της υπερφορολόγησης, των πρόσθετων τελών και της γενικότερης αύξησης αγαθών και ΦΠΑ οι ανεξόφλητοι λογαριασμοί φθάνουν το ποσό του 1.7 δισ. ευρώ.

Ο υπουργός Παραγωγικής Ανασυγκρότησης (Παναγιώτης Λαφαζάνης) είχε θέσει ως στόχο τη μείωση των τιμών του ρεύματος και επιδιώκει να θέσει σε λειτουργία την παλαιότερη μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας στη ΔΕΗ Πτολεμαΐδας η οποία καταστράφηκε από φωτιά. Έχει υποβληθεί αίτημα στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή να δοθεί παράταση ζωής στη λειτουργία του ατμοηλεκτρικού σταθμού γιατί έχει κατασκευαστεί το 1959 και είχε συμφωνηθεί να απενεργοποιηθεί το 2016.



Εικόνα 55: Αύξηση τιμών ρεύματος στην Ελλάδα (Πηγή: Eurostat – [40])

3.3 Ισχύς και διάρκεια ζωής

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί μια συνοπτική συγκριτική οικονομική ανάλυση της πυρηνικής ενέργειας σε σχέση με ένα λιγνιτικό σταθμό και ένα σταθμό φυσικού αερίου. Η ισχύς ενός πυρηνικού σταθμού υπολογίζεται σε 1GW ετησίως με διάρκεια λειτουργίας 40 χρόνια. Αντίστοιχα ο λιγνιτικός σταθμός παράγει 750 MW ετησίως με 20 έτη λειτουργίας και ο σταθμός φυσικού αερίου παράγει 400 MW ετησίως και πάλι με 20 έτη λειτουργίας.

**ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ**

Υπολογίζοντας ότι ο πυρηνικός σταθμός λειτουργεί όλο το 24ωρο και αν αναλογιστεί κανείς ότι ο ένας χρόνος αποτελείται από 8760 ώρες τότε αν αφαιρεθούν οι 760 ώρες για λειτουργικές ανάγκες και συντήρηση τότε ο καθαρός χρόνος λειτουργίας ενός πυρηνικού εργοστασίου είναι 8000 ώρες/έτος.

- Η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ενός πυρηνικού σταθμού είναι:

$$1\text{GW} \times 8.000\text{h} = 8.000 \text{ GWh} = 8.000.000 \text{ MWh}$$

- Η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ενός λιγνιτικού σταθμού είναι:

$$750\text{W} \times 8.000\text{h} = \text{GWh} = 6.000.000 \text{ MWh}$$

- Η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ενός σταθμού φυσικού αερίου είναι:

$$400\text{W} \times 8.000\text{h} = \text{GWh} = 3.200.000 \text{ MWh}$$

Σύμφωνα με τα τελευταία στοιχεία της Eurostat η τιμή πώλησης της κιλοβατώρας στην Ελλάδα το 2014 ήταν 0,179 €/kWh (179 €/MWh). Συνεπώς από την πώληση της ενέργειας που προέρχεται από πυρηνικό εργοστάσιο τα έσοδα είναι:

$$8.000.000\text{MWh} \times 179 \text{ €/MWh} = \mathbf{1.432.000.000 \text{ €}}$$

Με τον ίδιο τρόπο τα έσοδα από σταθμό παραγωγής με λιγνίτη υπολογίζονται σε 1.074.000.000 € και από σταθμό φυσικού αερίου σε 572.800.000€. Παρατηρείται ότι η εγκατάσταση πυρηνικού σταθμού στην Ελλάδα με τις υπάρχουσες συνθήκες εξασφαλίζει μεγαλύτερο ποσό εσόδων. Ύστερα από έρευνα στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα οικονομικής ανάλυσης για τα έξοδα του κάθε σταθμού (Πίνακας 4 και Πίνακας 5) (Πηγή: Οικονομοτεχνική μελέτη εγκατάστασης πυρηνικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον ελληνικό χώρο, 2014).

Στους παρακάτω υπολογισμούς έχει χρησιμοποιηθεί η ανανεωμένη τιμή της κιλοβατώρας η οποία είναι 0.179 €/kWh.

Πίνακας 4: Έξοδα σταθμών σε €/MWh

	Πυρηνικός σταθμός	Σταθμός λιγνίτη	Σταθμός φυσικού αερίου
Αρχική επένδυση	312 €/MWh	175 €/MWh	37 €/MWh
Ετήσιο κόστος καυσίμου	2,95 €/MWh	10,7 €/MWh	24,5 €/MWh
Λειτουργικό κόστος	10,11 €/MWh	10,00 €/MWh	5,00 €/MWh
Κόστος αποδόμησης	1,20 €/MWh	0,725 €/MWh	0,15 €/MWh

Πίνακας 5: Έξοδα σταθμών σε €

	Πυρηνικός σταθμός	Σταθμός λιγνίτη	Σταθμός φυσικού αερίου
Αρχική επένδυση	2.496 δις €	1,4 δις €	296 εκατ. €
Ετήσιο κόστος καυσίμου	23,6 εκατ. €	85,6 εκατ. €	196 εκατ. €
Λειτουργικό κόστος	80,8 εκατ. €	80 εκατ. €	50 εκατ. €
Κόστος αποδόμησης	9,6 εκατ. €	5,8 εκατ. €	1,2 εκατ. €

Σε τέτοιου είδους μελέτες η οικονομική αξιολόγηση του έργου πρέπει να γίνεται στο ίδιο χρονικό διάστημα (χρονικός ορίζοντας) του έργου. Στην έρευνα τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται και για τη δική μας περίπτωση ο χρονικός ορίζοντας είναι 20 χρόνια. Για τον υπολογισμό οικονομικών στοιχείων χρησιμοποιείται το κριτήριο της καθαρής παρούσας αξίας. Το κριτήριο αυτό λαμβάνει υπόψιν τον χρονικό ορίζοντα, το επιτόκιο και δίνει τα εξής αποτελέσματα:

❖ Πυρηνικός σταθμός

- Όπου r = επιτόκιο = 6% και N = χρονικός ορίζοντας = 20 έτη

$$ΠΑ_{\text{εσόδων}} = E \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N} = 1.432.000.000 \frac{(1+0.06)^{20} - 1}{0.06(1+0.06)^{20}} = 16.424.927.185 \text{ €}$$

Με τον ίδιο τύπο υπολογίζεται η παρούσα αξία για την αρχική επένδυση η οποία είναι:

$$ΠΑ_{\text{αρχ. επενδ.}} = 2.496.000.000 \text{ €} \quad (\text{δεν αλλάζει με το χρόνο})$$

$$ΠΑ_{\text{κόστος καυσίμου + λειτουργικό κόστος}} = K2 \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N} = 1.198.354.433 \text{ €}$$

$$ΠΑ_{\text{αποδόμ.}} = K_{\text{αποδόμησης}} \left(\frac{1}{1+r}\right)^N = 9.600.000 \left(\frac{1}{1+0.06}\right)^{20} = 2.993.325 \text{ €}$$

Η συνολική παρούσα αξία των εξόδων είναι:

$$ΠΑ_{\text{εξόδων}} = 3.697.347.758 \text{ €}$$

Το καθαρό κέρδος ανά μεγαβατώρα MWh είναι:

$$\frac{\text{Έσοδα} - \text{Έξοδα}}{\text{Σύνολο MWh}} = \frac{16.424.927.185 - 3.697.347.758}{8.000.000} = 1590 \text{ €/MWh}$$

❖ Σταθμός Λιγνίτη

$$ΠΑ_{\text{εσόδων}} = E \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N} = 1.074.000.000 \frac{(1+0.06)^{20} - 1}{0.06(1+0.06)^{20}} = 12.318.695.389 \text{ €}$$

ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Με τον ίδιο τύπο υπολογίζεται η παρούσα αξία για την αρχική επένδυση η οποία είναι:

$$ΠΑ_{\text{αρχ. επενδ.}} = 1.400.000.000 \text{ €} \quad (\text{δεν αλλάζει με το χρόνο})$$

$$ΠΑ_{\text{κόστος καυσίμου + λειτουργικό κόστος}} = 1.899.418.953,79 \text{ €}$$

$$ΠΑ_{\text{αποδόμ}} = K_{\text{αποδόμησης}} \left(\frac{1}{1+r}\right)^N = 5.800.000 \left(\frac{1}{1+0.06}\right)^{20} = 1.808.467 \text{ €}$$

Η συνολική παρούσα αξία των εξόδων είναι:

$$ΠΑ_{\text{εξόδων}} = 3.283.394.134 \text{ €}$$

Το καθαρό κέρδος ανά μεγαβατώρα είναι:

$$\frac{\text{Έσοδα} - \text{Εξόδα}}{\text{Σύνολο MWh}} = \frac{12.318.695.389 - 3.283.394.134}{6.000.000} = 1502.91 \text{ €/MWh}$$

❖ Σταθμός Φυσικού Αερίου

$$ΠΑ_{\text{εξόδων}} = E \frac{(1+r)^N - 1}{r(1+r)^N} = 572.800.000 \frac{(1+0.06)^{20} - 1}{0.06(1+0.06)^{20}} = 6.569.970.874 \text{ €}$$

Με τον ίδιο τύπο υπολογίζεται η παρούσα αξία για την αρχική επένδυση η οποία είναι:

$$ΠΑ_{\text{αρχ. επενδ.}} = 296.000.000 \text{ €} \quad (\text{δεν αλλάζει με το χρόνο})$$

$$ΠΑ_{\text{κόστος καυσίμου + λειτουργικό κόστος}} = 2.821.546.261,6 \text{ €}$$

$$ΠΑ_{\text{αποδόμ}} = K_{\text{αποδόμησης}} \left(\frac{1}{1+r}\right)^N = 1.200.000 \left(\frac{1}{1+0.06}\right)^{20} = 374.165,67 \text{ €}$$

Η συνολική παρούσα αξία των εξόδων είναι:

$$ΠΑ_{\text{εξόδων}} = 3.117.974.785,44 \text{ €}$$

Το καθαρό κέρδος ανά μεγαβατώρα είναι:

$$\frac{\text{Έσοδα} - \text{Εξόδα}}{\text{Σύνολο MWh}} = \frac{6.569.970.874 - 3.117.919.816}{3.200.000} = 1.078,75 \text{ €/MWh}$$

Συμπέρασμα:

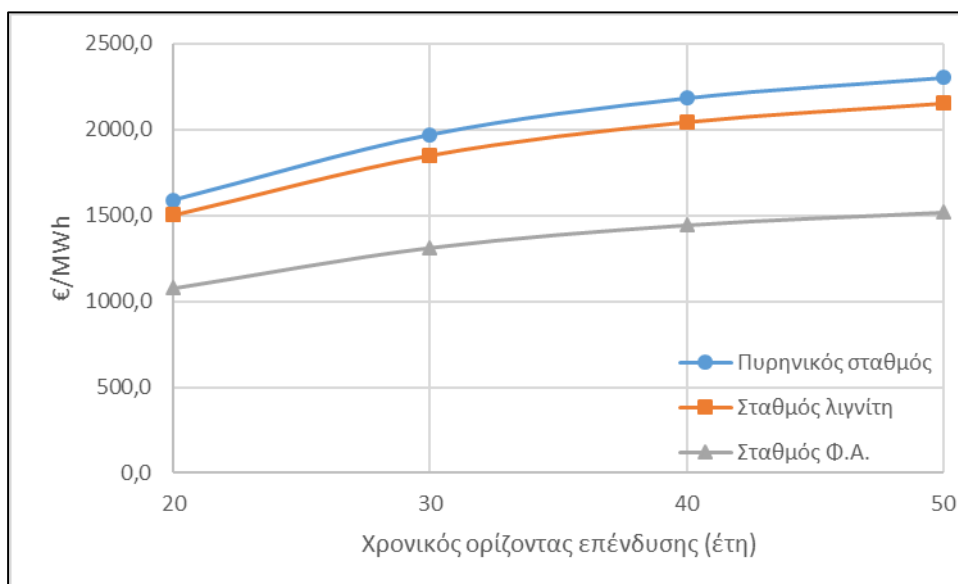
Ξεκάθαρα σε χρονικό ορίζοντα είκοσι ετών ο πυρηνικός σταθμός είναι πιο συμφέρουσα επένδυση καθώς:

$$ΠΑ_{\text{πυρην}} = 1591 \text{ €/MWh} > ΠΑ_{\text{λιγν}} = 1503 \text{ €/MWh} > ΠΑ_{\text{φθ}} = 1078 \text{ €/MWh}$$

Πραγματοποιήθηκαν οι ίδιοι υπολογισμοί για χρονικό ορίζοντα Ν είκοσι, τριάντα, σαράντα και πενήντα χρόνια. Τα τελικά αποτελέσματα για την τιμή της παρούσας αξίας ως συνάρτηση του χρονικού ορίζοντα για τις τρεις περιπτώσεις προς διερεύνηση παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. Επίσης, παρατίθεται και συγκεντρωτικό διάγραμμα που και σε αυτή την περίπτωση αποδεικνύει ότι η επιλογή του πυρηνικού σταθμού είναι πιο συμφέρουσα επιλογή σε οποιοδήποτε βάθος χρόνου. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί παρουσιάζονται στο Παράρτημα της εργασίας.

Πίνακας 6: Οικονομική μελέτη κέρδους/MWh σε διαφορετικούς χρονικούς ορίζοντες

N (έτη)	€/MWh		
	Πυρηνικός σταθμός	Σταθμός λιγνίτη	Σταθμός Φ.Α.
20	1591,1	1502,9	1078,7
30	1972,1	1850,5	1313,2
40	2184,8	2044,6	1444,1
50	2303,6	2153,0	1517,2



Εικόνα 56: Συγκεντρωτικό διάγραμμα κέρδους/MWh ως συνάρτηση του χρονικού ορίζοντα της επένδυσης

3.4 Παγκόσμια οικονομικά στοιχεία

Το μέσο κόστος κατασκευής πυρηνικών σταθμών δίνεται με εύρος από 1000–2.500 \$/kW από την Παγκόσμια Ένωση Πυρηνικών. Ως μέσο σύγκρισης οι σταθμοί που χρησιμοποιούν λιγνίτη και κατασκεύασε η ΔΕΗ κόστισαν 2.800 \$/kW. Αυτό το κόστος αποτελεί το κόστος εν μία νυκτί (overnight cost). Το κόστος αυτό αντικατοπτρίζει το κόστος αν ο σταθμός κατασκευαζόταν σε μία μέρα. Αυτό το κόστος έχει νόημα μόνο στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών καθώς αυτά τα συστήματα εγκαθίστανται σε λίγες μόνο ώρες. Ως “overnight cost” νοείται λοιπόν το κόστος κτήσης και εγκατάστασης του βασικού εξοπλισμού, και κάποιες φορές (αλλά όχι πάντα)

και το κόστος κτήσης και διαμόρφωσης της γης και των κτιριακών υποδομών, ενώ δεν περιλαμβάνει τις προσαυξήσεις λόγω πληθωρισμού και λόγω καθυστερήσεων, καθώς και το κόστος της μακροχρόνιας χρηματοδότησης του έργου. Συνήθως, το “overnight cost” δεν περιλαμβάνει επίσης το κόστος των απαραίτητων δικτύων, κόστος που στην περίπτωση των πυρηνικών μπορεί να ανέλθει σε αρκετά δις ευρώ ανά σταθμό. Χαρακτηριστική είναι και η περίπτωση της Βουλγαρίας και συγκεκριμένα του νέου πυρηνικού σταθμού στο Μπέλενεπου άρχισε να κατασκευάζεται το 1987 και ακόμη είναι στο αρχικό στάδιο. Ο Βούλγαρος υπουργός Οικονομίας και Ενέργειας επιμένει πως το κόστος του έργου ανέρχεται σε 4 δις € (2.100 €/kW ή αλλιώς 2.940 \$/kW), η ρωσική κατασκευάστρια εταιρία το ανεβάζει σε 6,3 δις € και Βουλγαρικό Ινστιτούτο Οικονομίας της Αγοράς σε 11,5 δις €.

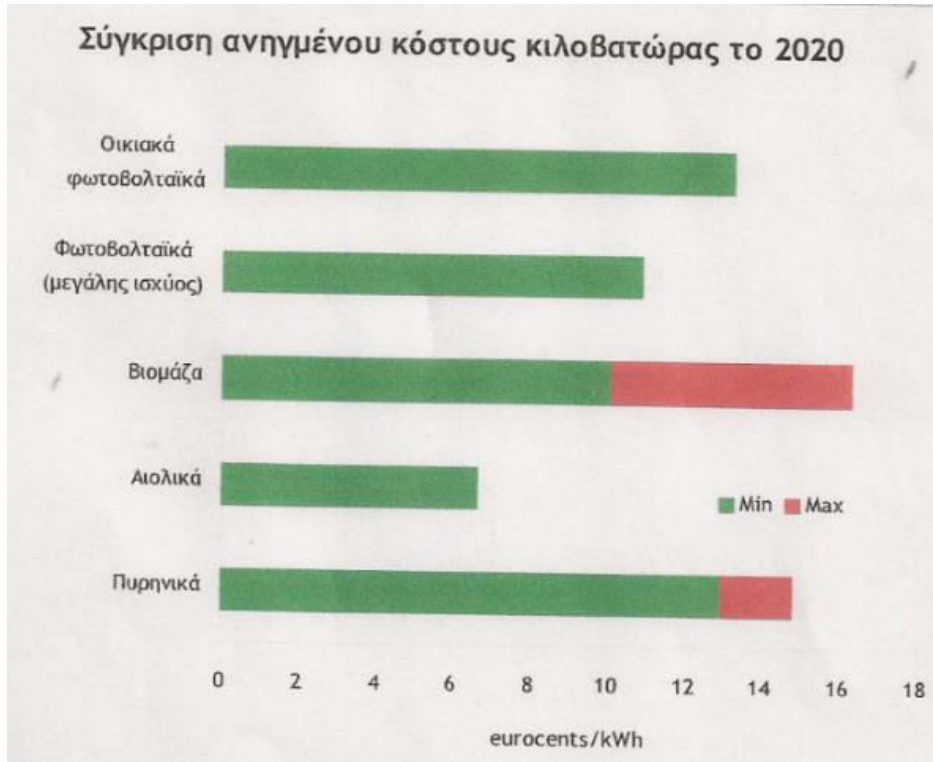
Το κόστος των πυρηνικών σταθμών ανεβαίνει ακόμα και στις 7000 \$/kW από συμβουλευτικούς οίκους όπως η Moody’s Investor Service. Με προσαυξήσεις του κόστους λόγω καθυστερήσεων το κόστος της επένδυσης μπορεί να εκτιναχθεί στις 10.550 \$/kW. Στοιχεία της βρετανικής πυρηνικής βιομηχανίας δείχνουν ότι το κόστος διαχείρισης των πυρηνικών αποβλήτων κυμαίνεται στις 2.000 £/m³ (χαμηλής ραδιενέργειας απόβλητα) και από 67.000 έως 201.000 £/m³ όταν πρόκειται για υψηλής ραδιενέργειας απόβλητα.

Η Moody’s Global Project Finance εκτιμά το κόστος διαχείρισης των αποβλήτων σε περίπου 300 \$/kW. Σε ό,τι αφορά στο κόστος αποσυναρμολόγησης του αντιδραστήρα μετά το πέρας του ωφέλιμου χρόνου ζωής του, η Moody’s Global Project Finance εκτιμά το κόστος αυτό σε περίπου 700 \$/kW Έκθεση της Διεθνούς Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (2004) ανέλυε το κόστος αυτό σε 250-500 \$/kW, παρόλο που οι πιο πρόσφατες αναλύσεις για τους βρετανικούς αντιδραστήρες Magnox κάνουν λόγο για 1.800 \$/kW.

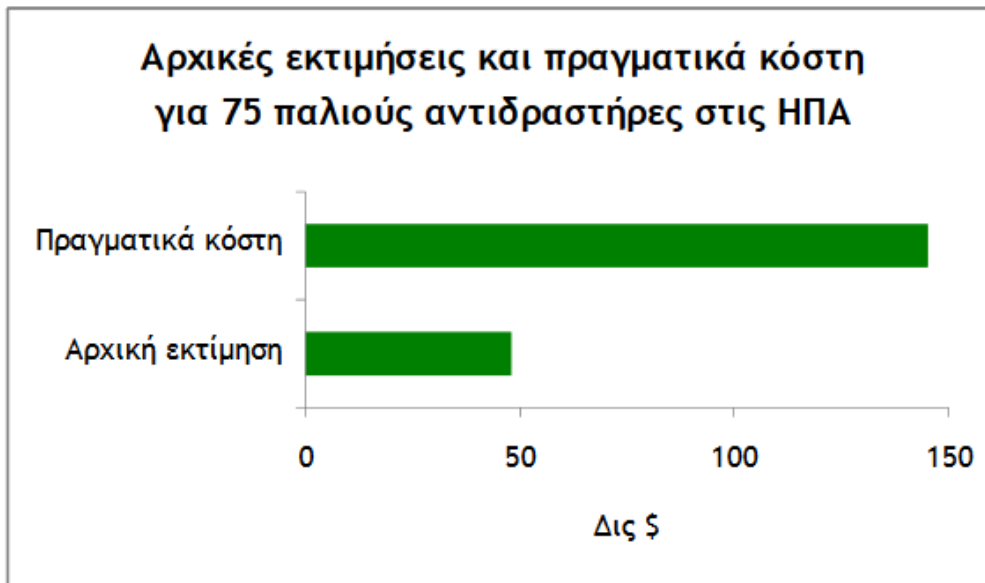
Ένα επιπλέον κόστος είναι η ασφάλιση σε περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος όπου η αμερικανική νομοθεσία αναφέρει ότι η πυρηνική μονάδα που ευθύνεται θα πρέπει να καταβάλει 96 εκατ. \$ ανά αντιδραστήρα σε ένα κοινό ταμείο αντιμετώπισης της κρίσης. Σύμφωνα με εκτιμήσεις του Sandia National Laboratory ένα μείζον πυρηνικό ατύχημα θα μπορούσε να κοστίσει έως και 700 δις \$. Με δεδομένο ότι υπάρχει οροφή 10,2 δις \$ στην ασφαλιστική κάλυψη, το υπόλοιπο κόστος καλείται να το πληρώσει η κοινωνία.

Κάποια άλλα λειτουργικά κόστη είναι τα κόστη καυσίμου και τα κόστη συντήρησης. Για να παραχθεί μία ηλεκτρική κιλοβατώρα απαιτούνται κατά μέσο όρο 0,0255 γραμμάρια ουρανίου. Δεδομένου ότι σήμερα η τιμή του ουρανίου στη διεθνή αγορά είναι περί τα 60\$/lb (156 \$/Kg), το κόστος καυσίμου για ένα πυρηνικό σταθμό ανέρχεται σε 0,4 US cents/kWh.

Τα κόστη που υπόσχεται η πυρηνική βιομηχανία (2,9-13,6 US cents/kWh) προκύπτουν μόνο αν υποθέσει κανείς εξωπραγματικά χαμηλό κόστος επένδυσης, δεν υπολογίσει το κόστος όλων των αναγκαίων υποδομών για τη λειτουργία του εργοστασίου, το κόστος των δικτύων, το κόστος του χρήματος, το κόστος διαχείρισης των αποβλήτων, το κόστος αποσυναρμολόγησης του σταθμού και θεωρήσει χαμηλές τιμές καυσίμου σαν αυτές που ίσχυαν μια δεκαετία πριν, αλλά έχουν πλέον αυξηθεί. Στην Εικόνα 57 παρουσιάζεται η σύγκριση του ανοιγμένου κόστους κιλοβατώρας το 2020.

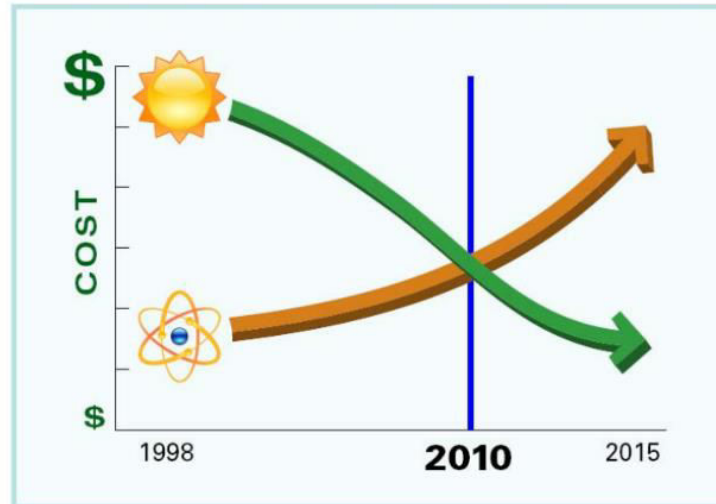


Εικόνα 57: Σύγκριση ανηγμένου κόστους κιλοβατώρας το 2020.(Πηγή:[41])



Εικόνα 58: Αρχικές εκτιμήσεις και πραγματικά κόστη 75 παλιών αντιδραστήρων στις ΗΠΑ (Πηγή: [42])

Το 2010 μια μελέτη στις ΗΠΑ αποκάλυψε ότι το κόστος ενός μεγάλου φωτοβολταϊκού πάρκου είναι συγκρίσιμο με το κόστος των πυρηνικών σταθμών όπως φαίνεται στην Εικόνα 59.



Εικόνα 59: Ανατροπή τιμής kWh από φωτοβολταϊκά και πυρηνική ενέργεια (Πηγή:[43])

Συνοπτικά στο κεφάλαιο αυτό αρχικά παρουσιάστηκε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με την κατασκευή και την οικονομική αξιολόγηση κατασκευής πυρηνικού αντιδραστήρα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαφορά του κόστους (ευρώ/kWh) μεταξύ του άνθρακα, του αερίου και της πυρηνικής ενέργειας. Επίσης, επεξηγείται η σπουδαιότητα της ορολογίας overnight cost σε τέτοιες επενδυτικές κινήσεις και προκύπτει συμπέρασμα ότι η πυρηνική ενέργεια σαν επενδυτικό πλάνο είναι πιο συμφέρουσα έναντι των ορυκτών πηγών. Ακολούθως, χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία από άλλη βιβλιογραφική πηγή σχετικά με την οικονομική μελέτη για εγκατάσταση πυρηνικού σταθμού στην Ελλάδα. Στους υπολογισμούς της παρούσας μελέτης βέβαια χρησιμοποιήθηκε η πιο πρόσφατη τιμή της κιλοβατώρας στην Ελλάδα (0.1790 €/kW). Χρησιμοποιείται το κριτήριο της παρούσας αξίας και προκύπτει ότι σε χρονικό ορίζοντα είκοσι ετών η κατασκευή πυρηνικού εργοστασίου είναι πιο συμφέρουσα επένδυση από ότι ο σταθμός λιγνίτη ή φυσικού αερίου. Τέλος, παρουσιάζονται παγκόσμια οικονομικά στοιχεία από οίκους αξιολόγησης επενδύσεων.

4 ΕΘΝΙΚΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

4.1 Ελληνική προοπτική – Χωροθέτηση αντιδραστήρων

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο το βασικό καύσιμο των πυρηνικών αντιδραστήρων είναι το ουράνιο. Στην Ελλάδα και συγκεκριμένα στη Βόρεια Ελλάδα υπάρχουν επιβεβαιωμένα αποθέματα 1.525 τόνων. Επίσης το υπέδαφος της Ελλάδας και του Αιγαίου περιέχουν μεγάλα αποθέματα ουρανίου στα οποία υπάρχει θόριο, στοιχείο που χρησιμοποιούν οι αντιδραστήρες τελευταίας γενιάς. Το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) έχει πραγματοποιήσει μελέτες σύμφωνα με τις οποίες τα αποθέματα επαρκούν για 20 έτη λειτουργίας για αυτόνομο αντιδραστήρα ισχύος 1000 MW ημερησίως. Στην περιοχή της Δράμας (Αρχοντοβούνι) υπάρχει το κοιτάσμα καλύτερης ποιότητας το οποίο είναι το κίτρινο συμπύκνωμα ουρανίου. Ο Καναδάς και η Αυστραλία προμηθεύουν πάνω από το 50% της παγκόσμιας παραγωγής.

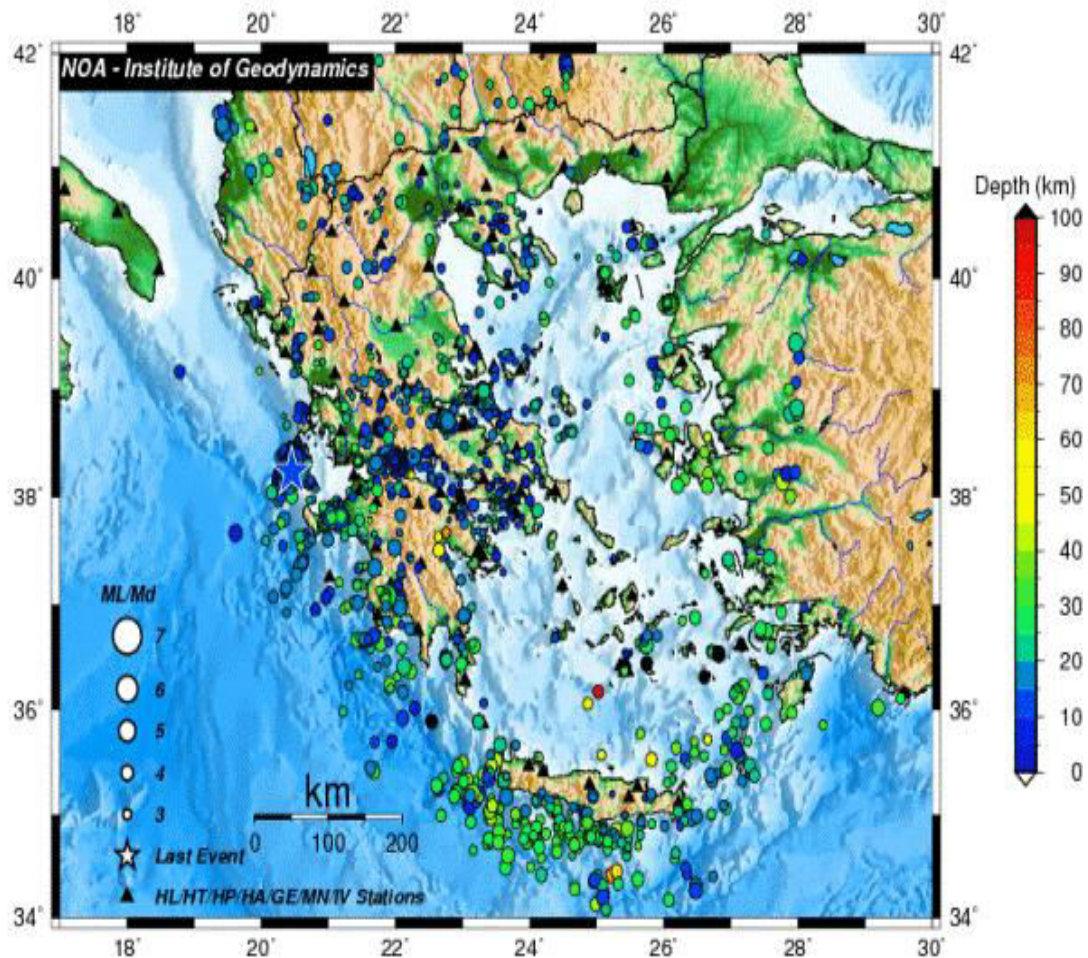
Για να επιλεγθούν κάποιες περιοχές ως υποψήφιες για την εγκατάσταση πυρηνικού αντιδραστήρα πρέπει να καλύπτουν κάποια κριτήρια και οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι:

- Τα χαρακτηριστικά του αντιδραστήρα που πρόκειται να κατασκευαστεί και η προτεινόμενη λειτουργία.
- Η πυκνότητα του πληθυσμού
- Η χρήση της γης των περιχώρων
- Η ζώνη αποκλεισμού – πρόκειται για την περιοχή γύρω από τον αντιδραστήρα όπου η διαχειριστής του αντιδραστήρα έχει δικαίωμα να καθορίζει πλήρως όλες τις δραστηριότητες εντός αυτού του ορίου.
- Η απόσταση από το αστικό κέντρο – όπου πρόκειται για την απόσταση στο πιο κοντινό σημείο από μια πυκνοκατοικημένη περιοχή (25.000 κάτοικοι)
- Η ζώνη χαμηλού πληθυσμού – πρόκειται για την περιοχή που περιβάλλει την ζώνη αποκλεισμού και ο πληθυσμός έχει χαμηλή πυκνότητα ώστε να υπάρχει πιθανότητα να ληφθούν επιτυχή προστατευτικά μέτρα αν συμβεί ατύχημα.
- Τα φυσικά – γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής όπως η σεισμικότητα, η γεωλογία και τα υδρολογικά χαρακτηριστικά. Αναλυτικότερα αυτά τα χαρακτηριστικά αναλύονται εκτενέστερα λόγω:
 - Δονήσεων εδάφους
 - Τεκτονικής παραμόρφωσης της επιφάνειας
 - Μη τεκτονικής παραμόρφωσης
 - Ποσοστών υποτροπής από σεισμούς
 - Υλικά θεμελίων περιοχής

- Σεισμικά κύματα, πλημμύρες ή τσουνάμι



Εικόνα 60: τεκτονικές πλάκες στα όρια του Ελλαδικού χώρου (Πηγή:[44])



Εικόνα 61: Χάρτης σεισμικής δραστηριότητας Ελλάδας (Πηγή:[45])

4.2 Εγκατάσταση πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος στην Ελλάδα

Όλες οι Ευρωπαϊκές χώρες αναζητούν τρόπους ασφαλούς κάλυψης των αναγκών τους σε ηλεκτρική κατά κύριο λόγο ενέργεια. Οι στόχοι αυτοί για να κριθούν επιτυχημένοι πρέπει να συνδυάζονται με ανταγωνιστικές τιμές και αποδεκτές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Είναι απαραίτητη η διερεύνηση όλων των πρωτογενών πηγών ηλεκτροπαραγωγής και η συγκριτική μελέτη των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων που παρουσιάζει η κάθε μια.

Υπολογίζεται ότι κατά το 2020 στην Ελλάδα θα παρουσιαστεί ενεργειακό έλλειμα καθώς αυτή τη στιγμή οι ενεργειακές ανάγκες καλύπτονται οριακά και είναι συνεχώς αυξανόμενες. Ακόμα και αν όλες οι ενεργειακές πηγές (λιγνίτης, φυσικό αέριο, πετρέλαιο και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας) αξιοποιηθούν πλήρως είναι δύσκολο να ικανοποιηθούν όλες οι ανάγκες. Οι ανανεώσιμες πηγές μάλιστα έχουν αρχίσει να λειτουργούν παραπάνω από τα αρχικά όρια χρησιμοποίησής τους λόγω της ανελαστικότητας λειτουργίας των ωρών των θερμοηλεκτρικών μονάδων.

Η αναζήτηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας κρίνεται απαραίτητη. Οι βασικές εναλλακτικές μορφές είναι:

- Η εισαγωγή ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας
 - Απαιτείται εξάρτηση και ανταγωνιστικότητα από τις γειτονικές χώρες.
- Ο εισαγόμενος λιθάνθρακας
 - Είναι η πιο μεσοπρόθεσμη αλλά ρυπογόνος λύση.
- Η πυρηνική ενέργεια
 - Αυτή η λύση ακόμα και να γίνει αποδεκτή άμεσα απαιτούνται 10-15 χρόνια μεταξύ έγκρισης της απόφασης μέχρι την υλοποίησή της.

Η επιθυμητή κατάσταση για την χώρα θα ήταν η ενεργειακή υπερεπάρκεια και όχι η οριακή ενεργειακή επάρκεια που ισχύει τώρα. Αυτό θα οδηγούσε σε τεχνολογική ανάπτυξη και εξαγωγές. Τα παραπάνω στοιχεία καθιστούν επιβεβλημένη τη σοβαρή εξέταση της πυρηνικής επιλογής και την υπεύθυνη αξιολόγηση όλων των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της εγκατάστασης ενός πυρηνικού αντιδραστήρα στον Ελλαδικό χώρο είναι:

- Η πυρηνική ενέργεια θα μπορούσε να προσφέρει συγκριτικά με τα προαναφερθέντα στοιχεία ηλεκτρική ενεργειακή επάρκεια.
- Ενεργειακή ασφάλεια λόγω δυνατότητας αποθήκευσης καυσίμου έως και 5 έτη. Οι αντιδραστήρες στην ΕΕ έχουν αποθέματα που διαρκούν από 1 έως 3 μήνες. Συνεπώς οι αντιδραστήρες λειτουργούν χωρίς ανάγκη επανατροφοδοσίας από 12 έως 18 μήνες. Αν υπάρξει πρόβλημα στον ανεφοδιασμό καυσίμου ο αντιδραστήρας μπορεί να λειτουργήσει επιπλέον για 2 ως 6 μήνες με σταδιακή μείωση ισχύος. Το μεγαλύτερο μέρος του πυρηνικού καυσίμου παράγεται στην ΕΕ (τμήματα εμπλουτισμού κυρίως και κατασκευής). Το φυσικό ουράνιο εισάγεται από Ρωσία ή Κίνα. Οι εισαγωγές ουρανίου επηρεάζονται λιγότερο από γεωπολιτικούς λόγους σε σχέση με τις εισαγωγές πετρελαίου και φυσικού αερίου.

- Δυνατότητα ευελιξίας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς μπορεί να επιδέχεται αναβαθμίσεις.
- Μείωση αερίων θερμοκηπίου καθώς θα αντικαθιστούσε το λιγνίτη και άλλα ορυκτά καύσιμα.
- Όλα αυτά θα είχαν σαν αποτέλεσμα το χαμηλότερο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας για τον Έλληνα πολίτη λόγω χαμηλότερου κόστους κιλοβατώρας.

Τα κύρια μειονεκτήματα της εγκατάστασης πυρηνικού αντιδραστήρα στην Ελλάδα είναι:

- Ανάγκη διαχείρισης των καταλοίπων. Παράγονται ραδιενεργά πυρηνικά απόβλητα που μπορεί να προκαλέσουν σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα.
- Απαιτείται υψηλό κόστος για εξειδικευμένα συστήματα ασφαλείας και αποτροπής τρομοκρατικών ενεργειών. (κίνδυνοι ασφάλειας, τρομοκρατίας, διασποράς πυρηνικών υλικών, διαχείρισης ραδιενεργών καταλοίπων, και
- Υψηλό (2.500-4.500 ευρώ ανά KW) αρχικό κόστος κατασκευής του πυρηνικού σταθμού).
- Τα πυρηνικά εργοστάσια έχουν υψηλό κόστος κατασκευής και χαμηλό κόστος λειτουργίας σε σύγκριση με τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ορυκτά καύσιμα. Το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικά καύσιμα είναι, περίπου, σταθερό διαχρονικά και ανταγωνιστικό σε σχέση με τις άλλες πρωτογενείς πηγές. Ο αρχικός υπολογισμός του κόστους κατασκευής, το δάνειο κεφαλαίων, το κόστος διαχείρισης αποβλήτων, αποσυναρμολόγησης και οριστικής διασφάλισης του χώρου η πυρηνική ενέργεια προκύπτει ως το ακριβότερο μέσο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το κόστος αυτό συνήθως καλύπτεται από φόρους.
- Η πυρηνική ενέργεια συμβάλλει στην υποβάθμιση των τοπικών κοινωνιών και στην καταπάτηση των ανθρωπίνων δικαιωμάτων σε φτωχές χώρες. Αυτό συμβαίνει συνήθως διότι η διαδικασία εξόρυξης ορυκτής πρώτης ύλης (ουράνιο) σχετίζεται με αποικιοκρατικές πρακτικές και υποβάθμιση του περιβάλλοντος σε φτωχές χώρες.
- Η πυρηνική ενέργεια δε συμβάλλει στην αντιμετώπιση κλιματικών αλλαγών. Η πυρηνική ενέργεια χρησιμοποιείται μόνο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως (το 16% της παγκόσμιας ηλεκτροπαραγωγής) και αντιστοιχεί σε λιγότερο από 6% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Οι πυρηνικοί σταθμοί δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον με ποσά CO₂ αλλά με τεράστιες ποσότητες θερμότητας που οδηγούν σε οικολογική καταστροφή των αερίων του θερμοκηπίου.
- Η πιθανότητα να συμβεί πυρηνικό ατύχημα με ολέθριες συνέπειες είναι πολύ μικρή. Ωστόσο τα παραδείγματα πυρηνικών ατυχημάτων που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο κάνουν την κοινή γνώμη να ανησυχεί και να αντιμετωπίζει με καχυποψία μια τέτοια τεράστια επένδυση.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από σχάση ουρανίου αποτελεί μια ασφαλή διαδικασία όταν γίνεται με τους τηρούμενους κανόνες και η τεχνολογία είναι ώριμη. Τα ατυχήματα που έχουν συμβεί έχουν οδηγήσει σε σημαντική πρόοδο τόσο από τεχνολογική όσο και από θεσμική πλευρά σε θέματα ασφαλείας. Το σημαντικό ποσοστό του κόστους της πυρηνικής ενέργειας οφείλεται στο σχεδιασμό και τα μέτρα ασφαλείας που πρέπει να ικανοποιούνται για να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα ατυχήματος ή στη χειρότερη περίπτωση να υπάρχει ετοιμότητα αντιμετώπισης συνεπειών ατυχήματος. Επισημαίνεται, ότι το ατύχημα στο Three Mile Island (ΗΠΑ) είχε μόνο σοβαρές οικονομικές επιπτώσεις (η διαρροή ραδιενέργειας στο περιβάλλον ήταν ελάχιστη) και ότι το ατύχημα στο Chernobyl είναι αδύνατον να συμβεί σε αντιδραστήρες δυτικού τύπου.

- Η μελέτη εγκατάστασης πυρηνικού αντιδραστήρα στην Ελλάδα πρέπει να δώσει τεράστια έμφαση στην έντονη σεισμικότητα της Ελλάδας. Το φαινόμενο αυτό δεν αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα παρόλα αυτά. Υπάρχουν δεκάδες πυρηνικών εργοστασίων σε περιοχές με έντονη σεισμικότητα (Ιαπωνία και Καλιφόρνια – ΗΠΑ) τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα. Δεν υπάρχει κανένα θέμα λειτουργίας απλά το κόστος αυξάνεται καθώς αυξάνεται η σεισμική θωράκιση.
- Το πιο σοβαρό και σημαντικό πρόβλημα αποδοχής πυρηνικής ενέργειας είναι η ασφαλής διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων. Για αυτό το θέμα παρατηρούνται τα ακόλουθα στοιχεία:
 - Οι ποσότητες των ραδιενεργών αποβλήτων αν και μικρές σε όγκο είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες.
 - Υπάρχουν πλέον εξειδικευμένοι επιστήμονες που γνωρίζουν τη συμπεριφορά των τοξικών απόβλητων και τα χαρακτηρίζουν επιστημονικά και τεχνικά καλώς κατανοητά και πρόσφορα για ασφαλή διαχείριση. Πλέον γνωρίζουν και την επίδραση στους οργανισμούς και τις συνέπειες της ακτινοβολίας. Πλέον υπάρχουν αρκετές μέθοδοι μείωσης της τοξικότητας των αποβλήτων και απομόνωσής τους από τη βιόσφαιρα. Επίσης η ραδιενέργειά τους μειώνεται με το χρόνο.
 - Η επεξεργασία των πυρηνικών κατάλοιπων έχει δύο κλάδους, την ανακύκλωση ή τον ενταφιασμό χωρίς ανακύκλωση. Αν αναπτυχθεί ειδική μονάδα ανακύκλωσης πυρηνικών αποβλήτων τότε τα οικονομικά οφέλη είναι μεγάλα και ο όγκος του επικίνδυνου απόβλητου μειώνεται σημαντικά. Ο μόνος κίνδυνος αυτής της περίπτωσης είναι το παραγόμενο ραδιενεργό πλουτώνιο να χρησιμοποιηθεί για τρομοκρατικές πράξεις. Στην περίπτωση του ενταφιασμού χωρίς ανακύκλωση πρέπει να κατασκευαστούν ειδικοί χώροι οριστικής εναπόθεσης πυρηνικών αποβλήτων. Η κατασκευή τέτοιων χώρων βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο σε πολλές χώρες. Καμία χώρα προς τον παρόν δεν έχει χώρο οριστικής ταφής αποβλήτων.
- Είναι απαραίτητη η θέσπιση ενός εθνικού προγράμματος διαχείρισης για προσωρινή και μόνιμη αποθήκευση ραδιενεργών καταλοίπων που θα προέρχονται από τις πυρηνικές μονάδες της χώρας. Είναι

απαραίτητη η διεθνής αποδοχή αυτού του προγράμματος. Η λύση των πυρηνικών καταλοίπων είναι εθνική υπόθεση αλλά είναι και θέμα συμφωνίας με τους προμηθευτές του πυρηνικού καυσίμου.

- Τα πυρηνικά εργοστάσια είναι ήδη μια πραγματικότητα για πολλές χώρες του πλανήτη και αναμένεται να αυξηθούν οπότε είτε η διαχείριση των πυρηνικών καταλοίπων γίνεται με ανακύκλωση είτε με ταφή είναι απαραίτητη μια αποδεκτή λύση αυτού του ζητήματος ώστε να αναπτυχθεί επιτέλους η πυρηνική τεχνολογία και στον ελλαδικό χώρο.

4.3 Απαραίτητες Υποδομές

Όπως για κάθε μεγάλο έργο έτσι και για την κατασκευή ενός αντιδραστήρα ισχύος στον Ελλαδικό χώρο είναι απαραίτητη η ύπαρξη:

1. Επιστημονικού προσωπικού με κατάλληλη τεχνογνωσία.
2. Ρυθμιστική αρχή η οποία θα ελέγξει της προδιαγραφές, την εγκατάσταση και τη λειτουργία των αντιδραστήρων.
3. Σχετική νομοθεσία που καθορίζει επαρκώς κάθε βήμα.

Όλα τα απαραίτητα στοιχεία γραφειοκρατίας που είναι απαραίτητο να προκηρυχθούν και θα αναφέρουν λεπτομερώς τα οικονομικά στοιχεία τους κόστους λειτουργίας, εγκατάστασης και συντήρησης απαιτεί την ενασχόληση σημαντικού αριθμού εξειδικευμένων επιστημόνων. Να σημειωθεί σαν επιπλέον στοιχείο ότι η τάξη μεγέθους κόστους εγκατάστασης υπολογίζεται σε 5000\$ ή 60000\$/kWe. Αυτή η εξειδικευμένη και λεπτομερής δουλειά θα ανατεθεί σε εταιρεία του εξωτερικού η οποία έχει εμπειρία σε αυτό τον κλάδο. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω οι οικονομικοί και οι λόγοι ασφαλείας καθιστούν αυτή την επένδυση ζήτημα που δέχεται διακρατικές πιέσεις και σαν αποτέλεσμα η εταιρεία αυτή θα πρέπει να ελέγχεται από Έλληνες ειδικούς. Το μόνο σίγουρο λοιπόν είναι ότι σε αυτό το εγχείρημα πρέπει να αξιοποιηθούν Έλληνες ειδικοί επιστήμονες. Η σωστή λειτουργία ενός πυρηνικού εργοστασίου χρειάζεται 200-1000 εργαζόμενους οι οποίοι θα είναι όλοι καταρτισμένοι στον κλάδο εργασίας. Συνεπώς απαιτείται μακροπρόθεσμη εθνική στρατηγική στον κλάδο της εκπαίδευσης. Μάλιστα η αυξανόμενη ζήτηση για επιστήμονες εξειδικευμένους σε θέματα πυρηνικής τεχνολογίας και ακτινοπροστασίας έχει οδηγήσει πολλά κράτη σε αυξημένες χρηματοδοτήσεις των πυρηνικών επιστημών. Στις ΗΠΑ, η στρατηγική αυτή έχει ήδη αποδώσει, καθώς την περίοδο 2000-2007 τετραπλασιάστηκαν οι φοιτητές στους σχετικούς κλάδους σπουδών.

Η ελληνική επιτροπή ελέγχου αλλά και το εργατικό δυναμικό που θα απασχοληθεί σε μια ενδεχόμενη εγκατάσταση πυρηνικού εργοστασίου στην Ελλάδα παρουσιάζει ένα σημαντικό μειονέκτημα. Αν εξαιρέσει κανείς τους μηχανικούς που έχουν αποκτήσει μια σχετική παιδεία με μεταπτυχιακές/διδακτορικές σπουδές πάνω στην πυρηνική ενέργεια σε πανεπιστήμια και δουλειές στο εξωτερικό στην Ελλάδα υπάρχει έλλειψη αντίστοιχου κλάδου εκπαίδευσης. Επιβάλλεται λοιπόν η δημιουργία συγκεκριμένων μεταπτυχιακών σπουδών, ανεξάρτητα από την εγκατάσταση ή όχι πυρηνικού σταθμού στην Ελλάδα ώστε να προκύπτουν Έλληνες επιστήμονες που θα μπορούν να εργαστούν σε αντίστοιχες θέσεις και στο

εξωτερικό. Τα στελέχη αυτά που θα στελεχώσουν τη ρυθμιστική αρχή ακτινοπροστασίας (Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, ΕΕΑΕ), ερευνητικά κέντρα και βιομηχανικές μονάδες που χρησιμοποιούν ραδιενεργές πηγές παραγωγής ενέργειας.

Η έλλειψη κατάλληλης τεχνογνωσίας και εκπαίδευσης καθιστά την Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας ως εντελώς ακατάλληλο όργανο για τον έλεγχο ενός πυρηνικού αντιδραστήρα στον Ελλαδικό χώρο. Σαν αποτέλεσμα σε πιθανή εγκατάσταση τέτοιας μονάδας είναι απαραίτητο να αναδιαρθρωθεί ριζικά η ΕΕΑΕ και να στελεχωθεί με επιστήμονες με εξειδικευμένες σπουδές στο συγκεκριμένο κλάδο. Βέβαια σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι η ΕΕΑΕ πρέπει να αναδιαρθρωθεί και να καταστεί ανεξάρτητη αρχή ακόμα και τώρα ανεξάρτητα με την απόφαση ή όχι εγκατάστασης πυρηνικού αντιδραστήρα στην Ελλάδα. Αυτό πρέπει να συμβεί για τους εξής λόγους:

- Για λόγους υγείας του πληθυσμού.
- Για την προστασία του περιβάλλοντος.
- Εφαρμογή των διεθνών δεσμεύσεων της χώρας.
 - Διεθνείς συμβάσεις που έχει επικυρώσει η Ελλάδα για την ασφάλεια των πυρηνικών αντιδραστήρων
 - Για την ασφάλεια των πυρηνικών καταλοίπων.

Η λήψη της απόφασης για ανάπτυξη πυρηνικού σταθμού στην Ελλάδα, μια χώρα χωρίς κανένα πυρηνικό παρελθόν και υπόβαθρο προϋποθέτει αξιολόγηση ενεργειακών αναγκών, δυνατοτήτων του κράτους καθώς και των οικονομικών και κοινωνικών αλλαγών που θα επιφέρει. Η λήψη μιας τέτοιας απόφασης εξαρτάται από την πολυπλοκότητα των δεσμεύσεων και των υποχρεώσεων καθώς και την πολύχρονη σχεδίαση που θα βασιστεί για το μέλλον. Η εγκατάσταση ενός πυρηνικού σταθμού δεν αποτελεί κάτι σύντομο ούτε οριοθετεί το τέλος του εγχειρήματος καθώς αποτελεί μια δέσμευση με χρονικό ορίζοντα τουλάχιστον τα επόμενα 100 χρόνια. Η ηλεκτροπαραγωγή από πυρηνική ενέργεια είναι μια συνεχής και εξελισσόμενη διαδικασία που απαιτεί μια ελεγκτική ρυθμιστική αρχή.

Η ΕΕΑΕ υπάγεται στο Υπουργείο Ανάπτυξης το οποίο ελέγχει και άλλες βιομηχανίες ή τη ΔΕΗ. Αυτές τις βιομηχανίες η ΕΕΑΕ τις ελέγχει για εφαρμογή κανόνων ακτινοπροστασίας. Για να μην προκύψει πρόβλημα με διαφωνίες και σύγκρουση συμφερόντων στο ίδιο υπουργείο πρέπει η ΕΕΑΕ να υπαχθεί στο Υπουργείο Περιβάλλοντος ή στον Πρωθυπουργό. Επίσης, για να ελαχιστοποιηθούν κομματικές διαρροές πρέπει και η αντιπολίτευση να λαμβάνει λόγο στον ορισμό του διοικητικού συμβουλίου (ΔΣ) της ΕΕΑΕ. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα στις ΗΠΑ όπου ο πρόεδρος ορίζει τον πρόεδρο της ρυθμιστικής αρχής (Nuclear Regulatory Commission) και τα μισά μέλη του ΔΣ και τα άλλα μισά τα ορίζει η αντιπολίτευση. Στην Ελλάδα λειτουργούν 500 περίπου τέτοιες βιομηχανίες. Ο νόμος ακτινοπροστασίας (ΦΕΚ 539/ 19-07 1991) απαιτεί υπεύθυνο ακτινοπροστασίας (μη ιατρικών εφαρμογών), για αυτές τις εγκαταστάσεις. Για τον υπεύθυνο ακτινοπροστασίας (μη ιατρικών εφαρμογών) ο νόμος απαιτεί πτυχιούχο θετικών επιστημών με μεταπτυχιακή θεωρητική και πρακτική εκπαίδευση ή πολυετή εμπειρία στην ακτινοπροστασία. Ο νόμος δεν έχει εφαρμοστεί, διότι στην Ελλάδα δεν υπάρχουν σχετικές μεταπτυχιακές σπουδές στην πυρηνική

τεχνολογία. Υπάρχει μόνο ένα μεταπτυχιακό πρόγραμμα «ακτινοφυσικής», δηλαδή ακτινοπροστασίας στις ιατρικές εφαρμογές.

Επίσης, πρέπει να γίνει εκσυγχρονισμός και αναπροσαρμογή στην υπάρχουσα νομοθεσία ακτινοπροστασίας που αναθέτει τον έλεγχο αντιδραστήρων και εγκαταστάσεων στην ΕΕΑΕ. Τέλος για τη λειτουργία πυρηνικού αντιδραστήρα είναι απαραίτητη η προηγμένη τεχνολογία που μόνο εξειδικευμένα εργαστήρια μπορούν να διαχειριστούν καθώς επίσης και οι ειδικές υπηρεσίες – προμήθειες πυρηνικών εργοστασίων. Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών των αναγκών θα καλυφθεί από εταιρείες του εξωτερικού.

Πρακτικά η υλοποίηση ενός τέτοιου εγχειρήματος προϋποθέτει εξασφάλιση τεράστιων επενδυτικών κεφαλαίων. Όπως συνειδητοποιεί κανείς όλα αυτά επηρεάζονται από το πολιτικό κλίμα, από τις ενεργειακές ανάγκες, από τον τύπο αντιδραστήρα που θα επιλεγεί, το κόστος των υλικών κατασκευής, το χρονικό διάστημα της κατασκευής και άλλες λεπτομέρειες που προκύπτουν χωρίς προειδοποίηση. Επίσης το ήδη αρχικό υψηλό κόστος μπορεί να εκτιναχθεί σε μεγαλύτερα ποσά ειδικά σε χώρες που δεν έχουν καμία τεχνογνωσία. Το υψηλό κόστος βέβαια αντισταθμίζεται με το χαμηλό κόστος των λειτουργικών δαπανών. Όσον αφορά το χρονικό διάστημα κατασκευής αυτό μπορεί να πάρει και 15 χρόνια από την λήψη της απόφασης.

Πρέπει να δοθεί έμφαση και στον τρόπο με τον οποίο θα εμπεδωθεί η ραδιολογική ασφάλεια και η ασφάλεια των πυρηνικών εγκαταστάσεων στη συνείδηση του λαού. Είναι κρίσιμο σημείο να υπάρχει υψηλός βαθμός συναίνεσης ή αντίδρασης από την τοπική κοινωνία. Υπάρχει περίπτωση μια κοινωνία να δέχεται την καταστροφή του περιβάλλοντος μέσω του φαινομένου του θερμοκηπίου και να απορρίπτει την πιο οικολογική πυρηνική ενέργεια παρά τις πιθανές ενεργειακές κρίσεις που συμβαίνουν. Απαντήσεις θα δοθούν μόνο με τη βοήθεια προγραμμάτων ενημέρωσης της κοινής γνώμης που πρέπει να συνυπολογίζονται ως μέρος της διαδικασίας για την προσαρμογή των πολιτών σε μια διαφορετική σε σχέση με τη σημερινή ενεργειακή πραγματικότητα.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι πιθανές ενδείξεις και ανησυχίες για δυνητικά ελλείματα ενέργειας στα επόμενα χρόνια ελαχιστοποιούνται με τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας σε χώρες της ΕΕ. Η παραγωγή ηλεκτρισμού από πυρηνική ενέργεια επηρεάζεται από το κόστος εισαγωγής του ουρανίου. Ο Διεθνής ορισμός πυρηνικής ενέργειας χαρακτηρίζει την πυρηνική ενέργεια ως οικονομικά αποδεκτή και βιώσιμη λύση παραγωγής ενέργειας με την προϋπόθεση ότι λαμβάνονται υπόψη οι ανησυχίες των πολιτών για την υγεία και για το περιβάλλον. Το μεγαλύτερο θετικό της πυρηνικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή είναι οι μηδενικοί ρύποι CO₂ που εκλύονται στο περιβάλλον. Η Ευρωπαϊκή Ένωση αποτελεί τον ηγέτη σε ότι αφορά τον βιομηχανικό κλάδο της παραγωγής πυρηνικής ενέργειας. Τα κράτη μέλη αποφασίζουν πόσο θα επενδύσουν στην πυρηνική ενέργεια. Σύμφωνα με τις συμφωνίες και τα μέτρα ασφαλείας ένας μεγάλος αριθμός πυρηνικών αντιδραστήρων θα κλείσει εντός ΕΕ τα επόμενα χρόνια. Για να διατηρηθεί η παραγωγή στα ίδια επίπεδα ή ακόμα και να αυξηθεί όπως είναι λογικό πρέπει να κατασκευαστούν νέοι αντιδραστήρες ή να συντηρηθούν και να πάρουν παράταση λειτουργίας κάποιοι άλλοι. Η ΕΕ είναι υποχρεωμένη να τηρεί όλες τις παρακάτω διεθνείς υποχρεώσεις:

- Μη διάδοση πυρηνικού υλικού και τεχνολογίας σε μη εξειδικευμένους επιστήμονες με σκοπό την αποφυγή χρήσης της πυρηνικής ενέργειας με αρνητικούς σκοπούς (πχ. Τρομοκρατία).
- Προστασία της υγείας
- Ασφάλεια εργαζομένων και των πολιτών
- Πυρηνική ασφάλεια
- Προστασία περιβάλλοντος

Μελέτες δείχνουν ότι το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας επηρεάζεται και από την άποψη της κοινής γνώμης. Σε πολλές χώρες ο αντίκτυπος της κοινής γνώμης στις λήψεις σημαντικών αποφάσεων είναι μεγάλος. Η κοινή γνώμη όπως είναι λογικό ανησυχεί για την ασφάλεια των πυρηνικών σταθμών παραγωγής ενέργειας, για τη διαχείριση πυρηνικών αποβλήτων, τη διάδοση των πυρηνικών εξοπλισμών καθώς και για ζητήματα που σχετίζονται με την τρομοκρατία. Σύμφωνα με έρευνα του 2005 το κοινό στην ΕΕ δεν είναι καθόλου σωστά ενημερωμένο για την πυρηνική ενέργεια και τα θετικά που μπορεί να προσφέρει σε θέματα ενέργειας αλλά και μείωσης κλιματικών αλλαγών και άλλων θετικών συνεπειών από την εκμετάλλευση των πυρηνικών καταλοίπων. Στα αποτελέσματα τονίζεται ότι τέσσερα στα δέκα άτομα που αντιτίθενται στην πυρηνική ενέργεια θα άλλαζαν γνώμη αν ήξεραν τις ασφαλείς τεχνικές που χρησιμοποιούνται πλέον για τα πυρηνικά κατάλοιπα. Οι επιλογές που υπάρχουν σήμερα είναι:

1. Συμβατικές μονάδες με έκλυση ρύπων χωρίς έλεγχο στην ατμόσφαιρα.

2. Πυρηνικοί αντιδραστήρες σχάσης, όπου η διαχείριση των καταλοίπων γίνεται από τον άνθρωπο αλλά πρέπει να ελέγχονται επί χρόνια για λόγους ασφάλειας.

Η ελληνική πραγματικότητα δυστυχώς διαφέρει πολύ σε σχέση με την ευρωπαϊκή. Το Συμβούλιο Εθνικής Ενεργειακής Στρατηγικής (ΣΕΕΣ) αναδεικνύει τη σημασία του ενεργειακού συστήματος ώστε να εξασφαλίζεται εφοδιασμός χωρίς να δημιουργούνται ελλείψεις από αξιόπιστες πηγές, το προϊόν (ηλεκτρική ενέργεια) να παρέχεται σε προσιτές τιμές και να υπάρχει σεβασμός στο περιβάλλον. Στην έρευνα αυτή του ΣΕΕΣ δυστυχώς η εγκατάσταση πυρηνικού αντιδραστήρα στην Ελλάδα αποτελεί μόνο μια εναλλακτική ενεργειακή προοπτική που δε σχεδιάζεται για το άμεσο μέλλον. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η αξιολόγηση των ενεργειακών αναγκών και στόχων της Ελλάδας. Πρέπει στη συνέχεια να αναλυθούν οι δυνατότητες και τα προβλήματα όλων των πηγών ενέργειας που αναφέρθηκαν και αναλύθηκαν προηγουμένως. Συγκεκριμένα όσον αφορά την πυρηνική ενέργεια ενδείκνυται:

1. Να αξιολογηθεί κατά πόσο η πυρηνική ενέργεια μπορεί να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται στα περισσότερα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
2. Να ξεκινήσει μια οργανωμένη, εκτεταμένη, αντικειμενική και υπεύθυνη ενημέρωση των Ελλήνων πολιτών και πολιτικών σχετικά με τις ενεργειακές ανάγκες της χώρας ώστε να γίνει κατανοητό σε όλους ότι η πυρηνική ενέργεια θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί προς όφελος της Ελλάδας.
3. Να ληφθούν μέτρα ενημέρωσης σχετικά με την τεχνογνωσία και την εμπειρία στον κλάδο της πυρηνικής ενέργειας.
4. Να δημιουργηθούν κατάλληλοι κλάδοι ή μετεκπαίδευση εργατικού δυναμικού με μακροπρόθεσμη εθνική επένδυση στον κλάδο της εκπαίδευσης.
5. Η χώρα να καταστεί έτοιμη σε θέματα μελετών, νομοθεσιών και υποδομών.
6. Να πραγματοποιηθούν εισηγήσεις από κυβερνητικούς και μη φορείς σχετικά με την ένταξη ή όχι της πυρηνικής ενέργειας στον ελληνικό χώρο.
7. Θεώρηση από τους αρμόδιους κρατικούς φορείς ένταξης της πυρηνικής ενέργειας στον μακροχρόνιο ενεργειακό σχεδιασμό της Ελλάδας.

Σε σχέση με τη Βουλγαρία, την Τουρκία, τη Ρουμανία, την Τσεχία και την Ουγγαρία, χώρες δηλαδή που διαθέτουν ή σχεδιάζουν να κατασκευάσουν πυρηνικούς αντιδραστήρες η Ελλάδα με τη μη εγκατάσταση πυρηνικής μονάδας υστερεί διότι αυτό συνεπάγεται εκτεταμένες εισαγωγές γαιάνθρακα και πετρελαίου. Τα ορυκτά καύσιμα συνεπάγονται με τη σειρά τους περιβαλλοντική ρύπανση και ενεργειακή εξάρτηση από άλλες χώρες ή και εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από άλλες χώρες που θα εγκαταστήσουν πυρηνικούς αντιδραστήρες (Εικόνα 61).

ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Country	Reactors in operation		Reactors under construction		Nuclear electricity supplied in 2010	
	No. of units	Total MW(e)	No. of units	Total MW(e)	TW (e)h	% of total
Belgium	7	5,926	-	-	45.73	51.16
Bulgaria	2	1,906	2	1,906	14.24	33.13
Czech Rep.	6	3,678	-	-	26.44	33.27
Finland	4	2,716	1	1,600	21.89	28.43
France	58	63,130	1	1,600	410.09	74.12
Germany	17	20,490	-	-	133.01	28.38
Hungary	4	1,889	-	-	14.66	42.10
Netherlands	1	482	-	-	3.75	3.38
Romania	2	1,300	-	-	10.70	19.48
Slovakia	4	1,816	2	782	13.54	51.80
Slovenia	1	666	-	-	5.38	37.30
Spain	8	7,514	-	-	59.26	20.09
Sweden	10	9,303	-	-	55.73	38.13
UK	19	10,137	-	-	56.85	15.66
EU-27	143	130,953	6	5,888	871.27	NA
Switzerland	5	3,238	-	-	25.34	38.01
Ukraine	15	13,107	2	1,900	83.95	48.11
Total	163	147,298	8	7,788	980.56	NA

Source: IAEA (2011).

Εικόνα 62: Πυρηνικοί αντιδραστήρες στην Ευρώπη (2010)

Κλείνοντας την παρούσα πτυχιακή εργασία παρατίθεται η θέση που είχε διατυπώσει ο Πρόεδρος του ΤΕΕ το 1980 σε ημερίδα με τίτλο «Εγκατάσταση πυρηνικού αντιδραστήρος ισχύος (Αθήνα 1980) και η οποία αναφέρει ότι:

- Το ΤΕΕ θεωρεί απαραίτητη τη σφαιρική προσέγγιση του ενεργειακού προβλήματος και ότι όλες οι πηγές ενέργειας (πετρέλαιο, πυρηνική τεχνολογία κτλ.) πρέπει να εξεταστούν συνδυαστικά. Τονίζει ότι το ΤΕΕ σαφώς και δεν είναι αντίθετο με την εγκατάσταση αντιδραστήρα ισχύος στην Ελλάδα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ωστόσο πρέπει να εξαντληθεί και η παραμικρή λεπτομέρεια στη μελέτη του θέματος ενταγμένη στην ενεργειακή πολιτική της χώρας. Όλα τα σημαντικά ζητήματα αναφέρθηκαν και πιο πάνω ωστόσο τα βασικότερα που πρέπει να επιλυθούν για να είναι εφικτή μια τέτοια τεράστια επένδυση είναι:

- Η εξασφάλιση μη ρύπανσης του περιβάλλοντος
- Η εξασφάλιση προμήθειας ουρανίου
- Ποια χώρα με εμπειρία θα αναλάβει τη συντήρηση και τον εξοπλισμό του εργοστασίου
- Τα συγκριτικά οικονομικά στοιχεία που στηρίζεται η επιλογή παραγωγής ενέργειας από πυρηνικό εργοστάσιο και όχι από άλλες συμβατικές μονάδες
- Η επιλογή περιοχής για εγκατάσταση που δεν θα είναι επικίνδυνη για την υγεία των κατοίκων των γύρω περιοχών.
- Απαιτείται πλήρης μελέτη για μία ισόρροπη ανάπτυξη που η ποιότητα ζωής θα βελτιώνεται παράλληλα με την υλική ανάπτυξη

ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ



Εικόνα 63: Πυρηνικοί αντιδραστήρες στην Ευρώπη (2005) (Πηγή: [46])



Εικόνα 64: Πυρηνικοί αντιδραστήρες στον κόσμο (2005) (Πηγή: [46])

Εκτός του οικονομικού στοιχείου που όπως φαίνεται στο Κεφάλαιο 3 δείχνει ότι ένα πυρηνικό εργοστάσιο είναι οικονομικά συμφέρουσα επένδυση στην Ελλάδα η σημαντικότερη παράμετρος είναι η σεισμικότητα της περιοχής εγκατάστασης. Η Πελοπόννησος και η Δυτική Στερεά Ελλάδα συνεπώς απορρίπτονται καθώς αποτελούν σεισμογενείς περιοχές λόγω της ένωσης των 2 τεκτονικών πλακών στα όρια τους. Επίσης, απορρίπτεται από γεωγραφικής άποψης η λύση οποιοδήποτε νησιού. Η ιδανικότερη περιοχή για εγκατάσταση είναι η περιοχή της Δράμας καθώς εκεί βρίσκονται τα περισσότερα κοιτάσματα ουρανίου και δεν υπάρχει έντονη σεισμικότητα στην περιοχή. Επίσης η περιοχή της Δράμας πλήττεται από υψηλά ποσοστά ανεργίας και αυτό σημαίνει ότι θα αναπτυχθεί η περιοχή.

6 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ακολουθούν εικόνες από τον ερευνητικό πυρηνικό σταθμό Δημόκριτος στην Αθήνα (Πηγή: [47])



Eurokinissi (ΦΩΤ.Γ.ΚΟΝΤΑΡΙΝΗΣ)23/3/99 "ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ" ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΣ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ



ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ



26/1/99-ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ(ΣΤΗ ΦΩΤΟ
Ο ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ)

Eurokinissi ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΜΕΤΩΝΗΣ



Eurokinissi (ΦΩΤ.Γ.ΚΟΝΤΑΡΙΝΗΣ)23/3/99 "ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ" ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΣ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Ακολουθούν φωτογραφίες από τους αναλυτικούς υπολογισμούς της οικονομικής μελέτης που παρουσιάστηκε.

Χρονικός ορίζοντας N = 20 έτη

	A	B	C	D	E
1				Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς MWh	Έσοδα πώλησης ενέργειας €
2	Ισχύς πυρηνικού εργοστασίου (MW)	1000		8000000	1432000000
3	Ισχύς λιγνιτικού σταθμού (MW)	750		6000000	1074000000
4	Ισχύς σταθμού φυσικού αερίου (MW)	400		3200000	572800000
5					
6	Καθαρός χρόνος λειτουργίας πυρηνικού εργ. (hr/έτος)	8000			
7					
8	Τιμή πώλησης κιλοβατώρας €/MWh	179			
9					
10		Πυρηνικός σταθμός	Σταθμός λιγνίτη	Σταθμός Φ.Α.	
11	Αρχική επένδυση	2496000000	1400000000	296000000	
12	Ετήσιο κόστος καυσίμου	236000000	856000000	196000000	
13	Λειτουργικό κόστος	808000000	800000000	500000000	
14	Κόστος αποδόμησης	96000000	58000000	12000000	
15	Άθροισμα ετησίου + λειτουργικού	104.400.000 €	165.600.000 €	246.000.000 €	
16					
17	Χρονικός ορίζοντας N	20			
18	Επιτόκιο r(%)	0,06			
19					
20		Πυρηνικός σταθμός	Σταθμός λιγνίτη	Σταθμός Φ.Α.	
21	Παρούσα αξία εσόδων	16.424.927.184,99 €	#####	6.569.970.873,99 €	
22	Παρούσα αξία αρχ. Επένδυσης	2.496.000.000,00 €	1.400.000.000,00 €	296.000.000,00 €	
23	Κόστος καυσίμου+Λειτουργικό κ	1.197.459.775,22 €	1.899.418.953,79 €	2.821.600.619,77 €	
24	ΠΑ_αποδόμησης	2.993.325,38 €	1.808.467,42 €	374.165,67 €	
25	ΠΑ_εξόδων	3.696.453.100,60 €	3.301.227.421,21 €	3.117.974.785,44 €	
26					
27	Κέρδος/MWh (€/MWh)	1591,06	1502,91	1.078,75 €	

ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Χρονικός ορίζοντας N = 30 έτη

	A	B	C	D	E
1				Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς MWh	Εσοδα πώλησης ενέργειας €
2	Ισχύς πυρηνικού εργοστασίου (MW)	1000		8000000	1432000000
3	Ισχύς λιγνιτικού σταθμού (MW)	750		6000000	1074000000
4	Ισχύς σταθμού φυσικού αερίου (MW)	400		3200000	572800000
5					
6	Καθαρός χρόνος λειτουργίας πυρηνικού εργ. (hr/έτος)	8000			
7					
8	Τιμή πώλησης κιλοβατώρας €/MWh	179			
9					
10		Πυρηνικός σταθμός	Σταθμός λιγνίτη	Σταθμός Φ.Α.	
11	Αρχική επένδυση	2496000000	1400000000	296000000	
12	Ετήσιο κόστος καυσίμου	23600000	85600000	196000000	
13	Λειτουργικό κόστος	80800000	80000000	50000000	
14	Κόστος αποδόμησης	9600000	5800000	1200000	
15	Άθροισμα ετησίου + λειτουργικού	104.400.000 €	165.600.000 €	246.000.000 €	
16					
17	Χρονικός ορίζοντας N	30			
18	Επιτόκιο r(%)	0,06			
19					
20		Πυρηνικός σταθμός	Σταθμός λιγνίτη	Σταθμός Φ.Α.	
21	Παρούσα αξία εσόδων	19.711.238.208,93 €	14.783.428.656,7 €	7.884.495.283,57 €	
22	Παρούσα αξία αρχ. Επένδυσης	2.496.000.000,00 €	1.400.000.000,00 €	296.000.000,00 €	
23	Κόστος καυσίμου+Λειτουργικό κ	1.437.048.372,22 €	2.279.456.038,69 €	3.386.148.463,27 €	
24	ΠΑ_αποδόμησης	1.671.457,26 €	1.009.838,76 €	208.932,16 €	
25	ΠΑ_εξόδων	3.934.719.829,47 €	3.680.465.877,45 €	3.682.357.395,42 €	
26					
27	Κέρδος/MWh (€/MWh)	1972,06	1850,49	1.313,17 €	

ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Χρονικός ορίζοντας N = 40 έτη

	A	B	C	D	E
1				Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς MWh	Εσοδα πώλησης ενέργειας €
2	Ισχύς πυρηνικού εργοστασίου (MW)	1000		8000000	1432000000
3	Ισχύς λιγνιτικού σταθμού (MW)	750		6000000	1074000000
4	Ισχύς σταθμού φυσικού αερίου (MW)	400		3200000	572800000
5					
6	Καθαρός χρόνος λειτουργίας πυρηνικού εργ. (hr/έτος)	8000			
7					
8	Τιμή πώλησης κιλοβατώρας €/MWh	179			
9					
10		Πυρηνικός σταθμός	Σταθμός λιγνίτη	Σταθμός Φ.Α.	
11	Αρχική επένδυση	2496000000	1400000000	296000000	
12	Ετήσιο κόστος καυσίμου	23600000	85600000	196000000	
13	Λειτουργικό κόστος	80800000	80000000	50000000	
14	Κόστος αποδόμησης	9600000	5800000	1200000	
15	Άθροισμα ετησίου + λειτουργικού	104.400.000 €	165.600.000 €	246.000.000 €	
16					
17	Χρονικός ορίζοντας N	40			
18	Επιτόκιο r(%)	0,06			
19					
20		Πυρηνικός σταθμός	Σταθμός λιγνίτη	Σταθμός Φ.Α.	
21	Παρούσα αξία εσόδων	21.546.297.120,02 €	16.159.722.840,0 €	8.618.518.848,01 €	
22	Παρούσα αξία αρχ. Επένδυσης	2.496.000.000,00 €	1.400.000.000,00 €	296.000.000,00 €	
23	Κόστος καυσίμου+λειτουργικό κ	1.570.833.393,39 €	2.491.666.761,92 €	3.701.389.030,40 €	
24	ΠΑ_αποδόμησης	933.333,00 €	563.888,69 €	116.666,63 €	
25	ΠΑ_εξόδων	4.067.766.726,39 €	3.892.230.650,61 €	3.997.505.697,02 €	
26					
27	Κέρδος/MWh (€/MWh)	2184,82	2044,58	1.444,07 €	

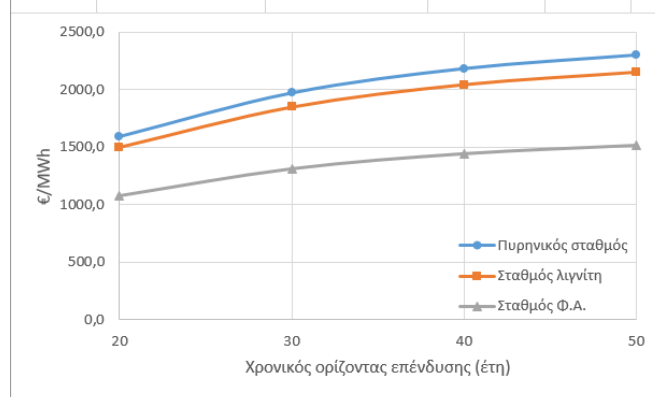
ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Χρονικός ορίζοντας N = 50 έτη

	A	B	C	D	E
1				Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς MWh	Εσοδα πώλησης ενέργειας €
2	Ισχύς πυρηνικού εργοστασίου (MW)	1000		8000000	1432000000
3	Ισχύς λιγνιτικού σταθμού (MW)	750		6000000	1074000000
4	Ισχύς σταθμού φυσικού αερίου (MW)	400		3200000	572800000
5					
6	Καθαρός χρόνος λειτουργίας πυρηνικού εργ. (hr/έτος)	8000			
7					
8	Τιμή πώλησης κιλοβατώρας €/MWh	179			
9					
10		Πυρηνικός σταθμός	Σταθμός λιγνίτη	Σταθμός Φ.Α.	
11	Αρχική επένδυση	2496000000	1400000000	2960000000	
12	Ετήσιο κόστος καυσίμου	236000000	856000000	1960000000	
13	Λειτουργικό κόστος	808000000	800000000	500000000	
14	Κόστος αποδόμησης	96000000	58000000	12000000	
15	Άθροισμα ετησίου + λειτουργικού	104.400.000 €	165.600.000 €	246.000.000 €	
16					
17	Χρονικός ορίζοντας N	50			
18	Επιτόκιο r(%)	0,06			
19					
20		Πυρηνικός σταθμός	Σταθμός λιγνίτη	Σταθμός Φ.Α.	
21	Παρούσα αξία εσόδων	22.570.984.431,31 €	#####	9.028.393.772,52 €	
22	Παρούσα αξία αρχ. Επένδυσης	2.496.000.000,00 €	1.400.000.000,00 €	296.000.000,00 €	
23	Κόστος καυσίμου+λειτουργικό κ	1.645.538.250,44 €	2.610.164.121,39 €	3.877.417.716,55 €	
24	ΠΑ_αποδόμησης	521.168,27 €	314.872,50 €	65.146,03 €	
25	ΠΑ_εξόδων	4.142.059.418,71 €	4.010.478.993,88 €	4.173.482.862,59 €	
26					
27	Κέρδος/MWh (€/MWh)	2303,62	2152,96	1.517,16 €	

Συγκεντρωτικός Πίνακας

N (έτη)	€/MWh		
	Πυρηνικός σταθμός	Σταθμός λιγνίτη	Σταθμός Φ.Α.
20	1591,1	1502,9	1078,7
30	1972,1	1850,5	1313,2
40	2184,8	2044,6	1444,1
50	2303,6	2153,0	1517,2



7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Γιώργος Γιαδικιάρογλου, (Απρίλιος, 2007), Πυρηνική ενέργεια – νέες προοπτικές, ΕΕΑΕ – ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος
- Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας. www.admie.gr.
- Αλεξάνδρα Καπλάνη, 2013, Το Ενεργειακό Πρόβλημα Στην Σύγχρονη Εποχή, Ερευνητική Εργασία.
- Ιωάννης Ψαρράς, (ΑΘΗΝΑ 2010), Σημειώσεις: Διαχείριση Ενέργειας και Περιβαλλοντική Πολιτική, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
- ΔΗΜΟΣΙΑ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ - Δ.Ε.Η. , www.dei.gr
- Φώτιος Ε. Καραγιάννης, (Δεκέμβριος 2012), ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ, Παρουσίαση στο ΕΜΠ, 5/12/12
- Ιωάννης Βούλγαρης, (Θεσσαλονίκη 2005), Πηγές ενέργειας και μετατροπή τους σε ηλεκτρική ενέργεια, Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας, ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
- Κ.Βουρνάς, Β.Κ. Παπαδιάς, Κ. Ντελκίς, (2011), ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ, Εκδόσεις Συμμετρία
- Νικόλαος Πατρώνης, Σύγχρονη Φυσική, (2012), Πυρηνική Φυσική και Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων, Διάλεξη 3: Ενέργεια Σύνδεσης και Πυρηνικά Πρότυπα
- Τσιούτρα Σταυρούλα, Ρόκκου Αικατερίνη, (Θεσσαλονίκη 2010), Σύγκριση Αιολικού και Πυρηνικού Σταθμού, Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας, ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
- Πορίσματα της Ομάδας Εργασίας της Επιτροπής Ενέργειας της Ακαδημίας Αθηνών επί του θέματος «Πυρηνική Ενέργεια και Ενεργειακές Ανάγκες της Ελλάδος»
- Δημήτριος Παπαντώνης. Μικρά υδροηλεκτρικά έργα. Εκδόσεις Συμεών. Αθήνα 2008. ISBN10: 9607888235.
- Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας- National Report 2012,
- W.N. COTTINGHAM – D.A. GREENWOOD, Μετάφραση: Κ. ΣΑΡΗΓΙΑΝΝΗΣ, Επιμέλεια: Κ. Ν. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΣ, (2003), ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ, Εκδόσεις τυπωθήτω, ΓΙΩΡΓΟΣ ΔΑΡΔΑΝΟΣ
- Αντωνόπουλος-Ντόμης Μ.: Εισαγωγή στην Πυρηνική Τεχνολογία, Εκδόσεις Ζήτη, (2005)
- Τσάγκας Ν.Φ.: Πυρηνική Τεχνολογία, Εκδόσεις Αιβάζης, (1986)
- Μ. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ ΝΤΟΜΗΣ , ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Αγγλική Βιβλιογραφία

- U.S. Energy Information Administration (EIA), (May – June 2006), Independent Statistics & Analysis: International Energy Annual 2004
- BP Statistical review of world energy 2006
- Περιβάλλον & Διαχείριση Ενέργειας: Γαιάνθρακες, <http://www.allaboutenergy.gr/>
- Marland, G., T.A. Boden, and R. J. Andres (2003), Global, Regional, and National CO₂ Emissions in Trends: A Compendium of Data on Global Change. Oak Ridge, Tenn., U.S.A.: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy.
- International Energy Agency –IEA, Electricity Statistics,
- Εφαρμογές της Πυρηνικής Τεχνολογίας στη Βιομηχανία Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Μάρτιος 2009, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας
- John Rich, World Nuclear Association, 2006
- National Environmental Trust, Washington DC, 1999

ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

- J. Trittin, German Federal Minister for the Environment, 2002
- Greenpeace, 2006
- The schiff project data portal (2012)
- European Environment Agency, (April 30, 2012), Electricity production by fuel, EU-27, [http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/electricity-production-by-fuel-1/electricity-production-by-fuel-assessment-3
- International Atomic Energy Agency (IAEA), (2012), Nuclear Technology Review 2012
- IEA Energy Technology Essentials, Nuclear Power
- IEA Nuclear Technology Statistics, 2011
- World Nuclear Association, Nuclear Power in China, (Updated 27 November 2013),
- Cochran R.G. and Tsoufanidis N.: The Nuclear Fuel Cycle: Analysis and Management, American Nuclear Society, Illinois, (1999)
- Energy Technology Perspectives, IEA-2006; World Energy Outlook, IEA-2006; Projected Costs of Generating Electricity, IEA-NEA-2005; Economics of Nuclear Power, US 2004; Nuclear Energy Today, NEA-2003; Uranium-2005: Resources, Production and Demand, NEA-2005
- Nuclear Engineering International, August 2008.
- John R. Lamarsh, Anthony J. Baratta, Introduction to Nuclear Engineering, THIRD EDITION
- Nuclear Engineering International, August 2008

Ηλεκτρονικές Πηγές

- [1] <http://www.iea.org/statistics/topics/Electricity>
- [2] www.admie.gr.
- [3] http://energiakoiergazomenoidei.blogspot.gr/2014/11/blog-post_36.html
- [4] <https://www.dei.gr/el/i-dei/perivallon/oi-perivallontikes-draseis-twn-monadwn-paragwgis-k>
- [5] <http://www.chemist.gr/2011/03/4964/>
- [6] <http://www.tovima.gr/society/article/?aid=346260>
- [7] <http://www.kitco.com/commentaries/2016-01-25/The-Changing-World-Of-Uranium-Mining.html>
- [8] http://prinfo.bg/language/bg/uploads/files/pressreleaseindex_0/press_release_1dcda6c54d72ddd734d081fd7d08ebe9.jpg
- [9] <https://cna.ca/technology/energy/candu-technology/>
- [10] <http://www.rand.org/pubs/monographs/MG970.html>
- [11] <http://mainland.cctt.org/istf2011/pages/Background/NuclearPlants.asp>
- [12] <http://chemistry.tutorvista.com/nuclear-chemistry/nuclear-chain-reaction.html>
- [13] <http://images.tutorvista.com/cms/images/101/coolant-system.png>
- [14] <http://www.ihl.co.jp/nupd/nuclear%20technology/nuclear%20power%20plant/photo%20rpv%20of%20abwr-e.html>
- [15] <http://www.adina.com/newsgH104.shtml>
- [16] https://panosz.wordpress.com/2008/05/26/nuclear_energy/
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/Generation_IV_reactor
- [18] <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/multimedia/animated-images-plants-pwr-bwr.html>
- [19] <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/multimedia/animated-images-plants-pwr-bwr.html>

ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ
ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

- [20] <https://www.euronuclear.org/e-news/e-news-26/HP-BWR.htm>
- [21] <http://energy.about.com/od/nuclear/a/Candu-Nuclear-Reactor-Is-Moderated-With-Heavy-Water.htm>
- [22] <http://www.ndt.net/article/pacndt98/1/1.htm>
- [23] <http://www.swaxbz.com/2015/04/kwa-wanatechnologia-sasa-angalia-jinsi.html>
- [24] <http://www.slideshare.net/MisterKhan/presentation-on-nuclear-reactor-on9-1007>
- [25] https://www.cameco.com/uranium_101/electricity-generation/types-of-reactors/
- [26] <http://www.industrialheating.com/articles/89613-the-nuclear-renaissance-opportunities-for-the-heat-treating-industry-part-2?v=preview>
- [27] https://en.wikipedia.org/wiki/Pebble-bed_reactor
- [28] https://www.cameco.com/uranium_101/electricity-generation/types-of-reactors/
- [29] <http://www.aventurine.com/nuclear-power-how-different-is-the-fourth-generation/>
- [30] <http://www.the-weinberg-foundation.org/learn/next-gen/gcfr/>
- [31] https://en.wikipedia.org/wiki/Molten_salt_reactor
- [32] https://www.cameco.com/uranium_101/electricity-generation/types-of-reactors/
- [33] <https://www.epa.gov/aboutepa/three-mile-island>
- [34] <http://www.technologystudent.com/energy1/nuclear1.htm>
- [35] https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_Fukushima_and_Chernobyl_nuclear_accidents
- [36] <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/fukushima-accident.aspx>
- [37] <http://users.uoa.gr/~thanost/iyc/2011-06-01/Fukushima.pdf>
- [38] <http://newpost.gr/tag/%CF%80%CF%85%CF%81%CE%B7%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82%20%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%B9%CE%B4%CF%81%CE%B1%CF%83%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B1%CF%82>
- [39] <http://evgpot.weebly.com/piupsilonrhoetanuiotakappaalpha-alphatauupsilonchietamualphataualpha.html>
- [40] <http://www.efsyn.gr/arthro/akrivi-moy-kilovatora>
- [41] http://www.greenpeace.org/greece/Global/greece/report/2011/climate/2011mar_pyriniko_kostos.pdf
- [42] <http://www.greenpeace.org/international/en/>
- [43] http://www.ncwarn.org/wp-content/uploads/2010/07/NCW-SolarReport_final1.pdf
- [44] <http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGYM-B106/382/2534.9803/>
- [45] [http://www.mylefkada.gr/alles-eidiseis/ellada/xartis-seismikotitas-16277/ \)](http://www.mylefkada.gr/alles-eidiseis/ellada/xartis-seismikotitas-16277/)
- [46] <http://www-ns.iaea.org/committees/insag.asp>
- [47] http://www.energia.gr/article.asp?art_id=45248