



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Εξέταση της δυνατότητας προώθησης της
πυρηνικής ενέργειας με χρήση πολυκριτηριακών
μεθόδων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΛΟΥΚΑ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ

Επιβλέπων: Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Εξέταση της δυνατότητας προώθησης της πυρηνικής ενέργειας με χρήση πολυκριτηριακών μεθόδων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΛΟΥΚΑ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ

Επιβλέπων: Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013

.....
.....
.....
Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Λούκα Π. Παναγιώτα

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © ΛΟΥΚΑ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς την συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν την συγγραφέα και δεν πρέπει να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

.....

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Απόφασης της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, στα πλαίσια των ερευνητικών δραστηριοτήτων του Εργαστηρίου Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η παρουσίαση της πυρηνικής ενέργειας και η διερεύνηση της δυνατότητας προώθησης της για την παραγωγή ηλεκτρισμού στην Ελλάδα με τη χρήση πολυκριτηριακών μεθόδων.

Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής ήταν ο Καθηγητής κ. Ι. Ψαρράς, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεση αυτής και την δυνατότητα που μου δόθηκε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής Χαράλαμπο Παππά, υποψήφιο διδάκτορα, για την πολύτιμη υποστήριξη και την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω την παρούσα εργασία στην μνήμη του Ιωάννη Ραφαήλ Ευλογημένου.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013

Λούκα Παναγιώτα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαρκής αύξηση των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών, η ανησυχία για τα εναπομείναντα αποθέματα ορυκτών καυσίμων, η κλιμάκωση της κλιματικής αλλαγής και των επιπτώσεων του φαινομένου του θερμοκηπίου αποτελούν τα κύρια στοιχεία που συνθέτουν το σύγχρονο ενεργειακό τοπίο και προβάλλουν ως επιτακτική την ανάγκη εξεύρεσης νέων καθαρότερων κι αποδοτικότερων πηγών ενέργειας. Στα πλαίσια αυτά, τα τελευταία χρόνια εντείνονται διαρκώς οι προσπάθειες εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως ο ήλιος, ο άνεμος, το νερό και η γεωθερμία αλλά και η αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας για την κάλυψη των παγκόσμιων αναγκών.

Η πυρηνική ενέργεια είναι μια υποσχόμενη εν δυνάμει λύση για το ενεργειακό αδιέξοδο στο οποίο φαίνονται να οδηγούνται οι σύγχρονες κοινωνίες. Η χρήση της στην ηλεκτροπαραγωγή κερδίζει όλο και περισσότερους υποστηρικτές αλλά ταυτόχρονα εγείρει και μεγάλη ανησυχία για τους κινδύνους που μπορεί να εγκυμονεί ένα τέτοιο ενδεχόμενο.

Στα πλαίσια αυτά η παρούσα διπλωματική έχει ως στόχο την παρουσίαση της πυρηνικής ενέργειας και τη διερεύνηση της δυνατότητας προώθησής της ως μέσο ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα. Αρχικά, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας της πυρηνικής τεχνολογίας και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που σχετίζονται με τη χρήση της στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Κατόπιν, αναλύονται οι σημαντικότερες μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης που εφαρμόζονται στη λήψη αποφάσεων σε θέματα ενεργειακού σχεδιασμού. Τρεις εξ αυτών (οι AHP, TOPSIS και PROMETHEE) επιλέχθηκαν προκειμένου να αξιολογηθεί η δυνατότητα χρήσης των πυρηνικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής σε σχέση με τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται ήδη στη χώρα μας (λιγνίτης, φυσικό αέριο, πετρέλαιο, υδροηλεκτρισμός) σε περίπτωση μελλοντικής αναβάθμισης της δυναμικότητας παραγωγής φορτίου βάσης.

Για την υλοποίηση της εφαρμογής, ορίστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια έπειτα από βιβλιογραφική ανασκόπηση. Για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων κάθε μεθόδου, τα κριτήρια καθώς και οι αποδόσεις και τα βάρη αυτών θεωρήθηκαν κοινά για όλες τις μεθόδους. Με βάση τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, τα αποτελέσματα των πολυκριτηριακών μεθόδων έδειξαν μεγάλο βαθμό συμφωνίας στην ιεράρχηση των ενεργειακών επιλογών και κατέδειξαν ότι η πυρηνική ενέργεια αποτελεί συγκρίσιμη εναλλακτική επιλογή σε περίπτωση αναθεώρησης της ενεργειακής πολιτικής.

Λέξεις Κλειδιά:

Πυρηνική ενέργεια, Ενεργειακός Σχεδιασμός, Πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης αποφάσεων

ABSTRACT

The constantly increasing demands for energy, the concerns about the remaining reserves of fossil fuels, the escalation of climate's change and of the effects of global warming are the main elements that compose the modern energy landscape and indicate that the necessity of finding new, cleaner and more efficient energy sources is crucial. In this context, the past few years constantly intensifying efforts not only for the exploitation of renewable energy sources, such as sun, wind, water and geothermal energy but also for the utilization of nuclear energy to meet the world's needs are being made.

Nuclear energy is a promising potential solution to the energy impasse that modern societies seem to confront. Its use in electricity generation is gaining more and more supporters but it also raises great concern about the risks that can be posed by such a possibility.

In this framework, the present thesis has as aim the presentation of nuclear energy and the investigation of its aspects for the establishment of a dominant role as a backbone technology for electric power production. At first place, the basic principles of nuclear technology and the advantages and disadvantages associated with its use in electricity generation are presented. Furthermore, this essay includes an extensive description of the most important methods for MCA applied to decision-making on energy planning. Three of them (AHP, TOPSIS and PROMETHEE) were selected to evaluate the possibility of establishing a new nuclear power plant compared with the case of using conventional technologies (such as lignite , natural gas , oil , hydroelectricity) in case of a future upgrade in the capacity of electricity production for base load demands in Greece.

For the implementation of the application, technical, economical, environmental and social criteria have been defined and used based on extensive bibliographic review. In order to compare each method's results, the criteria, the weight matrix and the scores of the alternatives were common for all methods. Based on the data applied, the results of multicriteria methods showed a large degree of agreement on the hierarchy of energy choices and showed that nuclear energy is a comparable alternative in case of revision of energy planning.

Key Words:

Nuclear energy, Energy Planning, Multi Criteria Decision Making Analysis

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο και στόχος διπλωματικής.....	13
1.2 Φάσεις.....	13
1.3 Δομή τεύχους διπλωματικής εργασίας.....	14

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΓΧΡΟΝΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΤΟΠΙΟ

2.1 Διαχρονική εξέλιξη των ενεργειακών αναγκών	17
2.2 Το ενεργειακό πρόβλημα	18
2.3 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου	20
2.4 Το ενεργειακό τοπίο σήμερα.....	22
2.5 Ηλεκτροπαραγωγή	23
2.6 Η πυρηνική ενέργεια στην ηλεκτροπαραγωγή σήμερα.....	28
2.7 Η Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα.....	32
2.7.1 Ηλεκτροπαραγωγή από λιγνίτη	34
2.7.2 Ηλεκτροπαραγωγή από Φυσικό Αέριο	35
2.7.3 Ηλεκτροπαραγωγή από υδροηλεκτρικούς σταθμούς (ΥΗΣ).....	36
2.7.4 Ηλεκτροπαραγωγή από πετρελαϊκούς σταθμούς	37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

3.1 Βασικά στοιχεία πυρηνικής φυσικής.....	39
3.1.1 Άτομο και πυρήνας	39
3.1.2 Πυρηνικές αντιδράσεις	40
3.2 Βασικές αρχές λειτουργίας πυρηνικών τεχνολογιών	42
3.2.1 Αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης.....	42
3.2.2 Πυρηνικά καύσιμα	43
3.2.3 Η πρώτη ύλη: το ουράνιο	45
3.2.4 Βασική δομή και λειτουργία πυρηνικού αντιδραστήρα.....	47
3.2.5 Ηλεκτροπαραγωγή από πυρηνικούς σταθμούς	51
3.3 Εξέλιξη πυρηνικών τεχνολογιών.....	52
3.3.1 Εισαγωγή	52
3.3.2 Εξέλιξη πυρηνικών αντιδραστήρων	53
3.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά πυρηνικών αντιδραστήρων	55
3.4.1 Αντιδραστήρες Ελαφρού Ύδατος.....	55
3.4.1.1 Αντιδραστήρες Πεπιεσμένου Ύδατος.....	55
3.4.1.2 Αντιδραστήρες Ζέοντος Ύδατος	56
3.4.1.3 Προηγμένοι Αντιδραστήρες Ελαφρού Ύδατος.....	58

3.4.2 Αντιδραστήρες Βαρέως Ύδατος	59
3.4.2.1 CANDU	59
3.4.3 Αεριοψυκτοι Αντιδραστήρες.....	62
3.4.3.1 Αντιδραστήρες Γραφίτη – Αερίου	62
3.4.3.2 Αεριοψυκτοι Αντιδραστήρες Βαρέως Ύδατος.....	63
3.4.3.3 Προηγμένοι Αεριοψυκτοι Αντιδραστήρες	64
3.4.3.4 Αεριοψυκτοι Αντιδραστήρες Υψηλής Θερμοκρασίας	65
3.4.4 Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες	67
3.4.4.1 Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων υγρού-μετάλλου.....	68
3.4.4.2 Αναπαραγωγικοί αεριοψυκτοι αντιδραστήρες	68
3.4.4.3 Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες τετηγμένων αλάτων.....	69
3.4.4.4 Αναπαραγωγικοί Αντιδραστήρες Ελαφρού Ύδατος (Light Water Breeder Reactors).....	70
3.4.5 Πυρηνικοί Αντιδραστήρες Σύντηξης	71
3.5 Ασφάλεια Πυρηνικών Αντιδραστήρων.....	71
3.6 Διαχείριση Ραδιενεργών Καταλοίπων.....	76
3.7 Τεχνοοικονομικά Στοιχεία Πυρηνικών Σταθμών	78
3.7.1 Χωροθέτηση Πυρηνικού Σταθμού	79
3.7.2 Κατασκευή Πυρηνικού Σταθμού	79
3.7.3 Οικονομική Αξιολόγηση Πυρηνικού Σταθμού	81
3.7.4 Παροπλισμός Πυρηνικού Σταθμού	82
3.8 Πλεονεκτήματα Χρήσης της Πυρηνικής Ενέργειας	83
3.9 Τα αρνητικά σημεία της πυρηνικής ανάπτυξης	86
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΕΠΙΛΟΓΩΝ</u>	
4.1 Πολυκριτηριακές μέθοδοι ανάλυσης αποφάσεων	89
4.2 Μέθοδος MAUT (Multi- Attribute Utility Theory)	90
4.3 Αναλυτική ιεραρχική διαδικασία (Analytical Hierarchy Process).....	90
4.4 Προτίμηση που ταξινομεί τη μέθοδο οργάνωσης για την αξιολόγηση εμπλουτισμού (PROMETHEE)	91
4.5 Ο συσχετισμός μετάφρασης αποβολών και επιλογής (ELECTRE)	93
4.5.1 Μέθοδος ELECTRE I.....	94
4.5.2 Μέθοδος ELECTRE II.....	94
4.5.3 Μέθοδος ELECTRE III.....	95
4.5.4 Μέθοδος ELECTRE IV.....	97
4.5.5 Μέθοδος ELECTRE TRI.....	98
4.6 Η μέθοδος TOPSIS.....	99
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ</u>	
5.1 Επιλογή μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης.....	101

5.2 Εξεταζόμενες εναλλακτικές	101
5.3 Επιλογή κριτηρίων	102
5.4 Πίνακες βαρών κι αποδόσεων.....	104
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ</u>	
6.1 Εφαρμογή πολυκριτηριακής μεθόδου ΑΗΡ	107
6.2 Εφαρμογή πολυκριτηριακής μεθόδου PROMETHEE.....	107
6.3 Εφαρμογή πολυκριτηριακής μεθόδου TOPSIS.....	109
6.4 Σύγκριση μεθόδων – Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	109
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ</u>	
7.1 Συμπεράσματα	112
7.2 Προοπτικές.....	112
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	114

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο και στόχος διπλωματικής

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η εξέταση της δυνατότητας προώθησης της πυρηνικής ενέργειας με τη χρήση μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης. Στόχος είναι η αντικειμενική εκτίμηση των προοπτικών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικούς σταθμούς στην Ελλάδα, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο το ενεργειακό τοπίο σήμερα αλλά και το ευρύτερο θεσμικό, κοινωνικό, οικονομικό, τεχνολογικό και πολιτικό πλαίσιο που το περικλείει.

Για το σκοπό αυτό παρουσιάζεται συνοπτικά η παγκόσμια αγορά ενέργειας έτσι όπως έχει διαμορφωθεί τα τελευταία χρόνια και το οικονομικό- πολιτικό πλαίσιο που την καθορίζει. Ειδική αναφορά γίνεται στην κατάσταση και τον ενεργειακό σχεδιασμό της Ελλάδας. Αναλύεται το εγχώριο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής κι επισημαίνονται τα βασικά στοιχεία των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για αυτήν σήμερα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι νέες πυρηνικές τεχνολογίες που είναι πλέον διαθέσιμες και χρησιμοποιούνται σε πυρηνικούς σταθμούς, καθώς και η ιστορική τους εξέλιξη. Αναλύεται η λειτουργία ενός πυρηνικού σταθμού, από την κατασκευή έως και την απεγκατάσταση του και οι οικονομικές, κοινωνικές και πολιτικές παράμετροι που την πλαισιώνουν. Εξετάζονται τα οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή των νέων τεχνολογικών επιτευγμάτων αλλά και οι κίνδυνοι που εξακολουθούν να ελλοχεύουν στην πυρηνική ανάπτυξη και οι δυσκολίες στην υλοποίηση της.

Ακολούθως παρουσιάζονται οι σημαντικότερες πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης αποφάσεων που χρησιμοποιούνται ευρέως στον ενεργειακό σχεδιασμό. Επιλέγοντας τρεις από αυτές, τις AHP, PROMETHEE και TOPSIS, υλοποιήθηκε μια πολυκριτηριακή εφαρμογή για την αξιολόγηση της δυνατότητας χρήσης πυρηνικών εργοστασίων ως μονάδες βάσης για ένα μέρος του φορτίου. 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.

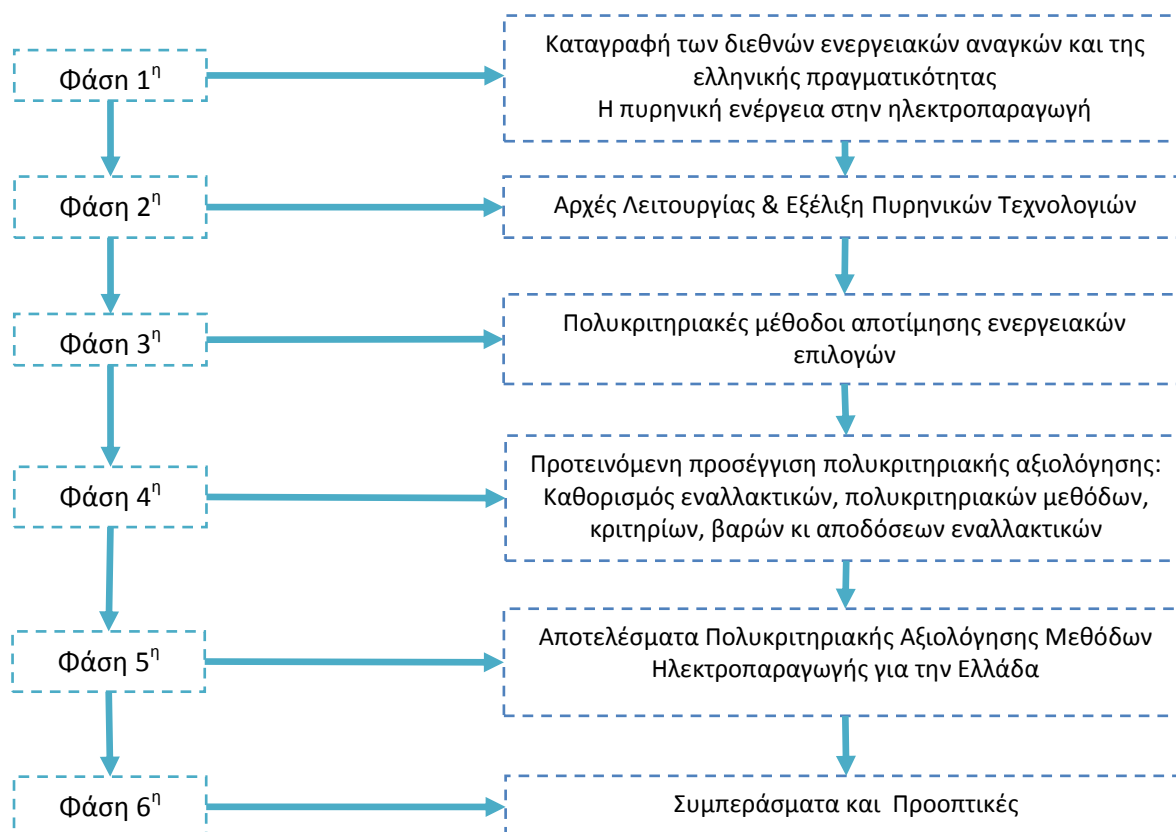
1.2 Φάσεις

Η εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε μεταξύ Μαρτίου και Δεκεμβρίου 2013 και η υλοποίηση της ακολούθησε τις φάσεις που παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί.

Αρχικά, έπειτα από εκτενή μελέτη στατιστικών στοιχείων διεθνών οργανισμών έγινε σύνθεση του ενεργειακού χάρτη όπως διαμορφώνεται σήμερα και των τάσεων που επικρατούν. Ειδική αναφορά έγινε στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και το ρόλο που παίζει η πυρηνική ενέργεια σε αυτό τον τομέα. Παρουσιάζεται η διάρθρωση της ελληνικής ηλεκτροπαραγωγής και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σήμερα για την κάλυψη του βασικού φορτίου στην Ελλάδα. Ακολούθησε εκτενής βιβλιογραφική έρευνα για την παρουσίαση και ανάλυση των βασικών αρχών λειτουργίας των πυρηνικών τεχνολογιών και των σημαντικότερων τύπων πυρηνικών αντιδραστήρων. Η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε πυρηνικούς σταθμούς, από τον κύκλο καυσίμου έως και τη διαχείριση των αποβλήτων παρουσιάζεται αναλυτικά. Επίσης, γίνεται αναφορά στα

οικονομοτεχνικά χαρακτηριστικά των πυρηνικών εργοστασίων και διερευνώνται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης της πυρηνικής ενέργειας.

Αναλύονται εν συνεχεία οι πιο κοινές μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης που χρησιμοποιούνται ως αρωγή στη χάραξη ενεργειακής πολιτικής. Με επιλογή και χρήση ορισμένων εξ αυτών πραγματοποιείται ακολούθως αξιολόγηση της βιωσιμότητας της πυρηνικής ενέργειας ως μέσο ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα. Για την αξιολόγηση επιλέγονται υπάρχουσες εγχώριες τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής προς σύγκριση και θεωρούνται κοινά κριτήρια και αποδόσεις για όλες τις μεθόδους. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, από τα οποία προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα.



1.3 Δομή τεύχους διπλωματικής εργασίας

Αρχικά γίνεται μια σύντομη περίληψη της διπλωματικής εργασίας, όπου παρουσιάζονται τα βασικά σημεία της. Ακολουθεί ο πρόλογος, ο πίνακας περιεχομένων και τέλος το κύριο περιεχόμενο της διπλωματικής εργασίας, δομημένο σε επτά κεφάλαια. Το περιεχόμενο κάθε κεφαλαίου παρουσιάζεται συνοπτικά στην παρούσα ενότητα.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Πρόκειται για το παρόν κεφάλαιο όπου παρουσιάζεται ο σκοπός, οι φάσεις εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας και το περιεχόμενο κάθε κεφαλαίου.

Κεφάλαιο 2: Σύγχρονο ενεργειακό τοπίο

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο παγκόσμιος ενεργειακός χάρτης σήμερα με

ιδιαίτερα έμφαση στα στοιχεία που αναφέρονται στην ηλεκτροπαραγωγή. Αναλύονται οι σύγχρονες τάσεις και οι παράμετροι που καθορίζουν τον ενεργειακό προγραμματισμό σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο. Ειδικά όσο αφορά την Ελλάδα, καταγράφεται η δομή και ο προγραμματισμός της εγχώριας ηλεκτροπαραγωγής και οι βασικές αρχές λειτουργίας των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται.

Κεφάλαιο 3: Εισαγωγή στις πυρηνικές τεχνολογίες

Εδώ αναλύονται βασικά στοιχεία πυρηνικής φυσικής και οι κύριες αρχές λειτουργίας της πυρηνικής τεχνολογίας. Γίνεται αναφορά στη δομή, τη λειτουργία και τη διαχρονική εξέλιξη των πυρηνικών αντιδραστήρων και παρουσιάζεται η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρισμού σε πυρηνικά εργοστάσια. Επίσης, αναλύονται η διαδικασία κατασκευής, τα τεχνικά χαρακτηριστικά λειτουργίας, ο οικονομικός και κοινωνικός αντίκτυπος ενός πυρηνικού σταθμού. Γίνεται συνοπτική αναφορά στα σημαντικότερα πυρηνικά ατυχήματα και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης της πυρηνικής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρισμού.

Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογίες αποτίμησης ενεργειακών επιλογών

Αναφέρονται οι μέθοδοι πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων που χρησιμοποιούνται στον ενεργειακό σχεδιασμό και αναλύονται οι σημαντικότερες εξ αυτών. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι μέθοδοι MAUT, AHP, PROMETHEE, ELECTRE και TOPSIS.

Κεφάλαιο 5: Προτεινόμενη Προσέγγιση

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στην εφαρμογή των πολυκριτηριακών μεθόδων που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας με στόχο τη σύγκριση των βασικών μεθόδων ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούνται σήμερα στην Ελλάδα με την παραγωγή από πυρηνικούς σταθμούς. Αναλυτικότερα, τεκμηριώνεται η επιλογή των μεθόδων AHP, PROMETHEE και TOPSIS, ορίζονται τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τα βάρη αυτών και περιγράφεται η προσέγγιση υλοποίησης των παραπάνω μεθόδων.

Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Εφαρμογής

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής εφαρμογής. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η κατάταξη των τεχνολογιών με βάση κάθε μέθοδο και γίνεται μια συνολική αποτίμηση των αποτελεσμάτων, καθώς και σύγκριση αυτών μεταξύ τους.

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και Προοπτικές

Στην ενότητα αυτή, συνοψίζονται τα κύρια σημεία της εργασίας και παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα της παρούσας ανάλυσης. Τέλος, γίνεται μια σύντομη αξιολόγηση της δυνατότητας και των προοπτικών προώθησης της πυρηνικής ενέργειας ως μέσο ηλεκτροπαραγωγής στη χώρα μας.

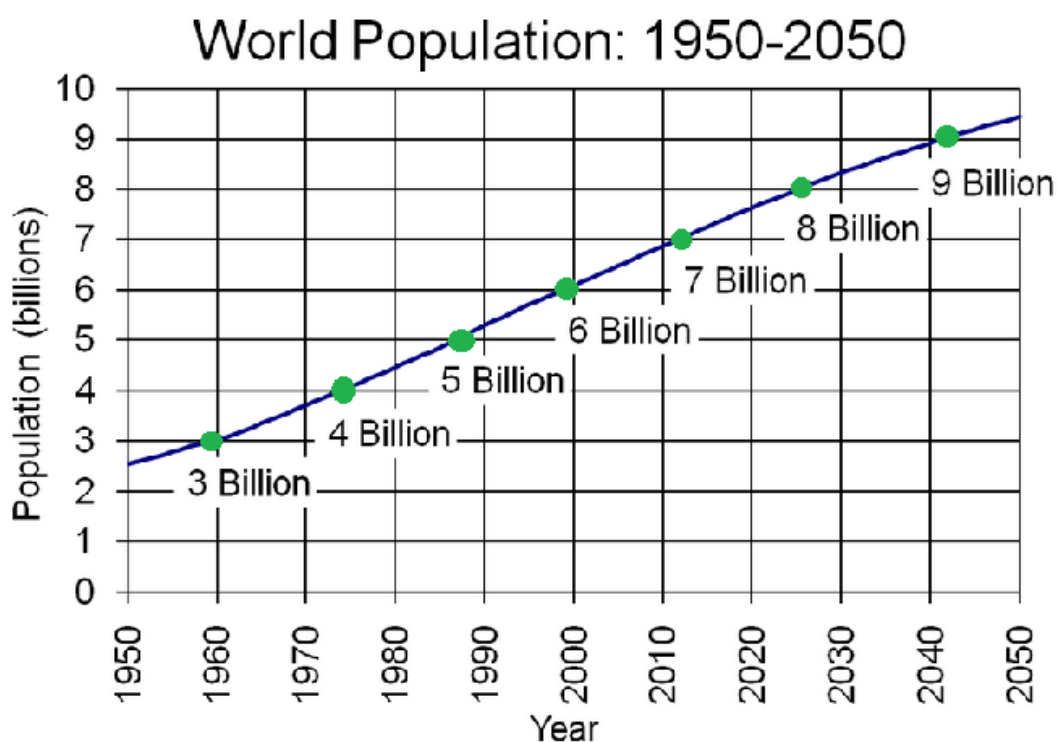
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΣΥΓΧΡΟΝΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΤΟΠΙΟ

2.1 Διαχρονική εξέλιξη των ενεργειακών αναγκών

Η εξέλιξη των ανθρώπινων κοινωνιών είναι στενά συνδεδεμένη με τη χρήση της ενέργειας. Δεν είναι τυχαίο άλλωστε πως ολόκληρες ιστορικές περιόδους της ανθρωπότητας, λίθινη εποχή, εποχή του σιδήρου ή του χαλκού, χαρακτηρίστηκαν από τη δυνατότητα των ανθρώπων να διαχειρίζονται διαφορετικές μορφές ενέργειας. Από τα αρχαία χρόνια μέχρι την πρώτη ατμομηχανή του 18^{ου} αιώνα και τη βιομηχανική επανάσταση, οι προσπάθειες για αποδοτικότερη εκμετάλλευση των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων και την παραγωγή ωφέλιμης ενέργειας ήταν συνεχείς. Ειδικά, στις μέρες μας η ανάπτυξη και η ευημερία κάθε κοινωνίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την εξασφάλιση των απαραίτητων πόρων και την παραγωγή επαρκούς ενέργειας για την κάλυψη των συνεχώς αυξανόμενων αναγκών.

Η διαχρονική μεταβολή της ενέργειας που καταναλώνεται συνδέεται στενά με τη μεταβολή του παγκόσμιου πληθυσμού. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 1, ο πληθυσμός αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς τα τελευταία χρόνια και αναμένεται να ξεπεράσει τα 9 δις πριν το 2050. Η μεταβολή αυτή είναι ασύμμετρη και σημειώνεται κυρίως σε αναπτυσσόμενες περιοχές, οξύνοντας τις ήδη υπάρχουσες αντιθέσεις στην ανισοκατανομή του πλούτου και την κατανάλωση ενέργειας [1].



Εικόνα 1: Μεταβολή του παγκόσμιου πληθυσμού [2]

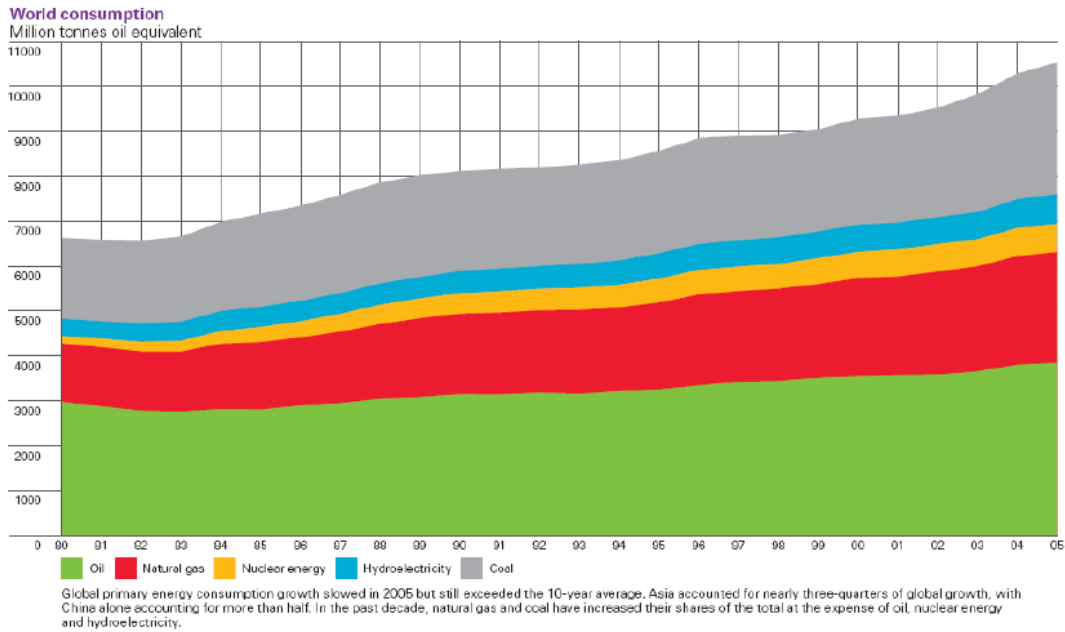
Εντυπωσιακά είναι τα στατιστικά στοιχεία για την διαχρονική μεταβολή της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας διεθνώς. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα (Εικόνα 2), οι παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες παρουσιάζουν σταθερά αυξητικές τάσεις από το 1980 μέχρι και το 2004, ενώ οι προβλέψεις για τα επόμενα χρόνια υποδεικνύουν πως μέχρι το 2030 θα υπάρξει αύξηση 63% [3].



Εικόνα 2: Παγκόσμια Κατανάλωση Ενέργειας 1980 – 2030 [3]

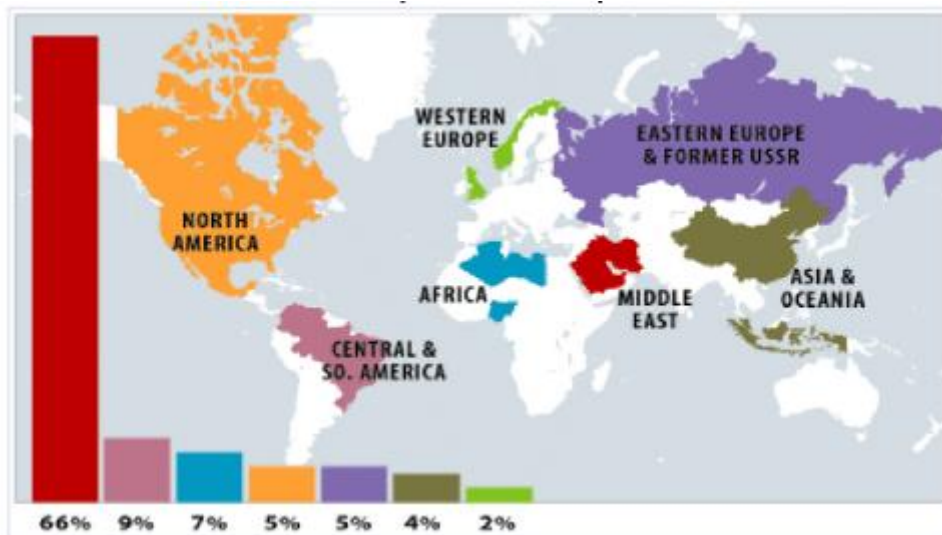
2.2 Το ενεργειακό πρόβλημα

Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία, γίνεται αντιληπτό πως οι παγκόσμιες απαιτήσεις για ωφέλιμη ενέργεια γιγαντώνονται διαρκώς όσο εντείνονται η ανάπτυξη και η πρόοδος των ανθρώπινων κοινωνιών. Παρ' όλα αυτά, οι πιο ευρέως διαδεδομένες πηγές ενέργειας (Εικόνα 3) στην πλειοψηφία τους δεν ανανεώνονται ή αναπληρώνονται εξαιρετικά αργά για τα ανθρώπινα μέτρα από φυσικές διαδικασίες. Η στενή αυτή συσχέτιση μεταξύ της ζήτησης ενέργειας για κατανάλωση που διαρκώς αυξάνεται με τα ενεργειακά αποθέματα που διαρκώς μειώνονται αποτελεί και την ουσία του ενεργειακού προβλήματος. Πρόσφατη καταγραφή των επιπέδων παραγωγής και κατανάλωσης γαιάνθρακα που έγινε το 2006 υποδεικνύει πως τα παγκόσμια αποθέματα επαρκούν για τα επόμενα 164 χρόνια [4]. Σε αντιδιαστολή, τα αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου επαρκούν μόλις για τα επόμενα 41 και 67 χρόνια αντίστοιχα [4].



Εικόνα 3: Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας [5]

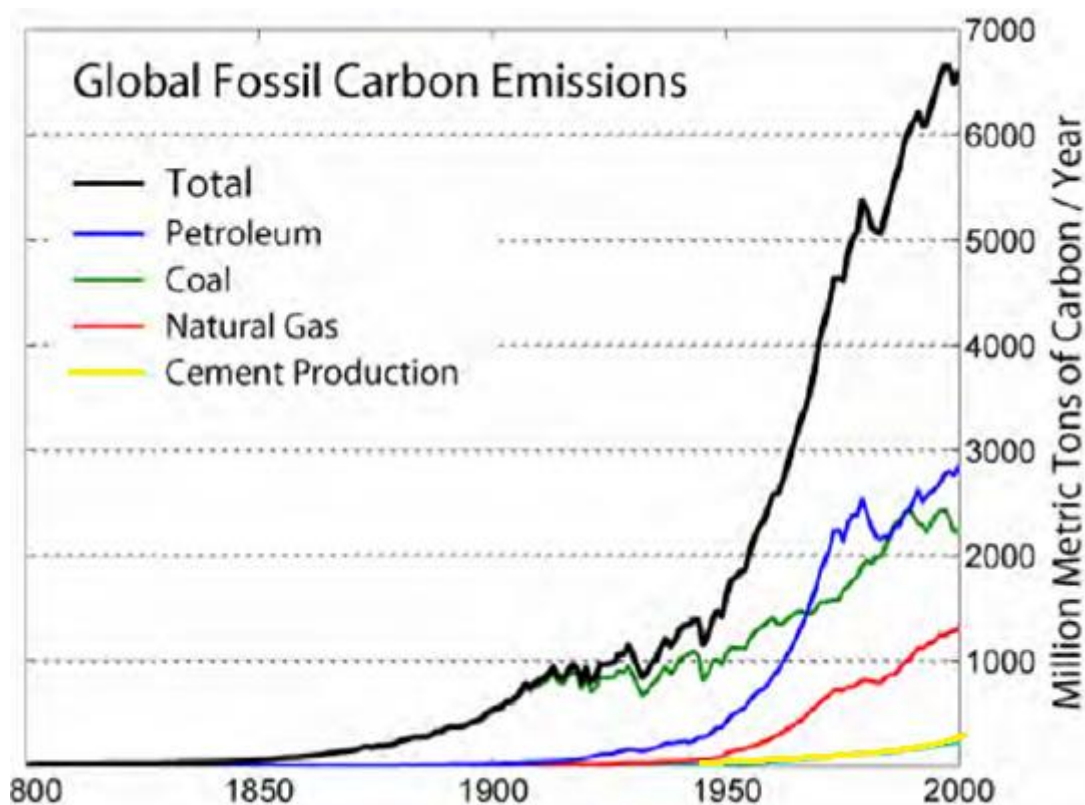
Πέραν, βέβαια, του πεπερασμένου των ορυκτών καυσίμων δε θα πρέπει κανείς να παραλείψει και την μεγάλη εξάρτηση από τις χώρες όπου υπάρχουν διαθέσιμα κοιτάσματα (εικόνα 4) ως αποτέλεσμα της χρήσης ορυκτών καυσίμων ως κύρια πηγή ενέργειας. Αν μάλιστα, ληφθεί υπόψη η ανισοκατανομή του ορυκτού πλούτου (ενδεικτικά αναφέρεται πως το 66% των κοιτασμάτων αργού πετρελαίου βρίσκονται στη Μέση Ανατολή ενώ η Ρωσία ελέγχει το 1/4 σχεδόν της παγκόσμιας παραγωγής φυσικού αερίου) και η πολιτική αστάθεια που επικρατεί στις περιοχές με την υψηλότερη παραγωγή, το ενδεχόμενο της “ομηρίας” από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παίρνει ανησυχητικές διαστάσεις.



Εικόνα 4: Κατανομή των Αποθεμάτων Πετρελαίου [4]

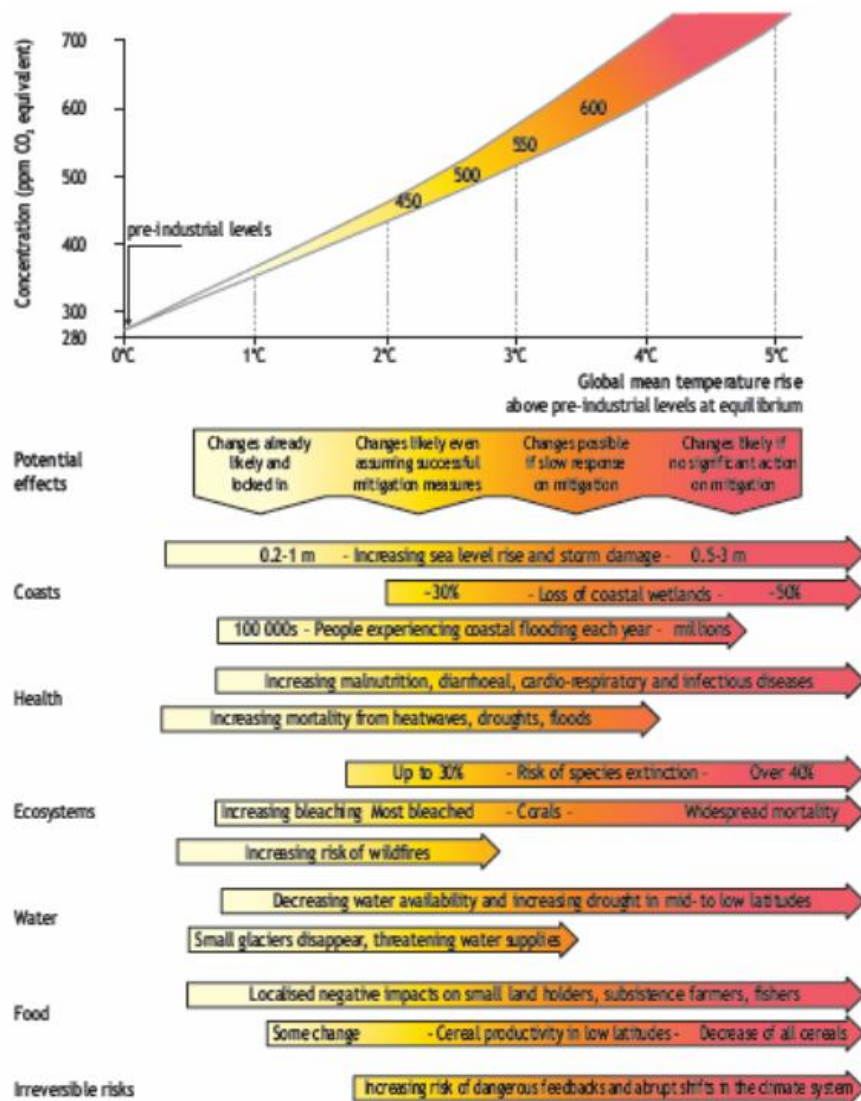
2.3 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

Εκτός από το ενεργειακό πρόβλημα, ένα πολύ σημαντικό κομμάτι που συμπληρώνει το ενεργειακό τοπίο σήμερα είναι οι ανησυχίες για τη μόλυνση του περιβάλλοντος και την έκταση που έχει λάβει το φαινόμενο του θερμοκηπίου.



Εικόνα 5: Διαχρονική Εξέλιξη Εκπομπών CO₂ από την καύση ορυκτών καυσίμων σε παγκόσμιο επίπεδο [6]

Οι διαρκώς διογκούμενες ενεργειακές ανάγκες σε παγκόσμιο επίπεδο απαιτούν την καύση τεράστιων ποσοτήτων ορυκτών καυσίμων με αποτέλεσμα την έκλυση μεγάλων ποσοτήτων αερίων του θερμοκηπίου, δηλαδή CO₂ (το οποίο είναι υπεύθυνο για το 82% της συνολικής επίδρασης στην κλιματική αλλαγή [7]) και άλλων αερίων όπως μεθανίου, υποξειδίου του αζώτου κ.ο.κ. Αποτέλεσμα της αύξησης των συγκεντρώσεων των αερίων αυτών στη γήινη ατμόσφαιρα είναι η θερμική ενέργεια να εγκλωβίζεται μέσα σε αυτή και η θερμοκρασία του πλανήτη να αυξάνεται διαρκώς. Ως απόρροια του φαινομένου αυτού οι κλιματικές συνθήκες σε παγκόσμιο επίπεδο έχουν διαφοροποιηθεί δραματικά τα τελευταία χρόνια, μεγάλες εκτάσεις έχουν ερημοποιηθεί, ακραία καιρικά φαινόμενα καταγράφονται όλο και συχνότερα και οι ανησυχίες για το λιώσιμο των πάγων, τη μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα, την άνοδο του επιπέδου της θάλασσας και τον καταποντισμό παράκτιων περιοχών μοιάζουν μάλλον μικρές σε σχέση με την εν δυνάμει έκταση των επιπτώσεων του προβλήματος. Η χρονική υστέρηση με την οποία εμφανίζονται τα αποτελέσματα του φαινομένου δυσχεραίνει, άλλωστε, σημαντικά την πρόβλεψη του πραγματικού μεγέθους του κινδύνου.



Εικόνα 6: Πιθανές επιπτώσεις για διαφορετικά επίπεδα συγκέντρωσης CO₂ [8]

Αναγνωρίζοντας την κρισιμότητα της κατάστασης και των ανθρωπογενών αιτιών της, η παγκόσμια κοινότητα προχώρησε σε μια σειρά μέτρων για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Το σημαντικότερο βήμα, στην προσπάθεια αυτή, ήταν η υπογραφή του πρωτοκόλλου του Κιότο. Σύμφωνα με τα όσα προβλέπονται σε αυτό, τα συμβαλλόμενα κράτη δεσμεύονται, ανάλογα με το επίπεδο της οικονομικής τους ανάπτυξης, να ελαττώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου την πρώτη περίοδο ανάληψης υποχρεώσεων (2008-2012) κατά ένα συγκεκριμένο στόχο σε σχέση με τις εκπομπές του 1990 (ή του 1995 για ορισμένα αέρια). Για την επίτευξη αυτού του στόχου, το Πρωτόκολλο του Κιότου ορίζει τρεις ευέλικτους μηχανισμούς στήριξης:

- Μηχανισμός Καθαρής Ανάπτυξης – Clean Development Mechanism CDM
- Προγράμματα από Κοινού - Joint Implementation JI
- Εμπορία Εκπομπών Δικαιωμάτων - International Emissions Trading IET

Είδος καυσίμου	Κατώτερη θερμογόνος δύναμη (TJ/kt)	Περιεχόμενος άνθρακας (tC/TJ)	Αποτελεσματικότητα καύσης (%)	Συντελεστής εκπομπής (tCO ₂ /TJ)
Υγρά καύσιμα				
Υγραέριο κίνησης	47,31	17,2	99,0	62,44
Βενζίνη	44,80	18,9	99,0	68,61
Καύσιμα αεροπορίας	44,60	19,5	99,0	70,79
Κηροζίνη	44,75	19,6	99,0	71,15
Ντίζελ	43,33	20,2	99,0	73,33
Μαζούτ	40,19	21,1	99,0	76,59
Νάφθα	45,01	20,0	99,0	72,60
Πετρελαϊκός άνθρακας	31,00	27,5	99,0	99,83
Άλλα προϊόντα	40,19	20,0	99,0	72,60
Στερεά καύσιμα				
Λιθάνθρακας	27,21	25,8	98,0	92,71
Λιγνίτης				
Παραγωγή ηλεκτρισμού		34,0	98,0	122,17
Λοιποί τομείς		27,6	98,0	99,18
Μεταλλουργικό κωκ	29,31	29,5	98,0	106,00
Μπρικέτες / Ξηρός λιγνίτης	15,28	25,8	99,0	93,65
Αέρια καύσιμα				
Φυσικό αέριο – Εγχώρια παραγωγή		16,1	99,5	58,74
Φυσικό αέριο – Εισαγωγές		15,3	99,5	55,82
Αέριο πόλης		15,3	99,5	55,82

Πίνακας 1: Συντελεστής Εκπομπών CO₂ ορυκτών καυσίμων [8]

Ο τρίτος μηχανισμός στήριξης επιτρέπει σε χώρες που δεν έχουν δεσμευτεί για τις εκπομπές τους να πουλήσουν ένα μέρος των δικαιωμάτων τους στις χώρες που έχουν δεσμευτεί να πετύχουν μείωση των εκπομπών τους. Κύρια πηγή εκπομπής CO₂ αποτελεί η ηλεκτροπαραγωγή από θερμικούς σταθμούς, καθώς από τα 30 δις τόνων CO₂ που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα τα 2/3 προέρχονται από την καύση ορυκτών καυσίμων. Ο συντελεστής εκπομπών κάθε καυσίμου παρουσιάζεται στον πίνακα 1. Έτσι, δημιουργείται σύμφωνα με τις ρήτρες του Πρωτοκόλλου του Κιότου κι ένα επιπλέον, έμμεσο, κόστος παραγωγής από την εμπορία των δικαιωμάτων εκπομπής CO₂. Το επιπρόσθετο αυτό κόστος δίνει ένα ακόμη κίνητρο για τη στροφή σε μη συμβατικές πηγές ενέργειας.

2.4 Το ενεργειακό τοπίο σήμερα

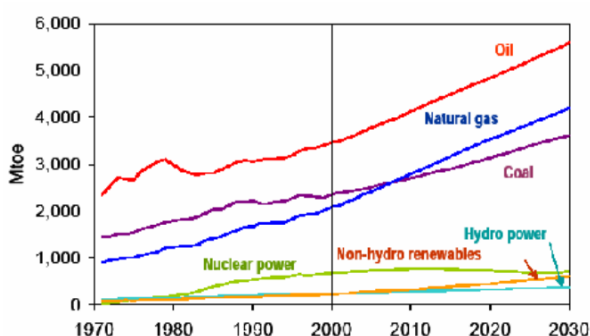
Στις μέρες μας η ανάγκη χάραξης ενός οργανωμένου πλάνου για την αποτελεσματική και “οικολογική” αξιοποίηση των πεπερασμένων διαθέσιμων ενεργειακών πόρων και την εξεύρεση νέων, πιο αποδοτικών, μακροβιότερων και φιλικότερων προς το περιβάλλον προβάλλει επιτακτικότερη από ποτέ άλλοτε. Η απαγκίστρωση, ωστόσο, από τα συμβατικά καύσιμα αποδεικνύεται μια πολύ αργή και δύσκολη διαδικασία. Από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, άλλωστε, η πρόοδος και η δομή του σύγχρονου κόσμου στηρίχθηκε στην αξιοποίηση των ορυκτών καυσίμων και κυρίως στο πετρέλαιο. Η τιμή του αποτελεί ρυθμιστικό παράγοντα της παγκόσμιας οικονομίας, καθορίζει τις πολιτικές εξελίξεις και γεννά ακόμη και πολέμους. Έτσι, παρά τις διεθνείς προσπάθειες που γίνονται ήδη από τις πρώτες ενεργειακές κρίσεις του 1970, η εξάρτηση του σύγχρονου κόσμου από τα

συμβατικά καύσιμα παραμένει μεγάλη. Όπως δείχνει και η εικόνα 7 το πετρέλαιο εξακολουθεί να καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μερίδιο της παγκόσμιας κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας, με τις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να συγκεντρώνουν συνολικά σχεδόν το 80% της συνολικής κατανάλωσης [9].



Εικόνα 7: Παγκόσμια Κατανάλωση Πρωτογενούς Ενέργειας

Οι προβλέψεις, μάλιστα, για την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα στο μέλλον, όπως φαίνεται και στα διαγράμματα, υποδεικνύουν πως ενώ τόσο το ποσοστό που κατέχουν οι



Εικόνα 8: Πρόβλεψη για εξάρτηση από ορυκτά [8]

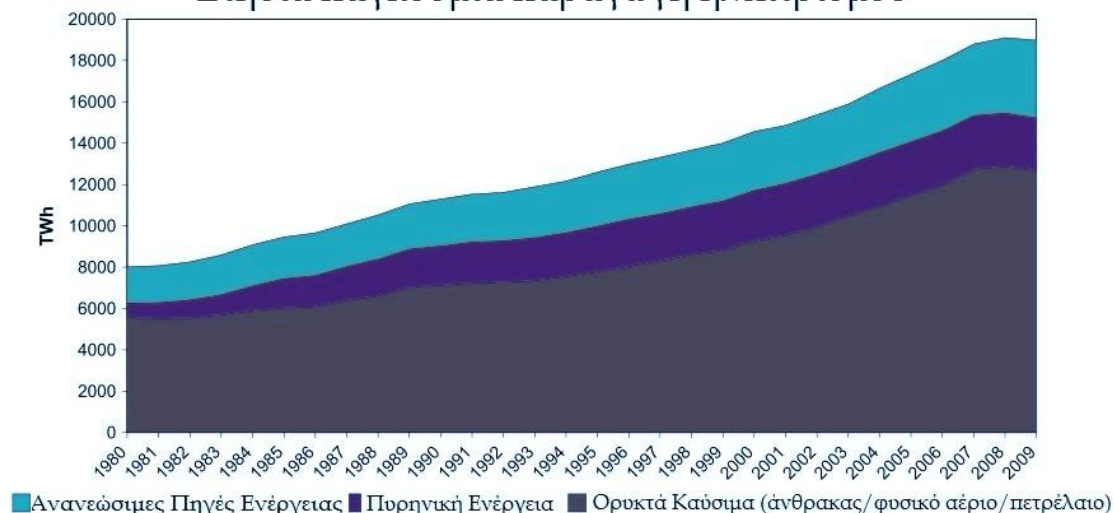
ανανεώσιμες πηγές όσο και οι απόλυτες τιμές της κατανάλωσης φυσικού αερίου αναμένεται να αυξηθούν, το πετρέλαιο θα συνεχίσει να κυριαρχεί μέχρι το 2030.

Επιπλέον, σύμφωνα με πρόσφατα στατιστικά στοιχεία, η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας αυξήθηκε πάνω από 3% το 2011 [9]. Τον ίδιο χρόνο, 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% (σημαντικά μικρότερη αύξηση από το εντυπωσιακό 7,1 % του 2010) [9].

2.5 Ηλεκτροπαραγωγή

Εστιάζοντας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, παρατηρούμε πως σύμφωνα με τα στοιχεία του International Energy Agency –IEA από το 1980 μέχρι το 2009 η ανακατανομή των μεριδίων που κατέχουν οι βασικές πηγές ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο πραγματοποιείται με αργούς αλλά σταθερούς ρυθμούς. [9]. Αν και τα ορυκτά καύσιμα εξακολουθούν να κατέχουν τη μερίδα του λέοντος, η πυρηνική ενέργεια έχει κατορθώσει να υπερτριπλασιάσει το δικό της μερίδιο, ενώ οι ανανεώσιμες πηγές κερδίζουν διαρκώς νέο έδαφος.

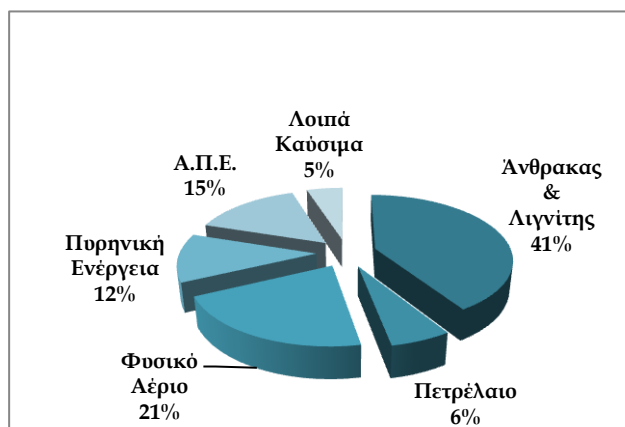
Ετήσια παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρισμού



Εικόνα 9: Ιστορική εξέλιξη της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά τύπο καυσίμου [9]

Σε αυτό το σημείο, επισημαίνεται η πολυπλοκότητα και η πολυσχιδία των παραγόντων που επηρεάζουν την αγορά ενέργειας και κατ' επέκταση και τη διάρθρωση της ηλεκτροπαραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, λ.χ. όπως υποδεικνύει και το διάγραμμα της εικόνας 9 στις αρχές του 2000 υπήρξε μια ελαφρά αύξηση της χρήσης του γαιάνθρακα, εξαιτίας της αύξησης της τιμής του φυσικού αερίου. Αν και η τάση αυτή υπήρξε παροδική και εγκαταλείφθηκε γρήγορα, είναι χαρακτηριστική για το πώς πολλοί αστάθμητοι παράγοντες, όπως η μεταβολή των τιμών, η διαθεσιμότητα του καυσίμου, ατυχήματα και άλλοι κοινωνικοί, πολιτικοί και οικονομικοί λόγοι μπορεί να επηρεάσουν παροδικά ή σε ορισμένες περιπτώσεις να αναστείλουν τον αρχικό σχεδιασμό. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, παρουσιάζονται τα στοιχεία που καταγράφηκαν από τους διεθνείς οργανισμούς στη διάρθρωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

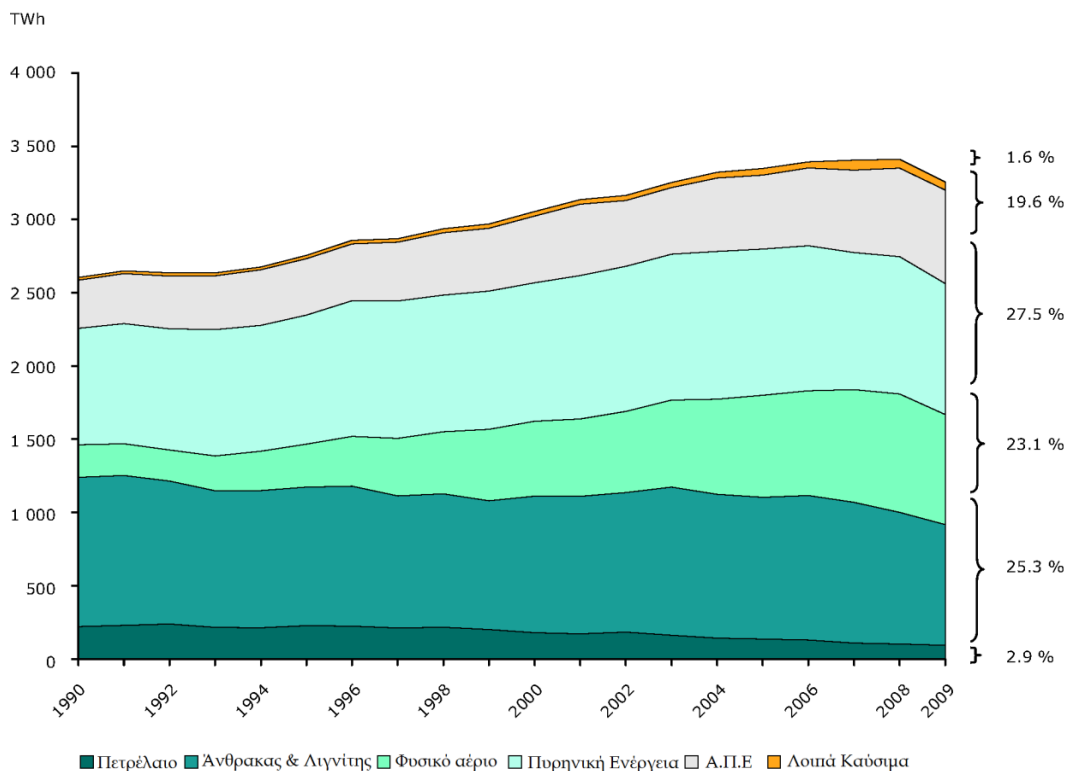
Πρόσφατα στατιστικά στοιχεία υποδεικνύουν πως στο τέλος του 2011 τα ορυκτά καύσιμα κατείχαν το 68% της παγκόσμιας ηλεκτροπαραγωγής, με τις ανανεώσιμες πηγές να ακολουθούν με το σημαντικό 15% και την πυρηνική ενέργεια να συμβάλλει με ποσοστό 12% στις 20.269 TWh που παρήχθησαν τη χρονιά εκείνη. Το υπόλοιπο 5% της παραγωγής προήλθε από λοιπές πηγές ενέργειας [9]. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) περιλαμβάνουν την παραγωγή που προέρχεται από χρήση βιομάζας και αστικών αποβλήτων, αιολική και ηλιακή ενέργεια, γεωθερμία και τα μικρά υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Τα λοιπά καύσιμα περιλαμβάνουν βιομηχανικά απόβλητα καθώς και την παραγωγή που προέρχεται από άντληση σε υδροηλεκτρικά εργοστάσια μεγαλύτερης ισχύος. Οι ΥΗΣ με εγκατεστημένη ισχύς μεγαλύτερη των 10 MW εξαιρούνται από τις ΑΠΕ καθώς απαιτούν εκτεταμένες επεμβάσεις στο φυσικό περιβάλλον (φράγματα κτλ) που αλλοιώνουν τη φυσική ιδιομορφία της περιοχής. Από την άλλη πλευρά, η διαχείριση των βιομηχανικών αποβλήτων μπορεί να προκαλέσει αυξημένη ατμοσφαιρική ρύπανση στην περιοχή και συνεπώς δε συμπεριλαμβάνεται στις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, όπως συμβαίνει με τα αστικά απόβλητα των οποίων η διαχείριση είναι ευκολότερη και λιγότερο επιβαρυντική για το περιβάλλον. Τέλος, όλα τα δεδομένα που παρουσιάζονται αφορούν τόσο τις δημόσιες επιχειρήσεις ηλεκτρισμού όσο και τους ιδιώτες παραγωγούς (μεταπώληση και ιδιοκατανάλωση).



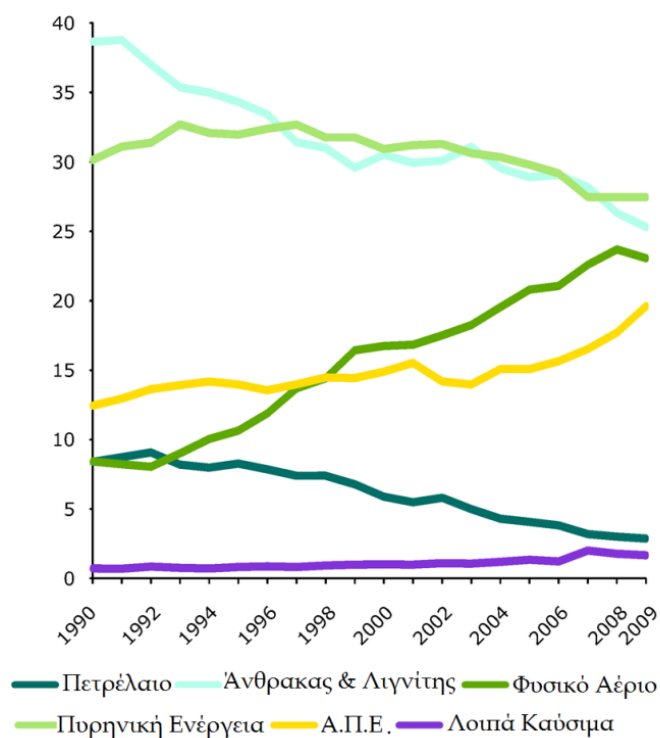
Εικόνα 10: Διάρθρωση της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρισμού ανά τύπο καυσίμου (2011) [10]

Όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις χώρες της Ευρώπης, η εικόνα δεν είναι πολύ διαφορετική. Σύμφωνα με πρόσφατα στατιστικά στοιχεία που παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα των εικόνων 11 & 12, η ηλεκτροπαραγωγή στην Ευρώπη ακολουθώντας την πορεία της παγκόσμιας αγοράς σημείωσε μικρή πρόοδο στην προσπάθεια απαγκίστρωσης από τα ορυκτά καύσιμα, ενισχύοντας σημαντικά το ρόλο του φυσικού αερίου εις βάρος του άνθρακα, του λιγνίτη και του πετρελαίου. Η συνολικά παραγόμενη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα ελαττώθηκε κατά 19% τα τελευταία 20 χρόνια, με μέσο ετήσιο ρυθμό μείωσης 1,1% [11].

Οι ΑΠΕ γνώρισαν επίσης σημαντική ανάπτυξη τη δεκαετία 2000-2010 με χώρες όπως η Δανία, η Γερμανία, η Αγγλία, η Λετονία, η Ισπανία, η Ιταλία, η Σουηδία και η Ελβετία να παίζουν πρωτοπόρο ρόλο στην αξιοποίησή τους. Τέλος, η πυρηνική ενέργεια φαίνεται να κατέχει μια σταθερά υψηλή θέση ως μέσο ηλεκτροπαραγωγής. Ωστόσο, η αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας αφορά μόνο ορισμένες χώρες της Ευρώπης. Συγκεκριμένα, στο τέλος του 2009 σε μόλις 16 ευρωπαϊκά κράτη υπήρχαν εν ενεργεία πυρηνικά εργοστάσια με πολλές χώρες, όπως η Ελλάδα, η Νορβηγία, η Εσθονία, η Δανία, η Ιρλανδία κ.α. να αποκλείουν κάθε ενδεχόμενο υιοθέτησης της πυρηνικής ενέργειας ως μέσο ηλεκτροπαραγωγής για τα επόμενα χρόνια. [11]



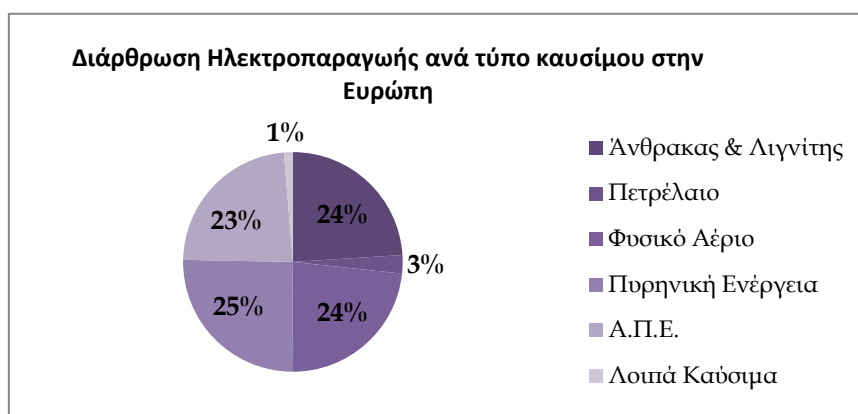
Εικόνα 11: Διαχρονική εξέλιξη της διάρθρωσης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις χώρες της Ευρώπης [11]



Εικόνα 12: Διαχρονική εξέλιξη της διάρθρωσης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις χώρες της Ευρώπης [11]

Υπό την επίδραση των παραπάνω τάσεων, στο τέλος του 2011, τα ορυκτά καύσιμα εξακολουθούσαν να είναι κυρίαρχα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην επικράτεια της Ευρώπης με συνολικό ποσοστό 50% (το μισό εξ' αυτού κατέχει η χρήση φυσικού αερίου). Η ευρεία χρήση του φυσικού αερίου στην Ευρώπη οφείλεται τόσο στις μειωμένες εκπομπές CO₂ (40% λιγότερες εκπομπές σε σχέση με τον άνθρακα και 25% λιγότερες εκπομπές από το πετρέλαιο) όσο και στην εύκολη πρόσβαση και μειωμένη τιμή προμήθειάς του ως αποτέλεσμα των κοιτασμάτων που υπάρχουν στην επικράτεια της (η Ρωσία παράγει το 25% της διεθνώς παραγόμενης ποσότητας φυσικού αερίου).

Η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών κατέχει επίσης εξέχουσα θέση στην Ευρώπη με ποσοστό 23,4 %, σημειώνοντας μέση ετήσια αύξηση της τάξης του 3,6% από τις αρχές της δεκαετίας του '90 έως το τέλος του 2011 [11]. Ο ρυθμός αυτός οφείλεται κατά κύριο λόγο στη μεγάλη ανάπτυξη που σημειώθηκε σε χώρες όπως η Εσθονία (ρυθμός ανάπτυξης +48,6% / έτος), η Πολωνία (+14% / έτος), η Κύπρος (ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης +41%), η Ισπανία (ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης + 13,3%) και η Γερμανία (+9,4% / έτος). Τέλος, η πυρηνική ενέργεια συμβάλλει κατά 25,2% στη συνολική ευρωπαϊκή παραγωγή [11].



Εικόνα 13: Διάρθρωση της παραγωγής ηλεκτρισμού στις χώρες της Ευρώπης ανά τύπο καυσίμου(2011) [12]

2.6 Η πυρηνική ενέργεια στην ηλεκτροπαραγωγή σήμερα

Η πυρηνική ενέργεια κερδίζει τα τελευταία χρόνια με αργό αλλά σταθερό ρυθμό νέο έδαφος ως πηγή ηλεκτροπαραγωγής. Ως το 2011, το παγκόσμιο ενδιαφέρον για τη δυνατότητα υιοθέτησης της πυρηνικής ενέργειας διευρύνθηκε και άρχισε να αποκτά γερά θεμέλια με τη συνεχή κατασκευή νέων εγκαταστάσεων παραγωγής και τη σύνδεσή τους στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, ενώ το 2008 δεν εισηχθη καμία πυρηνική μονάδα, το 2009 συνδέθηκαν 2, ενώ το 2010 προστέθηκαν 5 νέα εργοστάσια [13]. Έτσι, στις αρχές του 2011 η πυρηνική ενέργεια απέδιδε συνολικά 376 GWe ηλεκτρικής ισχύος [13,14]. Ωστόσο, το ατύχημα στο εργοστάσιο πυρηνικής ενέργειας στη Fukushima το Μάρτιο του 2011 οδήγησε στον παροπλισμό 13 εν ενεργεία μέχρι τότε πυρηνικών αντιδραστήρων, εκ των οποίων 4 στη Fukushima και 8 στη Γερμανία. Σε αυτούς προστέθηκε κι ένας παλαιότερης τεχνολογίας πυρηνικός αντιδραστήρας στο Ηνωμένο Βασίλειο. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω στο τέλος του 2011 υπήρχαν σε ισχύ 435 πυρηνικοί αντιδραστήρες, οι οποίοι συνολικά απέδιδαν 369 GWe ηλεκτρικής ισχύος, ποσότητα μειωμένη κατά 2% σε σχέση με την παραγωγή στην αρχή του 2011.

Το ατύχημα στη Fukushima είχε σημαντικό αντίκτυπο και στο σχεδιασμό ανέγερσης νέων πυρηνικών αντιδραστήρων του ίδιου έτους. Έτσι, η συνεχής ανάπτυξη στην κατασκευή νέων πυρηνικών εγκαταστάσεων που ξεκίνησε το 2003 και κορυφώθηκε το 2010 με την λειτουργία 16 νέων αντιδραστήρων, πάγωσε το 2011 με μόλις 4 νέα εργοστάσια να τίθεται υπό κατασκευή. Στις 31 Δεκεμβρίου του 2011 υπήρχαν συνολικά 65 αντιδραστήρες υπό κατασκευή [13,15].

Παρά το ισχυρό, όμως, πλήγμα που δέχθηκε η χρήση της πυρηνικής ενέργειας εξαιτίας του προαναφερθέντος ατυχήματος η συνεχής αύξηση του μεριδίου που κατέχει ως μέσο ηλεκτροπαραγωγής επιβραδύνθηκε αλλά δεν ανακόπηκε. Έτσι, οι βασικοί πυλώνες της παγκόσμιας ανάπτυξης όσον αφορά την πυρηνική ενέργεια, η Ρωσία, οι ΗΠΑ, η Κίνα και η Ινδία όχι μόνο παρέμειναν ενεργοί ως προς την εγχώρια ηλεκτροπαραγωγή τους από πυρηνικά εργοστάσια, αλλά εξακολουθούν να παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξάπλωση της πυρηνικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού διεθνώς, παρέχοντας τον απαιτούμενο εξοπλισμό, τεχνογνωσία, σχεδιασμό και υποστήριξη στα «νεοφώτιστα» κράτη. Στο τέλος του 2012, η παραγομένη ηλεκτρική ενέργεια από πυρηνικά εργοστάσια στη Ρωσία ήταν 177,3 TWh (17,78% επί της συνολικής ενέργειας που παρήχθη) [16]. Η εγκατεστημένη ισχύς των πυρηνικών αντιδραστήρων στην επικράτεια της χώρας στα τέλη του 2012 ανήλθε σε 25.242 MWe ενώ ο ενεργειακός σχεδιασμός της προβλέπει την άμεση αύξηση των εν ενεργεία αντιδραστήρων από 31 σε 59 [13]. Εκείνο όμως, που καθιστά πρωτοπόρο τη Ρωσία είναι οι μεγάλες επενδύσεις που πραγματοποιούνται στον τομέα της έρευνας και ανάπτυξης νέων πυρηνικών τεχνολογιών με όλο και αυστηρότερα πρότυπα ασφαλείας. Στα πλαίσια αυτά η Ρωσική κυβέρνηση ενέκρινε κονδύλια ύψους \$5,42 δισεκατομμυρίων για την έναρξη ενός νέου ομοσπονδιακού προγράμματος σχετικά με την πυρηνική τεχνολογία. Μάλιστα, έως το 2015 περίπου \$42,7 δις αναμένεται να διατεθούν για την ενίσχυση της πυρηνικής ανάπτυξης της χώρας. Άλλωστε, στη Ρωσία εκτός από την εξέχουσα θέση που κατέχει η ηλεκτροπαραγωγή από πυρηνικούς αντιδραστήρες στον ενεργειακό της σχεδιασμό, υπάρχουν μεγάλες κρατικές προσδοκίες για την αύξηση των κερδών από τις πωλήσεις ρωσικού πυρηνικού εξοπλισμού και τεχνογνωσίας σε ξένες χώρες τα επόμενα χρόνια [13, 14].

Από την άλλη πλευρά η Κίνα με 17 πυρηνικά εργοστάσια να συμμετέχουν ήδη ενεργά στην εγχώρια παραγωγή ηλεκτρισμού και με 30 ακόμα να βρίσκονται υπό κατασκευή συγκαταλέγεται σε μία από τις πιο ταχέως αναπτυσσόμενες χώρες σε αυτό τον τομέα παγκοσμίως [17]. Αν και το ποσοστό που κατέχει η ηλεκτροπαραγωγή από πυρηνικούς αντιδραστήρες σήμερα δεν ξεπερνάει το 2% του συνόλου, η πυρηνική ενέργεια αποτελεί την πρώτη επιλογή για την αντικατάσταση του άνθρακα στον ενεργειακό σχεδιασμό της

χώρας. Μάλιστα, τα αρχικά πλάνα προέβλεπαν την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύς από τα υπάρχοντα 11,3GWe στα 86GWe (6% της συνολικά εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος) μέχρι το τέλος του 2020 [16, 17] . Ο σχεδιασμός επανεξετάστηκε μετά το ατύχημα της Fukushima και τελικά ο αρχικός στόχος μειώθηκε στα 70-75 GWe, κυρίως εξαιτίας των διεθνών πιέσεων για αναβάθμιση του επιπέδου ασφαλείας. Και σε αυτή την περίπτωση, όμως, η ειδοποιός διαφορά που δίνει στην Κίνα μια ξεχωριστή θέση στην ανάπτυξη που αναμένεται να γνωρίσει η πυρηνική ενέργεια στο μέλλον δεν έγκειται μόνο στην εγχώρια ηλεκτροπαραγωγή της αλλά στη μεγάλη σημασία και τα τεράστια ποσά που επενδύονται στον τομέα της πυρηνικής τεχνολογίας. Πραγματοποιώντας διαρκώς νέες έρευνες και εγκαινιάζοντας καινοτόμα πυρηνικά προγράμματα, η Κίνα φιλοδοξεί να διεκδικήσει ηγετικό ρόλο στην καθιέρωση της πυρηνικής ενέργειας ως μέσο ηλεκτροπαραγωγής διεθνώς [13].

Τέλος, η Ινδία με 20 εν ενεργεία πυρηνικούς αντιδραστήρες (αριθμός που την κατατάσσει στην 9^η θέση παγκοσμίως) σε 6 πυρηνικά εργοστάσια στην επικράτεια της το 2012, παράγει 4.780MWe [13]. Μάλιστα, η παραγωγή αναμένεται να ενισχυθεί με επιπλέον 5.300MW(e) με την ολοκλήρωση 5 ακόμη αντιδραστήρων που βρίσκονται υπό κατασκευή. Επιπλέον, μέχρι το 2020 η εγκατεστημένη ισχύς από πυρηνικά εργοστάσια στη χώρα αναμένεται να φθάσει τα 20 GWe στα πλαίσια του ευρύτερου ενεργειακού σχεδιασμού για αύξηση του μεριδίου που κατέχει η πυρηνική ενέργεια από το 2,8% στο 9% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής μέσα στα επόμενα 25 χρόνια. Παράλληλα, η διμερής συμφωνία της χώρας με τις Ηνωμένες Πολιτείες για μια επιπρόσθετη αύξηση 25GW πριν το τέλος του 2020 καθιστά το ρυθμό πυρηνικής ανάπτυξης της Ινδίας σε ένα από τους υψηλότερους παγκοσμίως εξασφαλίζοντας με την υλοποίηση της την αύξηση της εγχώριας πυρηνικής ηλεκτροπαραγωγής κατά 89% σε λιγότερο από 10 χρόνια (από 4.780MW(e) η συνολική παραγωγή θα εκτοξευθεί στα 45.000 MW(e)) [13, 14].

Εκτός, όμως, από αυτές τις 3 χώρες όπου η ένταξη της πυρηνικής ενέργειας πραγματοποιείται με ραγδαίους ρυθμούς, υπάρχουν και πολλές άλλες στις οποίες, παρά το ατύχημα της Fukushima, η λειτουργία των ήδη υπάρχοντων εργοστασίων συνεχίστηκε κανονικά όπως κι οι προγραμματισμένες εισαγωγές νέων στο δίκτυο. Ενδεικτικά αναφέρουμε πως στον Καναδά, η Εθνική Επιτροπή Ασφαλείας για την Πυρηνική Ενέργεια (Canadian Nuclear Safety Commission) ανανέωσε για 5 χρόνια τη σύμβαση λειτουργίας του πυρηνικού εργοστασίου στο Quebec ενώ στο Μεξικό η πυρηνική παραγωγή ενισχύθηκε κατά 20% ως αποτέλεσμα ενός τετραετούς προγράμματος εκσυγχρονισμού των υπάρχοντων εγκαταστάσεων. Τέλος, στις Ηνωμένες Πολιτείες ανανεώθηκαν από τη Ρυθμιστική Αρχή για την Πυρηνική Ενέργεια – Nuclear Regulatory Commission για 20 επιπλέον χρόνια οι άδειες λειτουργίας των πυρηνικών σταθμών Vermont Yankee, Salem 1 & 2, Prairie Island 1 & 2, Palo Verde 1 & 2, Kewaunee και Hope Creek. Έτσι, οι εγκρίσεις για ανανέωση των αδειών λειτουργίας των υπάρχοντων πυρηνικών εγκαταστάσεων έφθασαν τις 71 για την περίοδο 2000-2011, με 15 ακόμη να περιμένουν την έγκρισή τους. Εκτός αυτού, το 2011 η Ρυθμιστική Αρχή Πυρηνικής Ενέργειας των ΗΠΑ έκανε δεκτές 5 αιτήσεις αναβάθμισης ενώ ακόμη 20 περιπτώσεις εξετάζονται [13, 16].

Στην Ευρώπη από την άλλη πλευρά, αν και το ατύχημα αναζωπύρωσε το σκεπτικισμό που ήδη υπήρχε σε πολλές χώρες, τα θεμέλια της πυρηνικής παραγωγής σε πολλά κράτη φαίνεται πως έμειναν ανεπηρέαστα. Έτσι, στην πρωτοπόρο Γαλλία (με εγκατεστημένη ισχύ πυρηνικής ηλεκτροπαραγωγής στα 63 GW και 74,9% της συνολικά παραγόμενης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα να προέρχεται από πυρηνικά εργοστάσια) η αρμόδια για τον πυρηνικό σχεδιασμό επιτροπή (Autorité de Sûreté Nucléaire) ενέκρινε τη δεκαετή παράταση λειτουργίας του πυρηνικού αντιδραστήρα Fessenheim-1. Παράλληλα, στην Ισπανία, το Συμβούλιο Ασφαλείας για την Πυρηνική Ενέργεια – Nuclear Safety Council έκανε αποδεκτή την αίτηση για δεκαετή παράταση λειτουργίας του πυρηνικού αντιδραστήρα Confrontes και τις δύο μονάδες του εργοστασίου Ascó και ενισχύθηκαν οι δύο αντιδραστήρες στο εργοστάσιο πυρηνικής ενέργειας Almaraz κατά 70 MW(e). Τον ίδιο

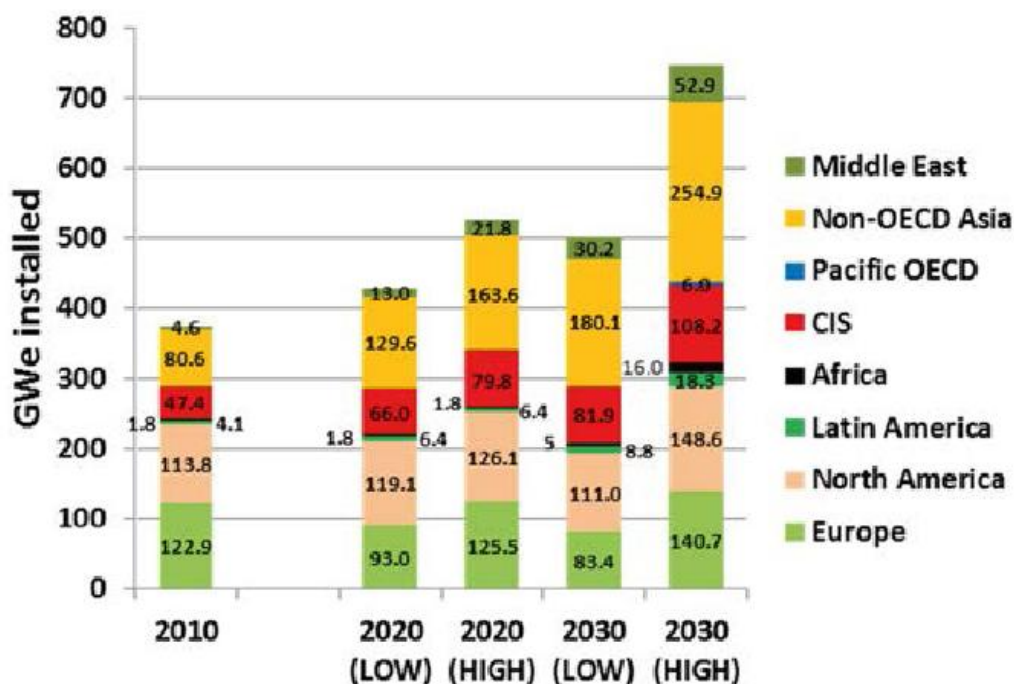
χρόνο ολοκληρώθηκε και η αναβάθμιση κι εκσυγχρονισμός των εγκαταστάσεων του σταθμού παραγωγής Bohunice στη Σλοβακία. Στη Φιλανδία ολοκληρώθηκε το τελευταίο στάδιο αναβάθμισης του πυρηνικού αντιδραστήρα Olkiluoto με την αύξηση της ισχύος του κατά 20 MW. Τον Οκτώβριο του 2011, άλλωστε, εγκρίθηκε και η κατασκευή του τρίτου πυρηνικού αντιδραστήρα της χώρας.

Παράλληλα, αρκετές είναι οι χώρες που αποφάσισαν να προσχωρήσουν στην επισύναψη σημαντικών συμφωνιών για την άμεση ένταξη της πυρηνικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή το 2011. Το Ιράν έχει ξεκινήσει τις διαδικασίες για το πρώτο πυρηνικό εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρισμού στην επικράτεια του και η Λευκορωσία θέτει τις βάσεις για την κατασκευή δύο πυρηνικών αντιδραστήρων. Επιπλέον, η Ρωσία χρηματοδότησε με τη μορφή δανεισμού το απαραίτητο ποσό για την ίδρυση του πρώτου πυρηνικού αντιδραστήρα στο Βιετνάμ και υπογράφει διμερή διακυβερνητική συμφωνία με το Μπαγκλαντές για την προμήθεια δύο αντιδραστήρων ισχύος 1000MW(e) και την παροχή όλης της απαιτούμενης τεχνογνωσίας, εκπαίδευσης και υποστήριξης. Στα παραπάνω πρέπει να προστεθούν και οι συμφωνίες της Τουρκίας και των Ηνωμένων Αραβικών Εμιράτων με τη Ρωσία (2010) και την Κορέα (2011) αντίστοιχα για την εισαγωγή της πυρηνικής ενέργειας στην εγχώρια ηλεκτροπαραγωγή τους. Μάλιστα, η Τουρκία προχώρησε και στη σύναψη νέας συμφωνίας για την κατασκευή και δεύτερου πυρηνικού εργοστασίου στην επικράτεια της τον Μάιο του 2013.

Ωστόσο, υπάρχουν και περιπτώσεις που στον απόηχο του ατυχήματος της Fukushima αναθεώρησαν ή ανέστειλαν το πυρηνικό τους σχεδιασμό. Τον Οκτώβριο του 2011, το Βέλγιο επανέφερε την κυβερνητική απόφαση του 2003 για το μόνιμο τερματισμό λειτουργίας του παλαιότερου πυρηνικού αντιδραστήρα της χώρας μέχρι το τέλος του 2015, απόφαση που είχε επανεξεταστεί κι απορριφθεί δευτερογενώς το 2009. Επιπλέον, κατατέθηκε πρόταση για το διπλασιασμό του ειδικού ετήσιου φόρου πυρηνικής ενέργειας που επιβάλλεται στην πυρηνική βιομηχανία. Υπό έντονη αμφισβήτηση τέθηκε κάτω από μεγάλες κοινωνικές πιέσεις και το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας στη Γαλλία, ενώ η γερμανική κυβέρνηση έθεσε σε ισχύ το νομοθετικό πλαίσιο που ψηφίστηκε τον Ιούνιο του 2011 και προβλέπει το σταδιακό αποκλεισμό της πυρηνικής ενέργειας από την ηλεκτροπαραγωγή με τον παροπλισμό των υπάρχοντων αντιδραστήρων ως το τέλος του 2022. Το έναυσμα, μάλιστα, της υλοποίησης αυτού του σχεδίου δόθηκε ήδη τον Αύγουστο του ίδιου έτους με το σφράγισμα 8 εκ των παλαιότερων πυρηνικών εργοστασίων της χώρας. Στην Ιταλία, οι σκέψεις για την επανένταξη της πυρηνικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή (ο τελευταίος πυρηνικός αντιδραστήρας στη γειτονική χώρα παροπλίστηκε το 1990) πάγωσαν τον Ιούνιο του 2011 απορρίπτοντας εξ' ολοκλήρου αυτήν την προοπτική τουλάχιστον για τα επόμενα πέντε χρόνια. Στο ίδιο μήκος κύματος και η Ελβετία που αποφάσισε τη σταδιακή κατάργηση της λειτουργίας των πυρηνικών αντιδραστήρων στην επικράτεια της μέχρι το τέλος του 2034. Επιπλέον, στην Ιαπωνία η κυβέρνηση δεσμεύτηκε για τον επαναπροσδιορισμό της ενεργειακής της πολιτικής και τον περιορισμό της εξάρτησης από την πυρηνική ενέργεια. Στα πλαίσια αυτά, στο τέλος Νοεμβρίου του 2011, μόλις το 20% της συνολικής δυναμικότητας της πυρηνικής παραγωγής της Ιαπωνίας παρέμενε εν ενεργεία. Τον ίδιο μήνα, ανακοινώθηκαν και οι προθέσεις της Ταϊβάν και της Κίνας για τη σταδιακή μεν ολοκληρωτική δε απαγκίστρωση από την πυρηνική ενέργεια χωρίς ωστόσο να τεθεί συγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα.

Παρά τις αναγγελίες αυτές, όμως, πολλές από τις παραπάνω χώρες επανεξέτασαν σύντομα τις αποφάσεις τους. Έτσι, π.χ., μετά την υποχώρηση των διεθνών πιέσεων η Κίνα εγκατέλειψε την ιδέα παροπλισμού της πυρηνικής της παραγωγής και θέτοντας υψηλότερες απαιτήσεις στο σχεδιασμό ασφαλείας, επαναπροσδιόρισε τους αρχικούς της στόχους. Επιπλέον, σε χώρες όπως η Γαλλία και η Ινδία, όπου υπήρξε έντονη κοινωνική ανησυχία και αμφισβήτηση γύρω από τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή, τα πυρηνικά προγράμματα έμειναν τελικά ανεπηρέαστα.

Αποτιμώντας την νέα κατάσταση που τείνει να διαμορφωθεί στην παγκόσμια πυρηνική βιομηχανία ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας – International Atomic Energy Agency (IAEA) εκτιμά πως μέχρι το 2030 θα υπάρξει σημαντική αύξηση, από 35% έως και 100%, στο μερίδιο της ηλεκτροπαραγωγής που κατέχει η πυρηνική ενέργεια με την παραγόμενη ισχύ από πυρηνικά εργοστάσια να κυμαίνεται από 501 GW(e) (συντηρητικές εκτιμήσεις) έως και 746 GW(e) (αισιόδοξες προβλέψεις). Μάλιστα, ακόμα κι οι συντηρητικές προβλέψεις μιλούν για 90 πυρηνικούς αντιδραστήρες εν ενεργεία το 2030. [13] Το μεγαλύτερο μέρος της ανάπτυξης αναμένεται να συμβεί σε χώρες που ήδη διαθέτουν πυρηνική υποδομή.



Εικόνα 14: Αναμενόμενη ανάπτυξη της συνολικής χωρητικότητας της ηλεκτροπαραγωγής από πυρηνική ενέργεια μεταξύ 2010-2030. Αισιόδοξες και συντηρητικές προβλέψεις [14]

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα στοιχεία που δημοσίευσε το International Energy Agency (IEA) το 2011 [16], σύμφωνα με τα οποία, λαμβάνοντας υπόψη το ατύχημα στη Fukushima, εκτός από τα τρία βασικά σενάρια:

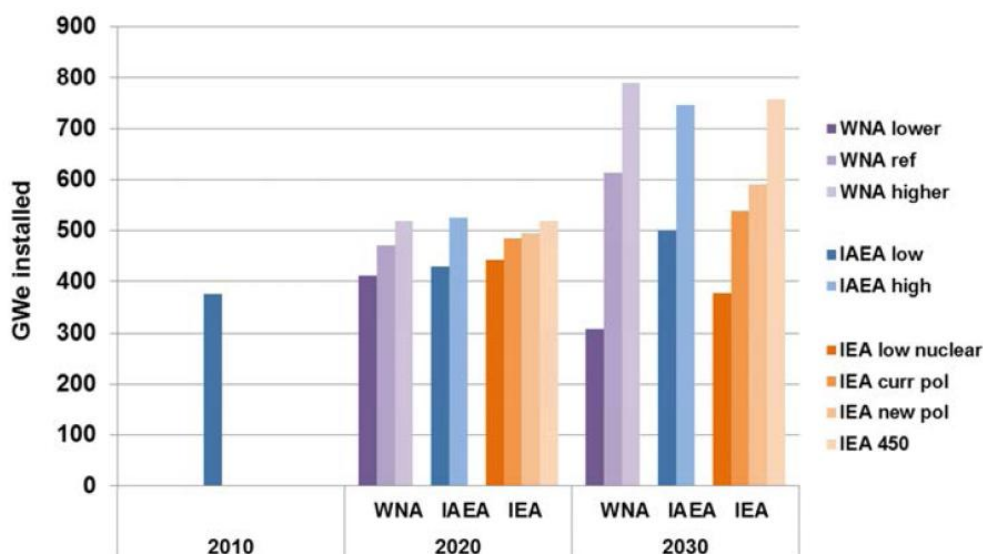
- Προβλεπόμενη ανάπτυξη με βάση την ισχύουσα νομοθεσία
- Προβλεπόμενη ανάπτυξη με την προϋπόθεση θέσπιση νέου νομοθετικού πλαισίου
- Σενάριο 450 (όπου το 450 αναφέρεται στον περιορισμό της συγκέντρωσης αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα σε 450 ppm)

Εξετάστηκε ένα επιπλέον, το σενάριο χαμηλής ανάπτυξης. Σε αυτή την περίπτωση, τα αποτελέσματα που προέκυψαν στηρίχθηκαν στις εξής παραδοχές:

- Στα κράτη-μέλη του OECD¹ δε θα κτιστούν καθόλου νέα εργοστάσια κατά την εξεταζόμενη περίοδο.
- Για τις χώρες εκτός λίστας λήφθηκαν υπόψη μόνο οι μισές εγκαταστάσεις από αυτές που προέβλεπε το σενάριο 2
- Οι εν ενεργεία πυρηνικοί σταθμοί θα παροπλιστούν συντομότερα από το αναμενόμενο.

¹ OECD: Organization for Economic Co-operation and Development - Βλ. Παράρτημα

Στην περίπτωση αυτή (σενάριο χαμηλής ανάπτυξης), η μειωμένη παραγωγή των πυρηνικών εργοστασίων θα έχει ως αντίκτυπο την αναδιανομή των μεριδίων ηλεκτροπαραγωγής με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να γνωρίζουν μία μέτρια ανάπτυξη και τις καταναλώσεις ορυκτών καυσίμων και κυρίως φυσικού αερίου να παρουσιάζουν σημαντική αύξηση. Ως αποτέλεσμα, η άνοδος των τιμών στην αγορά ενέργειας και η αυξημένη εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου θα είναι αναπόφευκτες [16]. Μάλιστα, τα στοιχεία υποδεικνύουν πως ως απόρροια των παραπάνω η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της γης θα ξεπεράσει τους 2 °C. Τα συμπεράσματα της παραπάνω έρευνας, καθώς και των τριών λοιπών σεναρίων αποτυπώνονται γραφικά στην εικόνα 15.



Εικόνα 15: Σύγκριση των προβλέψεων διεθνών οργανισμών για την μελλοντική ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή [13]

Στην εικόνα 15, αποτυπώνονται επίσης και τα στοιχεία που δημοσιεύτηκαν από σχετικές έρευνες κι άλλων διεθνών οργανισμών έπειτα από ανάλογες μελέτες. Όπως φαίνεται, οι συντηρητικές προβλέψεις της IAEA κι οι εκτιμήσεις του σεναρίου αναφοράς της World Nuclear Association προσεγγίζουν τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου της IEA εξαιτίας των παρόμοιων παραδοχών που λήφθηκαν υπόψη. Επιπλέον, σύγκρισμα είναι και τα αποτελέσματα των αισιόδοξων προβλέψεων των τριών οργανισμών, ενώ η μόνη απόκλιση που παρατηρείται είναι στη συντηρητική πρόβλεψη της IAEA, η οποία είναι ελαφρώς υψηλότερη από των υπολοίπων.

2.7 Η Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα

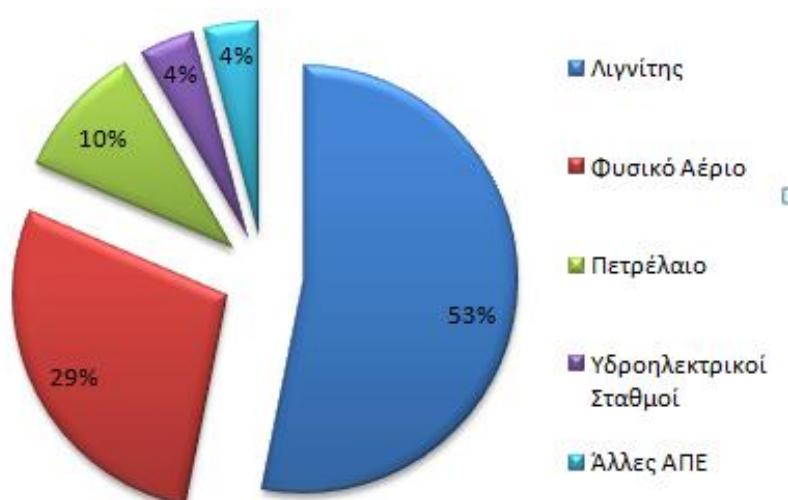
Η Ελλάδα εξαιτίας της γεωγραφικής της διαμόρφωσης με τα πολλά νησιά και την απόσταση μεταξύ των κύριων κέντρων παραγωγής και των μεγάλων αστικών κέντρων (Αθήνα, Πάτρα, Θεσσαλονίκη) όπου πραγματοποιείται το σύνολο σχεδόν της κατανάλωσης, παρουσιάζει σημαντικές ιδιομορφίες σε σχέση με τις χώρες της υπόλοιπης Ευρώπης. Η εγχώρια ηλεκτροπαραγωγή προέρχεται κυρίως από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς και σε ποσοστό σχεδόν 50% συντελείται στην περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας. Η συγκέντρωση αυτή των θερμοηλεκτρικών σταθμών στο Βορρά εξυπηρετεί την εγγύτητα τους στα πλούσια κοιτάσματα λιγνίτη, αλλά δημιουργεί αυξημένες απώλειες κατά τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας στα κέντρα κατανάλωσης και ανισορροπία στη λειτουργία. Τα σημαντικότερα

αποθέματα λιγνίτη της χώρας βρίσκονται συγκεντρωμένα στη Δράμα, στη Δυτική Μακεδονία, την Ελασσόνα και τη Μεγαλόπολη.

Σύμφωνα με επίσημα στοιχεία, το 66,5% της εγκατεστημένης ισχύος των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων είναι θερμικοί σταθμοί. Από αυτούς οι λιγνιτικοί σταθμοί αντιστοιχούν σε εγκατεστημένη ισχύ 4930 MW, το πετρέλαιο 730 MW και το φυσικό αέριο 4579 MW. Τέλος, το 19,6% αντιστοιχεί σε μεγάλα υδροηλεκτρικά εργοστάσια κι ακολουθούν οι μονάδες ΑΠΕ με 13,9% [18,19]. Κύριος παραγωγός και προμηθευτής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα είναι η ΔΕΗ, κατέχοντας περίπου το 75% της εγκατεστημένης ισχύος θερμοηλεκτρικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στην ηπειρωτική Ελλάδα, τεράστια υποδομή σε εγκαταστάσεις ορυχείων λιγνίτη, γραμμών μεταφοράς, δικτύων διανομής και συμπεριλαμβάνοντας στο ενεργειακό της μίγμα λιγνιτικούς (σε ποσοστό 50%), υδροηλεκτρικούς και πετρελαϊκούς σταθμούς. Η ΔΕΗ αποτελεί το δεύτερο μεγαλύτερο παραγωγό ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη στην Ευρωπαϊκή Ένωση και προμηθεύει περίπου το 98% της συνολικά καταναλισκόμενης ενέργειας στη χώρα (στοιχεία 2013) [19].

Πιο συγκεκριμένα, το 2011, στην Ελλάδα παρήχθησαν συνολικά 56,9 TWh με το ενεργειακό ισοζύγιο του έτους να διαμορφώνεται ως εξής, σύμφωνα με τα στοιχεία της ΡΑΕ:

✓ Λιγνίτης	53,15%
✓ Φυσικό Αέριο	28,3%
✓ Πετρέλαιο	10,2%
✓ Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί	4,2%
✓ Άλλες ΑΠΕ	4,15%



Εικόνα 16: Ενεργειακό Μείγμα στην Ελλάδα [19]

Ο λιγνίτης εξακολουθεί να κατέχει τη μερίδα του λέοντος στο ενεργειακό μίγμα ηλεκτροπαραγωγής ενώ σε σημαντική ενεργειακή πηγή έχει αναδειχθεί και το φυσικό αέριο. Οι ΑΠΕ φαίνεται, επίσης, να κερδίζουν διαρκώς νέο έδαφος, αλλά όλα δείχνουν πως υπάρχει μεγάλη απόκλιση από τον σχεδιασμό που είχε αρχικά τεθεί και προέβλεπε την αύξηση της συμμετοχής τους στο 34% έως το τέλος του 2020. Η εγκατεστημένη ισχύς των εν λειτουργία σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ ήταν 2140 MW στο τέλος του 2011, με τα αιολικά πάρκα να κατέχουν ηγετικό ρόλο. Παρ' όλα αυτά, τα επόμενα χρόνια αναμένεται να ενισχυθούν σημαντικά τα φωτοβολταϊκά.

Ακολουθεί μια συνοπτική ανάλυση των βασικών αρχών λειτουργίας των πιο διαδεδομένων τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα σήμερα.

2.7.1 Ηλεκτροπαραγωγή από λιγνίτη

Οι λιγνιτικοί σταθμοί αποτελούν τη βάση της εγχώριας ηλεκτροπαραγωγής, κυρίως εξαιτίας της ύπαρξης σημαντικών κοιτασμάτων λιγνίτη και τύρφης στη βόρεια Ελλάδα. Αν και πρόκειται για τα φτωχότερα ενεργειακά στερεά καύσιμα, τα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα λιγνίτη στην ελληνική επικράτεια υπολογίζεται πως επαρκούν για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε βάθος μισού αιώνα περίπου. Επιπλέον, οι λιγνιτικοί σταθμοί έχουν σχετικά μεγάλο βαθμό απόδοσης σε λειτουργία υπό πλήρες φορτίο και μικρό συνολικό κόστος ανά παραγόμενη μονάδα ενέργειας. Τα στοιχεία αυτά καθώς και η πολυπλοκότητα και ο χρόνος που απαιτείται για την εκκίνηση τους (η ρύθμιση ισχύος εν γένει στους ΑΗΣ είναι πολύπλοκη κι αργή διαδικασία) τους καθιέρωσαν ως εργοστάσια βάσης.

Σε ένα λιγνιτικό ατμοηλεκτρικό σταθμό, το καύσιμο μετά την εξόρυξη του μεταφέρεται στο σταθμό παραγωγής, όπου επεξεργάζεται στους μύλους καυσίμου. Από εκεί το καύσιμο μεταφέρεται στο λέβητα, όπου πραγματοποιείται η καύση. Για τα συστήματα καύσης των ΑΗΣ, διακρίνουμε τις εξής τεχνολογίες:

- Σταθερής κλίνης
- Καυστήρες Ρευστοποιημένης κλίνης
- Αεριοποιημένος Λιγνίτης

Ανάλογα με την τεχνολογία καύσης επιτυγχάνεται υψηλότερος βαθμός απόδοσης και χαμηλότερες εκπομπές ρύπων [20].

Εν γένει, πάντως οι λιγνιτικοί σταθμοί εκπέμπουν σημαντικές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα κι άλλων αερίων ρύπων, όπως οξείδια του θείου, του αζώτου κι αιωρούμενα σωματίδια. Για τον περιορισμό της ρύπανσης, λαμβάνονται πρωτογενή μέτρα όπως η βελτίωση της τεχνολογίας καύσης, της ροής και της κατανομής του αέρα εντός του λέβητα στην περιοχή καύσης και η βελτίωση της ποιότητας του καυσίμου, αλλά και δευτερογενή όπως η χρήση φίλτρων και δεσμευτών για τα οξείδια του θείου και του αζώτου. Εκτός από τους αέριους ρύπους, οι λιγνιτικοί σταθμοί παράγουν και υγρά βιομηχανικά απόβλητα και στερεά κατάλοιπα, όπως η τέφρα που παραμένει στο πυθμένα του λέβητα, η αιωρούμενη τέφρα που διαφεύγει από τα φίλτρα, ο γύψος από την αποθείωση και η ουρία από την απονίτρωση. Όσα από τα κατάλοιπα αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν, είτε μεταπωλούνται στη βιομηχανία τσιμέντου/ γύψου είτε χρησιμοποιούνται για δρόμους στα ορυχεία ή άλλα έργα υποδομής. Τα υπόλοιπα οδηγούνται σε υγειονομική ταφή (στερεά απόβλητα) ή μετά από την απαραίτητη κατεργασία τους διατίθενται σε ρέματα (υγρά απόβλητα).

Όσο αφορά το κόστος εγκατάστασης ενός λιγνιτικού σταθμού, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί είναι περίπου 2000 €/ kW εγκατεστημένης ισχύος.

2005€/kW	2010	2015	2020	2025	2030
Συνδυασμένος Κύκλος Φυσικού Αερίου ^{*3}	700	700	700	700	700
Αεριοστρόβιλος Φυσικού Αερίου ^{*4}	450	450	450	450	450
Αντλητικά Υ/Η ^{*3}	1900	1900	1900	1900	1900
Μικρά Υ/Η ^{*3}	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
Συμπαράγωγή με Βιοαέριο ^{*3}	3700	3700	3700	3700	3700
Συμπαράγωγή με Στερεά Βιομάζα ^{*3}	3300	3300	3300	3300	3300

Πίνακας 2: Κόστος εγκατάστασης μονάδων ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [8]

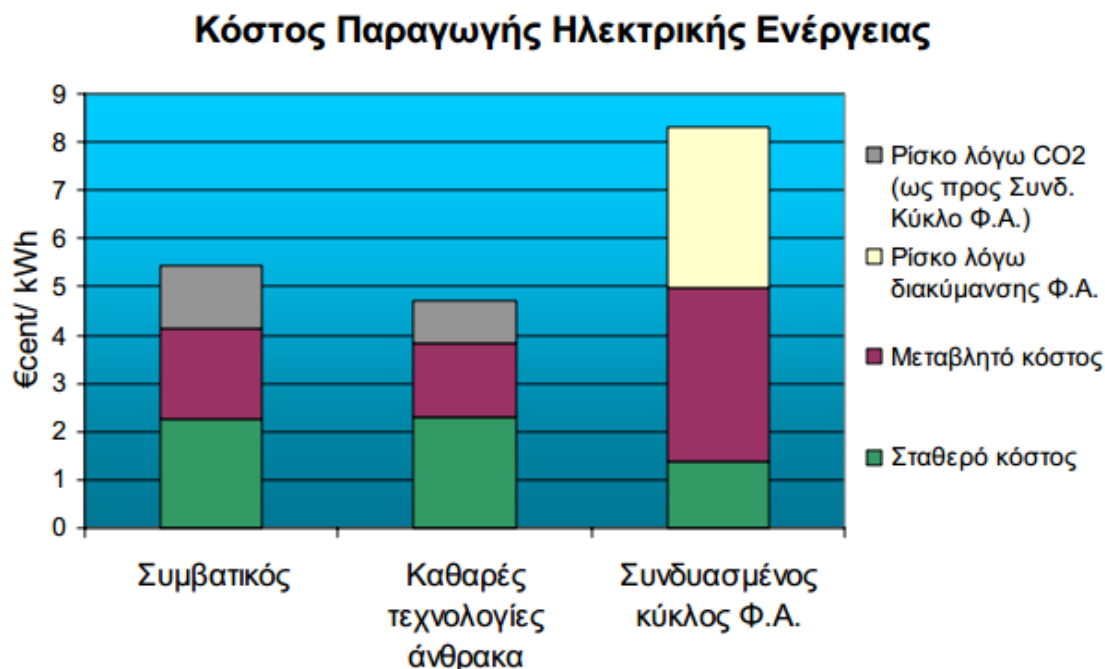
2.7.2 Ηλεκτροπαραγωγή από Φυσικό Αέριο

Το φυσικό αέριο είναι ένα μίγμα καύσιμων αερίων, με κύριο συστατικό το μεθάνιο που βρίσκεται σε κοιλάτες του υπεδάφους, συνήθως μαζί με άλλα ορυκτά καύσιμα. Η κύρια τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση φυσικού αερίου είναι οι αεριοστρόβιλοι, ανοικτού ή κλειστού τύπου. Για την κατασκευή ενός εργοστασίου φυσικού αερίου απαιτούνται κατά μέσο όρο 27-30 μήνες και το κόστος ανέρχεται σε 500-600 € / kW παραγόμενης ισχύος (δηλαδή για ένα εργοστάσιο 400 MW, η δαπάνη κατασκευής ανέρχεται σε € 200 – 240 εκατ.). Κατά την περίοδο κατασκευής απαιτούνται περίπου 300 εργαζόμενοι ενώ για τη λειτουργία του απασχολούνται 45-50 άτομα εξειδικευμένου προσωπικού. Ο μέσος χρόνος λειτουργίας των μονάδων φυσικού αερίου κυμαίνεται σε 20-25 χρόνια.

Θεωρείται η καθαρότερη πηγή ενέργειας μετά τις ΑΠΕ και γνωρίζει μεγάλη ανάπτυξη στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τα τελευταία χρόνια, αντικαθιστώντας λιγνιτικές και ανθρακικές μονάδες παραγωγής, χάρη στην καλή ποιότητα καύσης του, τη χαμηλή περιεκτικότητα ρυπογόνων ουσιών στα καυσαερίά του και τη υψηλή θερμογόνο δύναμή του. Συγκεκριμένα, το φυσικό αέριο εκπέμπει 43% λιγότερο CO₂ από το λιθάνθρακα και 30% λιγότερο από το πετρέλαιο για κάθε μονάδα παραγόμενης ενέργειας. Επίσης, παράγει λιγότερο από ένα τρίτο των οξειδίων του αζώτου και μόλις το 1% των οξειδίων του θείου που εκλύουν οι λιγνιτικοί σταθμοί. Το φυσικό αέριο δεν παράγει στερεά απόβλητα, σε αντίθεση με τα μεγάλα ποσά τέφρας του λιθάνθρακα, ενώ οι εκπομπές διοξειδίου του θείου και αιωρούμενων σωματιδίων είναι ελάχιστες.

Παρ' όλα αυτά, κατά την ατελή καύση του φυσικού αερίου καθώς και από διαρροές κι απώλειες κατά τη μεταφορά του, απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα μεθάνιο (κύριο συστατικό του φυσικού αερίου). Το μεθάνιο αποτελεί ένα σημαντικό αέριο ρύπο για το φαινόμενο του θερμοκηπίου, 58 φορές πιο επικίνδυνο από το διοξείδιο του άνθρακα στον

εγκλωβισμό θερμότητας. Συγκεντρωτικά, η χρήση του φυσικού αερίου αντιπροσωπεύει περίπου το 10% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Παράλληλα, σύμφωνα με την EPA η καύση φυσικού αερίου παράγει μικρότερες ποσότητες καρκινογόνων ουσιών σε σχέση με το πετρέλαιο και το λιθάνθρακα.



Εικόνα 17: Κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με εκτίμηση ρίσκου CO2 ως προς τη μονάδα συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου- Παρούσες τεχνολογίες [22]

2.7.3 Ηλεκτροπαραγωγή από υδροηλεκτρικούς σταθμούς (ΥΗΣ)

Στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς η παραγωγή ηλεκτρισμού στηρίζεται στον κύκλο του νερού και την εκμετάλλευση της υδραυλικής ενέργειας, η οποία ναι μεν παρέχεται δωρεάν από τη φύση αλλά για να καταστεί δυνατή η αξιοποίηση της απαιτούνται σημαντικές δαπάνες κι υποδομές. Ως επί τον πλείστον, για τη δημιουργία ενός υδροηλεκτρικού σταθμού απαιτείται η κατασκευή ενός φράγματος για τη δημιουργία μιας τεχνητής λίμνης (ταμιευτήρας) που με τον όγκο του νερού που αποταμιεύει, τροφοδοτεί τους υδροστροβίλους. Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του σταθμού παραγωγής και της ωφέλιμης χωρητικότητας του ταμιευτήρα έχουμε λίμνες ημερήσιας, εβδομαδιαίας, μηνιαίας, ετήσιας και υπερετήσιας ρυθμιστικής ικανότητας [20, 21].

Τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια έχουν υπέρογκα κόστη κατασκευής, αλλά συνήθως σχεδιάζονται ως έργα πολλαπλού σκοπού, πέραν της ηλεκτροπαραγωγής, παρέχοντας νερό για ύδρευση, άρδευση και αντιπλημμυρική προστασία. Επιπλέον, τα έργα αυτά αναβαθμίζουν συνήθως τουριστικά την τοπική κοινωνία, προσφέροντας πολλαπλές δυνατότητες αναψυχής και τουριστικής ανάπτυξης. Από περιβαλλοντική άποψη, τα υδροηλεκτρικά αποτελούν μια καθαρή μορφή ενέργειας, χωρίς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ή άλλων ρύπων. Ενδεικτικά, αναφέρουμε ότι μια μέση ετήσια παραγωγή 5.000 GWh από υδροηλεκτρικούς σταθμούς ανάλογα με την τεχνολογία που υποκαθιστά (φυσικό αέριο ή λιγνίτη) μπορεί να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 3-8 εκατ. τόνους κατ' έτος. Πέρα από τα σημαντικά οφέλη για το οικοσύστημα, βέβαια, αυτό μεταφράζεται επίσης σε οικονομικά οφέλη 45-100 εκατ. ευρώ ανά έτος από την αγορά δικαιωμάτων εκπομπών. Παρ' όλα αυτά συνιστούν τεράστια επέμβαση στο φυσικό περιβάλλον και επηρεάζουν σημαντικά το οικοσύστημα.

2.7.4 Ηλεκτροπαραγωγή από πετρελαϊκούς σταθμούς

Το πετρέλαιο χρησιμοποιήθηκε αρχικά ευρέως στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Ωστόσο, μετά την ενεργειακή κρίση της δεκαετίας του '70, η άνοδος της τιμής του και ο περιορισμένος όγκος των διαθέσιμων αποθεμάτων οδήγησε στη σταδιακή αντικατάστασή του από άλλες πηγές. Σήμερα, το ποσοστό συμμετοχής του πετρελαίου στην ηλεκτροπαραγωγή παραμένει ιδιαίτερα υψηλό, όπως είναι φυσικό, σε κάποιες αραβικές πετρελαιοπαραγωγικές χώρες (όπως στην Υεμένη που κατέχει σχεδόν 100% της εγχώριας ηλεκτροπαραγωγής), αλλά εν γένει στις περισσότερες χώρες του κόσμου το ποσοστό αυτό έχει περιοριστεί σημαντικά [20]. Από τα προϊόντα του αργού πετρελαίου στην ηλεκτροπαραγωγή χρησιμοποιούνται μόνο δύο: το ντίζελ (σε αεριοστροβιλικούς σταθμούς και μηχανές εσωτερικής καύσης) και το μαζούτ (σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς). Οι αεριοστροβιλικοί σταθμοί έχουν μικρό κόστος εγκατάστασης, μικρές απαιτήσεις χώρου και χαμηλό κόστος συντήρησης. Ωστόσο, έχουν σχετικά μικρό βαθμό απόδοσης και για αυτό δεν προτιμούνται για συνεχή λειτουργία στο διασυνδεδεμένο δίκτυο. Η δυνατότητα γρήγορης εκκίνησης, ταχείας ρύθμισης αποδιδόμενης ισχύος και η πλήρως αυτοματοποιημένη λειτουργία τους, άλλωστε, τους καθιστούν ιδανικούς για μονάδες αιχμής.

Στην Ελλάδα, οι πετρελαϊκοί σταθμοί χρησιμοποιούνται, κυρίως, σε περιπτώσεις όπου η χρήση λιγνίτη είναι αδύνατη ή ασύμφορη, όπως τα νησιά τα οποία είναι αποκομμένα από το διασυνδεδεμένο δίκτυο κι όπου απαιτείται ένα καύσιμο με υψηλή θερμογόνο δύναμη κι εύκολο στη μεταφορά. Επίσης, το πετρέλαιο έχει λιγότερες εκπομπές αέριων ρύπων από το λιγνίτη. Πετρελαϊκοί σταθμοί υπάρχουν και σε περιοχές που βρίσκονται μακριά από τα κέντρα παραγωγής του λιγνίτη και κοντά σε αστικά κέντρα, όπως π.χ. ο θερμικός σταθμός στο Λαύριο [18, 23].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

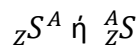
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

3.1 Βασικά στοιχεία πυρηνικής φυσικής

3.1.1 Άτομο και πυρήνας

Το **άτομο** αποτελεί τη βασική μονάδα της ύλης. Κάθε άτομο χαρακτηρίζεται από δύο αριθμούς:

- Τον **ατομικό αριθμό Z**, ο οποίος αποτελεί και τη χημική ταυτότητα κάθε στοιχείου καθώς καθορίζει τις χημικές ιδιότητες του και αναφέρεται στον αριθμό των πρωτονίων στον πυρήνα του. Άτομα με τον ίδιο ατομικό αριθμό ονομάζονται ισότοπα.
- Τον **μαζικό αριθμό A**, που δηλώνει το συνολικό αριθμό νουκλεονίων (πρωτονίων και νετρονίων) στον πυρήνα. Ισότοπα με μαζικό αριθμό A και ατομικό αριθμό Z συμβολίζονται:



Τα πρωτόνια και τα νετρόνια του ατόμου αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του και συγκρατούνται στο μικρό χώρο του πυρήνα με ελκτικές δυνάμεις, οι οποίες είναι αρκετά ισχυρές ώστε να υπερνικούν τις απωστικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις που ασκούν μεταξύ τους τα θετικά φορτισμένα πρωτόνια. Οι δυνάμεις αυτές ονομάζονται **πυρηνικές δυνάμεις** και η εμβέλεια τους περιορίζεται σε αποστάσεις της τάξης μεγέθους του πυρήνα, ήτοι 10^{-12} cm. Επιπλέον, η πυρηνική δύναμη μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους νουκλεονίων (πρωτόνιο- πρωτόνιο, νετρόνιο- νετρόνιο, πρωτόνιο- νετρόνιο) θεωρείται ίση. Ο πυρήνας, λοιπόν, του ατόμου αποτελεί εν γένει μια σταθερή οντότητα, γεγονός που υποδηλώνει πως η ενέργεια του είναι χαμηλότερη από εκείνη των συστατικών του. Άρα για να διασπαστεί στα επιμέρους συστατικά του απαιτείται η προσφορά ενέργειας. Η απαιτούμενη αυτή ενέργεια ονομάζεται **ενέργεια σύνδεσης ή συνοχής** [24]. Επιπλέον, δεδομένου πως στη μελέτη των πυρηνικών φαινομένων η μάζα ισοδυναμεί με ενέργεια σύμφωνα με την εξίσωση του Einstein ($E = m * c^2$), το γεγονός πως η ενέργεια του πυρήνα είναι χαμηλότερη από την ενέργεια των επιμέρους συστατικών υποδεικνύει πως η μάζα οποιουδήποτε πυρήνα είναι μικρότερη του αθροίσματος των μαζών των νουκλεονίων που τον συγκροτούν (και το αντίστροφο). Η διαφορά αυτή των μαζών καλείται **έλλειμμα μάζας**, είναι ισοδύναμη με την ενεργειακή διαφορά ΔE ανάμεσα στις δύο καταστάσεις (ελεύθερα νουκλεόνια – πυρήνας) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta E = \Delta m * c^2$$

Ο πυρήνας του ατόμου αποτελεί ένα κβαντομηχανικό σύστημα με αποτέλεσμα η εσωτερική του ενέργεια να μπορεί να λαμβάνει μόνο συγκεκριμένες (κβαντισμένες) τιμές. Οι διακεκριμένες αυτές επιτρεπόμενες τιμές ονομάζονται **στάθμες ενέργειας** κι είναι χαρακτηριστικές του είδους του πυρήνα. Σε πυρηνικό επίπεδο, η τάξη μεγέθους των επιτρεπόμενων σταθμών είναι μερικά MeV, ήτοι εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες ενεργειακές καταστάσεις του ατόμου (μερικά eV). Η χαμηλότερη από αυτές ονομάζεται **θεμελιώδης κατάσταση**, ενώ οι υπόλοιπες καλούνται **καταστάσεις διέγερσης**. Ένας πυρήνας που βρίσκεται σε κατάσταση διέγερσης είναι ασταθής και τείνει να επιστρέψει στην ευσταθή θεμελιώδη κατάσταση, απελευθερώνοντας την περίσσεια ενέργειας.

Πολλοί από τους φυσικούς πυρήνες, όμως, είναι ασταθείς. Αυτό συμβαίνει κυρίως με τους πολύ μεγάλους πυρήνες. Στην περίπτωση αυτή, ο πυρήνας καλείται **ραδιενεργός**,

υπάρχει δηλαδή η πιθανότητα μετατροπής του σε κάποιο άλλο πυρήνα, εκπέμποντας σωματίδια ή η μετάβαση από κάποια στάθμη διέγερσης σε κάποια άλλη χαμηλότερη με την εκπομπή φωτονίων χωρίς να υπάρξει κάποια εξωτερική διέγερση. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **ραδιενεργός διάσπαση**. Ο διασπώμενος πυρήνας σε αυτή την περίπτωση ονομάζεται μητρικός κι ο πυρήνας που προκύπτει από τη διάσπαση θυγατρικός. Τα σωματίδια που εκπέμπονται κατά τη διαδικασία αυτή φέρουν σημαντική ενέργεια και αποτελούν τη ραδιενεργό ακτινοβολία. Συνοψίζοντας, λοιπόν, **ραδιενέργεια** καλείται η ιδιότητα της αυθόρμητης διάσπασης, δηλαδή της διάσπασης χωρίς εξωτερική διέγερση, των ραδιενεργών πυρήνων, με ταυτόχρονη εκπομπή ραδιενεργών ακτινοβολιών. Οι πιο συνηθισμένες ακτινοβολίες κατά τη διάσπαση φυσικών ραδιενεργών πυρήνων είναι η εκπομπή σωματιδίων α , β^- , νετρίνων, αντινετρίνων, ακτινοβολίας γ ή ποζιτρονίων β^+ . Τα ραδιενεργά νουκλίδια καλούνται και **ραδιονουκλίδια** [25, 26].

Το φαινόμενο της ραδιενεργού διάσπασης, όπως κι όλα τα άλλα ατομικά και πυρηνικά φαινόμενα, είναι στοχαστικό κι επομένως η μελέτη του περιορίζεται στον προσδιορισμό της πιθανότητας διάσπασης. Πειραματικά έχει προσδιορισθεί πως 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. Με την προσφορά, ωστόσο, ενέργειας στον πυρήνα, η πιθανότητα σχάσης αυξάνεται, με τρόπο μάλιστα ανάλογο με το ποσό ενέργειας που προσφέρεται: όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια διέγερσης τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητα σχάσης. Ωστόσο, η αύξηση της πιθανότητας σχάσης δεν αυξάνεται ισόποσα με την προσφορά ενέργειας. Μέχρι κάποια κρίσιμη ενέργεια διέγερσης (κατώφλι ενέργειας), η πιθανότητα σχάσης αυξάνεται ελάχιστα, ενώ όταν ξεπεραστεί, η αύξηση που παρατηρείται είναι εξαιρετικά απότομη. Με άλλα λόγια, ένας πυρήνας σε κατάσταση διέγερσης έχει εξαιρετικά μικρή πιθανότητα αποδιέγερσης με σχάση. Αντίθετα αν ο πυρήνας διεγερθεί πάνω από το προαναφερθέν κατώφλι, ο πιθανότερος τρόπος αποδιέγερσης του είναι μέσω της σχάσης. Για βαρείς πυρήνες, όπως το θόριο Th-233, το κατώφλι ενέργειας είναι της τάξης των 5 – 6 eV, ενώ για ελαφρύτερους πυρήνες είναι πολύ υψηλότερο (π.χ. για το μόλυβδο Pb είναι 20 MeV).

Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για να βρεθεί ένας βαρύς πυρήνας σε κατάσταση διέγερσης με μεγάλη πιθανότητα σχάσης είναι μέσω της απορρόφησης ενός νετρονίου. Για ορισμένα ισότοπα, όπως τα U-233, U-235, Pu-239, Pu-241, η ενέργεια σύνδεσης του νετρονίου είναι μόνη της αρκετή για να προκαλέσει σχάση, χωρίς επιπλέον κινητική ενέργεια του νουκλεονίου. Στις περιπτώσεις αυτές, λοιπόν, είναι δυνατή η σχάση με νετρόνια ασήμαντης κινητικής ενέργειας. Τα ισότοπα αυτά ονομάζονται **σχάσιμα** και μόνο το U-235 βρίσκεται διαθέσιμο στη φύση σε αξιόλογες ποσότητες. Για τη σχάση άλλων ισότοπων, όπως λ.χ. το Th-232 και το U-238, απαιτείται εκτός από την ενέργεια σύνδεσης του νετρονίου και επιπλέον κινητική ενέργεια.

3.1.2 Πυρηνικές αντιδράσεις

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, λοιπόν, δεν είναι τίποτα άλλο από τη δυναμική ενέργεια που υπάρχει αποθηκευμένη στον πυρήνα του ατόμου ως αποτέλεσμα των πυρηνικών δυνάμεων που ασκούνται μεταξύ των νουκλεονίων.

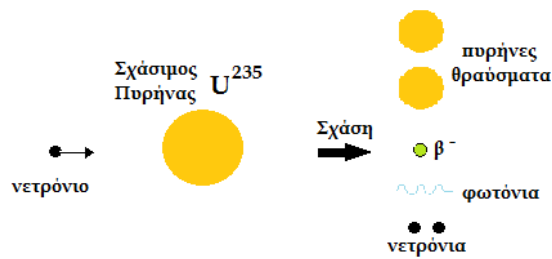
Για την πρόκληση μιας πυρηνικής αντίδρασης απαιτείται η πρόσκρουση ενός σωματιδίου- βλήματος στον πυρήνα του ατόμου. Ως αποτέλεσμα της κρούσης, ο αρχικός

πυρήνας αποκτά πλεόνασμα ενέργειας (πάνω από τη θεμελιώδη). Συγκεκριμένα, η αντίδραση πραγματοποιείται σε δύο στάδια:

- i. Στο πρώτο στάδιο το σωματίδιο ενσωματώνεται στον αρχικό πυρήνα με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός νέου, σύνθετου πυρήνα ο οποίος βρίσκεται σε κατάσταση διέγερσης.
- ii. Σε δεύτερη φάση, ο σύνθετος πυρήνας αποδιεγείρεται με διάσπαση στα τελικά προϊόντα.

Στη μελέτη των πυρηνικών φαινομένων, διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες αντιδράσεων με νετρόνια:

- a) Ραδιενεργός σύλληψη (n, γ): Ο σύνθετος πυρήνας αποδιεγείρεται εκπέμποντας φωτόνια (ακτινοβολία γ). Συχνά η εκπομπή της ακτινοβολίας γ δεν αρκεί για την πλήρη αποδιέγερση του πυρήνα και ακολουθείται από την εκπομπή ακτινοβολίας β.
- b) Εκπομπή φορτισμένων σωματιδίων: Στην περίπτωση αυτή η αποδιέγερση υλοποιείται μέσω της εκπομπής ενός πρωτονίου ή σωματιδίου α ή δευτέρου ή β⁻.
- c) Ανελαστική σκέδαση: Εκπέμπεται ένα νετρόνιο (το οποίο δεν είναι αναγκαίο να ταυτίζεται με το νετρόνιο που ενσωματώθηκε στον αρχικό πυρήνα) οπότε το άλλο προϊόν της διάσπασης έχει το ίδιο ζεύγος (Z, A-Z) με τον αρχικό πυρήνα. Μετά την εκπομπή του νετρονίου, ο πυρήνας βρίσκεται σε κατάσταση διέγερσης και αποδιεγείρεται τελικά με την εκπομπή γ-ακτινοβολίας.
- d) Ελαστική σκέδαση (n,n): Εκπέμπεται και πάλι ένα νετρόνιο (που όπως και στην προηγούμενη περίπτωση μπορεί να διαφέρει από το αρχικό που προσκρούει στον πυρήνα) κι ο πυρήνας επανέρχεται στην αρχική θεμελιώδη κατάσταση. Η περίπτωση αυτή είναι πολύ σπάνια και αντιστοιχεί στην δυναμική ελαστική σκέδαση, όπου δεν έχουμε το σχηματισμό σύνθετου πυρήνα και το νετρόνιο βλέπει τον πυρήνα στόχο ως μια μεγάλη ενιαία μάζα. Έτσι, κατά την κρούση το νετρόνιο αποδίδει ένα μέρος της κινητικής ενέργειας και ορμής στον πυρήνα και συνεχίζει να κινείται σε κατεύθυνση διαφορετική από την αρχική. Η συνολική ενέργεια νετρονίου και πυρήνα παραμένουν αμετάβλητες πριν και μετά το φαινόμενο.
- e) Αντίδραση (n,2n): Σπάνια περίπτωση κατά την οποία η αποδιέγερση του σύνθετου πυρήνα υλοποιείται με την εκπομπή 2 νετρονίων. Προϋπόθεση για να συμβεί κάτι τέτοιο είναι το νετρόνιο-βλήμα να έχει πολύ μεγάλη ενέργεια.
- f) Σχάση: Στην περίπτωση αυτή ο σύνθετος πυρήνας διασπάται σε δυο νέους ασταθείς πυρήνες και σχεδόν ταυτόχρονα εκπέμπονται δύο έως τρία νετρόνια και ένας αριθμός φωτονίων (εικόνα 18). Για να πραγματοποιηθεί η σχάση, ωστόσο, το νετρόνιο πρέπει να εισέλθει με την κατάλληλη ταχύτητα: αν η ταχύτητα του είναι πολύ μεγάλη τότε υπάρχει πιθανότητα να διαπεράσει τον πυρήνα ή να εκτοπίσει κάποιο άλλο νετρόνιο λαμβάνοντας τη θέση του, ενώ αν είναι πολύ μικρή μπορεί να αποκρουστεί από τον πυρήνα. Ως επί το πλείστον, ο πυρήνας βομβαρδίζεται με χαμηλής ταχύτητας νετρόνια, τα οποία ονομάζονται θερμικά νετρόνια. Ο πυρήνας συλλαμβάνει το νετρόνιο, ταλαντώνεται λόγω της επιπλέον ενέργειας και τελικά διασπάται. Οι δύο νέοι πυρήνες που σχηματίζονται εξακολουθούν να βρίσκονται υπό διέγερση και αποδιεγείρονται με την εκπομπή σωματιδίων β⁻ και γ. Η σχάση αποτελεί την πιο σημαντική κατηγορία αντιδράσεων για την παρούσα μελέτη.
- g) Μια τελευταία κατηγορία πυρηνικών αντιδράσεων είναι η **πυρηνική σύντηξη**, κατά την οποία δύο ελαφροί πυρήνες ενώνονται για το σχηματισμό ενός βαρύτερου.



Εικόνα 18: Τα προϊόντα της σχάσης

3.2 Βασικές αρχές λειτουργίας πυρηνικών τεχνολογιών

3.2.1 Αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης

Η λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων στηρίζεται στο φαινόμενο της σχάσης. Όταν ένα νετρόνιο συγκρούεται με ένα πυρήνα U-235 το πιθανότερο αποτέλεσμα είναι να απορροφηθεί από αυτόν και να προκύψει ένας νέος σύνθετος πυρήνας σε κατάσταση διέγερσης, ο οποίος μετά τη σχάση χωρίζεται σε δύο κομμάτια απελευθερώνοντας ενέργεια και δύο ή τρία νετρόνια συνήθως. Το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής της ενέργειας εμφανίζεται σχεδόν ταυτόχρονα με τη σχάση σε θερμότητα. Στους πυρηνικούς αντιδραστήρες, η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται μέσα σε ένα υλικό που περιέχει αρκετή ποσότητα U-235. Έτσι, τα νετρόνια που προκύπτουν από μία σχάση απορροφώνται από άλλους πυρήνες U-235 με απόρροια την εκπομπή νέων νετρονίων που με τη σειρά τους θα πυροδοτήσουν εκ νέου την ίδια διαδικασία. Η σχάση, λοιπόν, εκτός από την ενέργεια που εκλύει, παράγει επίσης το μέσο της αναπαραγωγής της, ήτοι τα νετρόνια. Έτσι, στους πυρηνικούς αντιδραστήρες λαμβάνει χώρα ένα ιδιαίτερο φαινόμενο από αλυσιδωτές σχάσεις που αυτοσυντηρούνται. Βέβαια, κάποια από τα νετρόνια που παράγονται κατά τις σχάσεις μπορεί να απορροφηθούν από υλικά που δεν είναι ικανά προς σχάση ή να διαφύγουν από την επιφάνεια του αντιδραστήρα. Στην περίπτωση αυτή, γίνεται λόγος για απώλεια νετρονίων στη διαδικασία αυτοσυντήρησης της αλυσιδωτής αντίδρασης σχάσης.

Για να είναι, βέβαια, εκμεταλλεύσιμη η ενέργεια (θερμότητα) που εκλύεται από τις σχάσεις απαιτείται κάποιο ψυκτικό υλικό για να απάγει τη θερμότητα από το καύσιμο και να τη μεταφέρει έξω από την «καρδιά» (πυρήνα) του αντιδραστήρα για την τελική της χρήση (ηλεκτροπαραγωγή). Επιπλέον, στην όλη διαδικασία είναι απαραίτητο να υπάρχει κάποιου είδους έλεγχος. Στους πυρηνικούς αντιδραστήρες, ο ρυθμός των σχάσεων, άρα και η θερμική ισχύς του αντιδραστήρα, είναι κατά προσέγγιση ανάλογη με το πλήθος των νετρονίων στην καρδιά του. Έτσι, για τον έλεγχο της παραγόμενης ισχύος απαιτείται ο έλεγχος του συνολικού αριθμού των νετρονίων κι επομένως του ισοζυγίου μεταξύ του ρυθμού παραγωγής και απώλειας τους. Αυτό υλοποιείται με τη βοήθεια ενός **συντελεστή πολλαπλασιασμού k** που ορίζεται ως εξής:

$$k = \frac{\text{αριθμός σχάσεων σε μία γενιά}}{\text{αριθμός σχάσεων προηγούμενης γενιάς}}$$

Διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

- $k > 1$: Ο αριθμός των σχάσεων αυξάνεται από γενιά σε γενιά κι επομένως η ενέργεια που εκλύεται μέσα στον αντιδραστήρα αυξάνεται προοδευτικά με την πάροδο του χρόνου. Πρόκειται για υπερκρίσιμο σύστημα.

- $k < 1$: Ο αριθμός των σχάσεων φθίνει με την πάροδο του χρόνου κι άρα μιλάμε για υποκρίσιμο σύστημα.
- $k = 1$: Ο αριθμός των σχάσεων παραμένει αναλλοίωτος από γενιά σε γενιά κι επομένως η ενέργεια που απελευθερώνεται είναι σταθερή. Το σύστημα είναι κρίσιμο.

Έτσι, για την αύξηση της ενέργειας που παράγεται από τον αντιδραστήρα μεταβάλλουμε την τιμή του k ώστε να ξεπεράσει τη μονάδα και το σύστημα να γίνει υπερκρίσιμο. Μόλις, η παραγόμενη ενέργεια φθάσει την επιθυμητή τιμή, μεταβάλλουμε εκ νέου το k έτσι ώστε το σύστημα να γίνει κρίσιμο ($k=1$). Τέλος, για να μειώσουμε την παραγόμενη ενέργεια ή να απενεργοποιήσουμε τον αντιδραστήρα μειώνουμε την τιμή του k ώστε να γίνει ελαφρώς μικρότερη της μονάδας.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να ορίσουμε ακόμη μια παράμετρο, η οποία θα μας διευκολύνει στην περαιτέρω μελέτη της λειτουργίας των πυρηνικών αντιδραστήρων. Ορίζουμε έτσι το δείκτη η ως εξής

$$\eta = \frac{\text{αριθμός νετρονίων που απελευθερώνονται κατά τη σχάση}}{\text{αριθμός νετρονίων που απορροφούνται από το σχάσιμο πυρήνα}}$$

3.2.2 Πυρηνικά καύσιμα

Όπως αναφέρθηκε, η λειτουργία του πυρηνικού αντιδραστήρα στηρίζεται στην αυτοσυντήρητη αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης. Ωστόσο, δεν είναι όλα τα ισότοπα ικανά να συντηρήσουν μια τέτοια διαδικασία. Για να είναι δυνατή η αυτοσυντήρηση της αλυσιδωτής αντίδρασης σχάσης απαιτείται ο αριθμός των νετρονίων που απελευθερώνονται σε κάθε σχάση να είναι τουλάχιστον ίσος με τον αριθμό των νετρονίων που απορροφώνται από τους σχάσιμους πυρήνες ($\eta \geq 1$). Πρακτικά, αυτό σημαίνει πως κάθε γενιά σχάσεων πρέπει να παράγει περισσότερα νετρόνια από αυτά που την προκάλεσαν, καθώς αναπόφευκτα κάποια από αυτά θα διαφύγουν εκτός του αντιδραστήρα ή θα απορροφηθούν από αυτόν.

Λαμβάνοντας υπόψη αυτό τον περιορισμό υποψήφιοι ως πυρηνικά καύσιμα καθίστανται οι σχάσιμοι πυρήνες U-233, U-235, Pu -239, Pu-241 καθώς και τα ισότοπα U-238, Pu-240, Pu-242 και το Th-232. Ωστόσο, σύμφωνα με τα όσα αναλύθηκαν στην §3.1.1, η διαδικασία της σχάσης χαρακτηρίζεται από ένα κατώφλι ενέργειας. Έτσι, για την πρόσκληση σχάσης των πυρήνων U-238, Pu-240, Pu-242 και το Th-232 η ενέργεια των νετρονίων που θα παράγονται από κάθε γενιά σχάσεων πρέπει να υπερβαίνει αυτό το κατώφλι ενέργειας, ήτοι το 1MeV. Στην πράξη, όμως, αν κι ένα ποσοστό των νετρονίων που προκύπτουν από τη σχάση των πυρήνων αυτών έχει ενέργεια μεγαλύτερη από το κατώφλι, τα περισσότερα επιβραδύνονται με σκεδάσεις σε ενέργειες χαμηλότερες από την απαιτούμενη. Το γεγονός αυτό καθιστά αδύνατη τη σχεδίαση κρίσιμης διάταξης με πυρηνικό καύσιμο οποιοδήποτε από τους πυρήνες αυτούς.

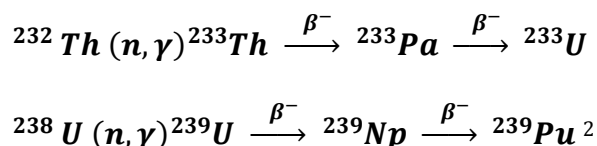
Όσον αφορά τους σχάσιμους πυρήνες U-233, U-235, Pu -239, Pu-241, αν και πληρούν τις προϋποθέσεις που απαιτούνται για τη συντήρηση της αλυσιδωτής αντίδρασης σχάσης, από αυτούς μόνο το U-235 βρίσκεται στη φύση σε αξιόλογες ποσότητες ως συστατικό του φυσικού ουρανίου σε ποσοστό 0,7% κατά βάρος. Το υπόλοιπο φυσικό ουράνιο, εκτός από κάποια ίχνη U-234 (περιεκτικότητα μικρότερη από 0,005% κατά βάρος), αποτελείται από U-238 σε ποσοστό 99,3% κατά βάρος. Παρά την χαμηλή περιεκτικότητά του ως προς το σχάσιμο ισότοπο, το φυσικό ουράνιο είναι σε θέση να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε ορισμένους τύπους αντιδραστήρων. Ωστόσο, η χαμηλή τιμή του συντελεστή η του φυσικού ουρανίου ($\eta=1,33$) θέτει σημαντικούς περιορισμούς στην επιλογή των υλικών της καρδιάς του αντιδραστήρα, καθώς επιβάλλει να έχουν μικρές διατομές απορρόφησης των

νετρονίων για να είναι δυνατή η υλοποίηση (υπερ)κρίσιμων διατάξεων. Για το λόγο αυτό, η πλειοψηφία των σύγχρονων πυρηνικών αντιδραστήρων χρησιμοποιεί εμπλουτισμένο ουράνιο.

Εμπλουτισμένο (enriched uranium) ονομάζεται το ουράνιο που περιέχει U-235 σε ποσοστό μεγαλύτερο από το 0,7% κατά βάρος του φυσικού ουρανίου. Εμπλουτισμός του καυσίμου ονομάζεται ο λόγος της μάζας U-235 προς τη μάζα U-235 και U-238 του καυσίμου. Ο εμπλουτισμός του ουρανίου στους σύγχρονους θερμικούς αντιδραστήρες φτάνει μέχρι το 3% περίπου. Με τον εμπλουτισμό αυξάνεται ο συντελεστής η του καυσίμου με αποτέλεσμα να διευκολύνεται η επίτευξη κρίσιμων συστημάτων με λιγότερους περιορισμούς στην επιλογή των υλικών της καρδιάς του αντιδραστήρα. Από την άλλη πλευρά το κόστος του εμπλουτισμένου ουρανίου είναι μεγάλο και για τις χώρες που δεν έχουν τις απαιτούμενες εγκαταστάσεις και τεχνολογία εμπλουτισμού δημιουργεί εξαρτήσεις από άλλα κράτη.

Συνοπτικά, με ή χωρίς εμπλουτισμό, στους θερμικούς αντιδραστήρες ουρανίου χρησιμοποιείται ελάχιστο ποσοστό του φυσικού ουρανίου. Το ποσό του φυσικού ουρανίου που μπορεί, θεωρητικά, να χρησιμοποιηθεί είναι το άθροισμα U-235 και του Pu-239 που παρήχθη από U-238. Αυτό, ως ποσοστό του φυσικού ουρανίου είναι ~4,1% σε αντιδραστήρες φυσικού ουρανίου και ~2% σε αντιδραστήρες εμπλουτισμένου ουρανίου. Οι πραγματικές τιμές είναι ακόμη χαμηλότερες, περίπου το μισό των θεωρητικών τιμών.

Ένα ακόμη πρόβλημα, προκύπτει από το γεγονός πως, όπως συμβαίνει με όλες τις φυσικές πηγές, η ποσότητα του διαθέσιμου ουρανίου U-235 είναι περιορισμένη. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται πως αν η πυρηνική ενέργεια στηριζόταν μόνο στη σχάση ουρανίου U-235, τότε η «πυρηνική εποχή» δε διαρκούσε περισσότερο από ένα αιώνα. Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα μας δίνει η **διαδικασία μετατροπής (conversion)**, που μας επιτρέπει να παράγουμε σχάσιμα ισότοπα από μη σχάσιμα υλικά. Τα σημαντικότερα ισότοπα που παράγονται τεχνητά με την προαναφερθείσα τεχνική είναι το ουράνιο U-233 και το πλουτώνιο Pu-239. Οι πυρήνες αυτοί δεν απαντώνται στη φύση και προκύπτουν από το θόριο Th-232 και το ουράνιο U-238 μέσω της απορρόφησης νετρονίων σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



Οι πυρήνες που μετασηματίζονται σε σχάσιμους με την απορρόφηση νετρονίων, όπως το Th-232 και το U-238, καλούνται **γόνιμοι (fertile)**. Ακόμη και μετά τη διαδικασία εμπλουτισμού, όμως, το μέγιστο ποσοστό του καυσίμου εξακολουθεί να είναι το U-238, σε περιεκτικότητα υψηλότερη από 97%. Έτσι, σε όλους τους αντιδραστήρες ουρανίου πραγματοποιείται μετατροπή του U – 238 σε σχάσιμο Pu – 239.

Για την περιγραφή της διαδικασίας μετατροπής, χρησιμοποιείται μια παράμετρος που καλείται **λόγος μετατροπής (conversion ratio)** κι ορίζεται ως εξής:

$$CR = \frac{\text{μέσος ρυθμός παραγωγής σχάσιμων πυρήνων}}{\text{μέσος ρυθμός καταστροφής σχάσιμων πυρήνων}}$$

Πρακτικά, ο δείκτης αυτός υποδεικνύει πως για κάθε N άτομα καυσίμου που καταναλώνονται, (N * CR) άτομα γόνιμου υλικού μετατρέπονται σε σχάσιμο. Έτσι, στην

επόμενη επανάληψη της διαδικασίας θα πάρουμε $(N * CR) * CR = NCR^2$ άτομα σχάσιμοι υλικού, στην τρίτη επανάληψη NCR^3 κ.ο.κ. Ο ρυθμός παραγωγής σχάσιμων πυρήνων ακολουθεί, λοιπόν, μια γεωμετρική πρόοδο, άρα για την ποσότητα σχάσιμου υλικού στο τέλος της διαδικασίας θα ισχύει:

$$NCR + NCR^2 + NCR^3 + \dots = \frac{NCR}{1 - CR}$$

Δεδομένου, ότι $CR < 1$. Τυπικά για τους αντιδραστήρες φυσικού ουρανίου είναι $CR = 0,83$ περίπου ενώ για εκείνους που χρησιμοποιούν εμπλουτισμένο ουράνιο ισχύει $CR \leq 0,65$.

Επιπλέον, όπως προκύπτει από την παραπάνω σχέση αν ο λόγος μετατροπής γινόταν ίσος με 1 θα ήταν δυνατή η μετατροπή άπειρου γόνιμου υλικού με μια πεπερασμένη ποσότητα καυσίμου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, παρουσιάζει και η περίπτωση για $CR > 1$. Τότε ο αντιδραστήρας θα παρήγαγε περισσότερο σχάσιμο υλικό από αυτό που κατανάλωνε. Τέτοιοι αντιδραστήρες χαρακτηρίζονται **αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες (breeder reactors or breeders)** κι ο λόγος μετατροπής καλείται **λόγος αναπαραγωγής (breeding ratio)**. Οι αντιδραστήρες που μετατρέπουν αλλά δεν αναπαράγουν, καλούνται **αντιδραστήρες μετατροπής (converters)**. Για το σχεδιασμό ένας συστήματος κατάλληλου για μετατροπή απαιτείται $\eta > 1$, ενώ για το σχεδιασμό ενός αναπαραγωγικού θερμικού αντιδραστήρα απαιτείται $\eta > 2$.

Μια σημαντική παράμετρος στους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες είναι ο **χρόνος διπλασιασμού στον αντιδραστήρα D_R** . Ο χρόνος αυτός ορίζεται ως το διάστημα που απαιτείται για να παράγει ο αντιδραστήρας ποσότητα σχάσιμου υλικού ίση με την αρχική ποσότητα του, επιπλέον αυτής που χρειάζεται ο ίδιος για τη συνεχή λειτουργία του, ήτοι ποσότητα ικανή για τη συνέχιση της λειτουργίας του κι επιπλέον ποσότητα σχάσιμου υλικού ικανή για την εκκίνηση ενός άλλου ίδιου αντιδραστήρα. Ο χρόνος αυτός είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, όπως ο λόγος αναπαραγωγής, η ισχύς του αντιδραστήρα, η θερμική του απόδοση κτλ. Οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες θα έχουν αξιόλογη συμβολή στη λύση του ενεργειακού προβλήματος αν ο χρόνος D_R είναι περίπου ίσος με το χρόνο διπλασιασμού της ζήτησης ενέργειας (περίπου 10-15 έτη).

Οι παραπάνω προδιαγραφές για την επίτευξη αναπαραγωγής πληρούνται από τους **αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων (fast reactors)**. Πρόκειται για αντιδραστήρες στους οποίους η πλειοψηφία των σχάσεων πραγματοποιείται με ταχέα νετρόνια, δηλαδή νετρόνια ενέργειας από 100 keV έως ~15 MeV. Στην περιοχή αυτή ο συντελεστής η είναι σημαντικά μεγαλύτερος από 2, οπότε η αναπαραγωγή καθίσταται πρακτικά υλοποιήσιμη. Οι αντιδραστήρες αυτοί χρειάζονται εμπλουτισμένο καύσιμο (20% περίπου) για τη λειτουργία τους, ενώ για τη σχεδίαση τους απαιτούνται υλικά με μεγάλο μαζικό αριθμό προκειμένου να περιοριστεί η επιβράδυνση των νετρονίων. Στους σύγχρονους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων, που ψύχονται με υγρό νάτριο, υπολογίζεται ότι είναι πραγματοποιήσιμος λόγος αναπαραγωγής περίπου ίσος με 1,2. Ο χρόνος διπλασιασμού σε τέτοιο αντιδραστήρα εκτιμάται ότι είναι περίπου 10 με 15 έτη.

3.2.3 Η πρώτη ύλη: το ουράνιο

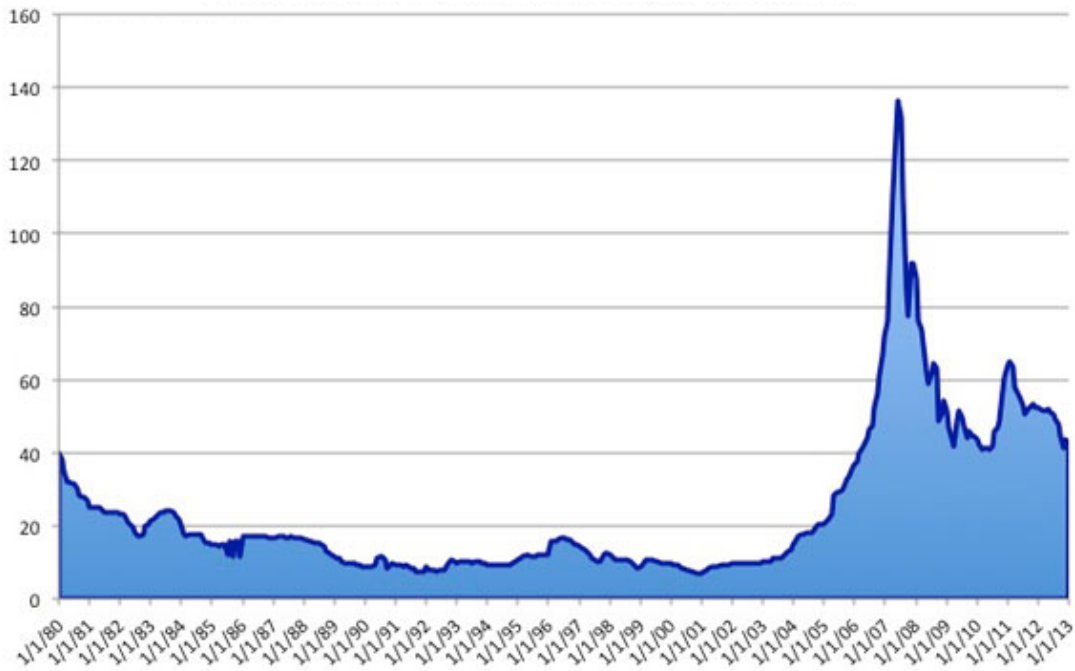
Το ουράνιο αποτελεί ένα σχετικά κοινό στοιχείο που απαντάται σε σημαντικές αλλά πεπερασμένες ποσότητες σε όλο τον κόσμο. Πρόκειται για ένα ελαφρώς ραδιενεργό μέταλλο, περίπου εξίσου κοινό με τον κασσίτερο και 500 φορές αφθονότερο από το χρυσό. Βρίσκεται στους περισσότερους βράχους και χώματα, καθώς και σε πολλούς ποταμούς και στο θαλασσινό νερό. Το μεγαλύτερο μέρος της ραδιενέργειας που σχετίζεται με το ουράνιο στη φύση οφείλεται στην πραγματικότητα σε άλλα μεταλλεύματα που προέρχονται από

αυτό μέσω των ραδιενεργών διαδικασιών αποσύνθεσης και τα οποία προκύπτουν ως κατάλοιπα από την μεταλλεία και την άλεση. Σήμερα, μεταλλεία ουρανίου υπάρχουν σε 9 μόνο χώρες στον κόσμο, με τον Καναδά και την Αυστραλία να κρατούν τα ηνία της παραγωγής, ελέγχοντας περισσότερο από το 50% της ποσότητας που εξορύσσεται διεθνώς. Πριν χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο στους πυρηνικούς αντιδραστήρες το ορυκτό ουράνιο πρέπει να υποστεί ειδική επεξεργασία. Το σύνολο αυτών των εργασιών που ξεκινούν με την εξόρυξη του ουρανίου έως και την τελική διάθεση των πυρηνικών αποβλήτων και σχετίζονται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικές αντιδράσεις, αναφέρεται συλλογικά ως **κύκλος καυσίμου (fuel cycle)**.

Στην Ελλάδα, σημαντικά κοιτάσματα ουρανίου, που σύμφωνα με εκτιμήσεις φθάνουν τους 10.000 τόνους, υπάρχουν στο υπέδαφος της Βορείου Ελλάδος, κυρίως στην περιοχή της Δράμας και των Σερρών [27]. Επίσης, αξιοποιήσιμες ποσότητες ουρανίου εικάζεται πως υπάρχουν και στις υποθαλάσσιες περιοχές του Αιγαίου, σύμφωνα με έκθεση του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) που παρουσιάστηκε πρόσφατα σε Διεθνές Συνέδριο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας. Παρά τις αισιόδοξες εκτιμήσεις, ωστόσο, τα επιβεβαιωμένα αποθέματα ουρανίου στη Βόρεια Ελλάδα είναι μόλις 1.525 τόνοι κι επαρκούν για 20ετή αυτόνομη λειτουργία πυρηνικού αντιδραστήρα PWR με δυνατότητα ημερήσιας παραγωγής 1000MW [27].

Η «παραδοσιακή» εξόρυξη του φυσικού ουρανίου δε διαφέρει τεχνικά από τις διαδικασίες, επιφανειακές ή υπόγειες, που ακολουθούνται για τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα. Μια νέα μέθοδος που έχει αναπτυχθεί, επίσης, είναι η «επί τόπου εκχύλιση». Σύμφωνα με αυτήν, κάποια εκχυλιστική ουσία (ως επί το πλείστον θειικό οξύ) εισάγεται από γεωτρήσεις στο κοιτάσμα και στη συνέχεια αντλείται το διάλυμα που περιέχει ουράνιο και άλλα μέταλλα. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η σχεδόν αναπόφευκτη ρύπανση των υπόγειων υδάτων. Όμως και οι «παραδοσιακές» μέθοδοι εξόρυξης κι εμπλουτισμού συνδέονται με μια σειρά από κινδύνους, οι οποίοι σχετίζονται κυρίως, με την απόθεση των τελμάτων εμπλουτισμού, που εξαιτίας των χαμηλών συγκεντρώσεων ουρανίου στα κοιτάσματα, είναι συχνά περίπου ίση με την ποσότητα αρχικού μεταλλεύματος. Αναλυτικότερα, τεχνικοί περιορισμοί καθιστούν αδύνατη την πλήρη εξόρυξη του κοιτάσματος με αποτέλεσμα το 85% της αρχικής ραδιενέργειας να παραμένει στα τέλματα (σε αυτή συμπεριλαμβάνονται και βαρέα ραδιενεργά στοιχεία, όπως το ράδιο και το θόριο). Επιπλέον, οι σωροί των τελμάτων απελευθερώνουν ραδιενεργό ραδόνιο-222 σε αέρια μορφή, το οποίο παράγεται διαρκώς από τη διάσπαση ραδίου-226 (προϊόν του θόριου-230). Υπολογίζεται πως απαιτούνται περίπου ένα εκατομμύριο χρόνια, για να μειωθεί η ακτινοβολία του σωρού των τελμάτων σε επίπεδο περίπου 33 φορές υψηλότερο από εκείνη μη ραδιενεργών εδαφών. Στο επίπεδο αυτό σταθεροποιείται χωρίς να υφίσταται πρακτικά περαιτέρω εξασθένιση. Για το λόγο αυτό, μετά την εξάντληση των κοιτασμάτων, τα ορυχεία πρέπει να σφραγίζονται και να θωρακίζονται κατάλληλα ώστε να αποφεύγεται η απελευθέρωση ραδιενεργών στοιχείων και άλλων τοξικών βαρέων μετάλλων (όπως μολυβδαίνιου, σελήνιου, βανάδιου, μολύβδου, ψευδάργυρου, καδμίου, αρσενικού κτλ) στο περιβάλλον.

Τέλος, στο διάγραμμα της εικόνας 19 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο διακυμαίνεται η τιμή του ουρανίου τα τελευταία χρόνια. Οι τιμές που αναγράφονται στη γραφική παράσταση δίνονται σε USD per round. Μετά από μία απότομη άνοδο στην τιμή του ουρανίου που έφθασε τα 220 ευρώ/kg στις αρχές του 2007 (λαμβάνοντας υπόψη την ισοτιμία εκείνης της περιόδου), πλέον οι τιμές του ουρανίου βρίσκονται σε σαφώς χαμηλότερα επίπεδα με την τιμή του να διαμορφώνεται σήμερα στα 60€/kg (40 \$/round).



Εικόνα 19 : Διακύμανση της τιμής του ουρανίου ανά έτος μέχρι σήμερα (\$/pound) [28]

3.2.4 Βασική δομή και λειτουργία πυρηνικού αντιδραστήρα

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση μας, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούμε στα κύρια δομικά στοιχεία των πυρηνικών αντιδραστήρων και τις βασικές τους λειτουργίες. Με τον όρο πυρηνικός αντιδραστήρας αναφερόμαστε σε μια διάταξη κατάλληλη σχεδιασμένη ώστε να πραγματοποιείται ελεγχόμενη αυτοσυντήρητη αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης. Το κεντρικό μέρος της διάταξης στο οποίο πραγματοποιούνται οι σχάσεις αποτελεί την **καρδιά ή πυρήνα (core or driver)** του αντιδραστήρα και περικλείει τις ράβδους καυσίμου, τον επιβραδυντή και τις ράβδους ελέγχου. Εξαιρέση αποτελούν οι αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων, όπου δεν υπάρχει επιβραδυντής.



Εικόνα 20: Δισκία καυσίμου [29]

Απαραίτητη για τη λειτουργία κάθε αντιδραστήρα είναι φυσικά η ύπαρξη κάποιου είδους καυσίμου, το οποίο ονομάζεται **πυρηνικό καύσιμο(nuclear fuel)** και αναφέρεται στο υλικό που περιέχει τους σχάσιμους πυρήνες. Παρ' όλα αυτά, το καύσιμο μπορεί να περιέχει και μεγάλες ποσότητες γόνιμου υλικού. Το σχάσιμο υλικό του πυρήνα είναι υπεύθυνο τόσο για τη αυτοσυντήρηση της αλυσιδωτής διαδικασίας σχάσεων, όσο και για τη διατήρηση της κρισιμότητας του συστήματος. Στην πλειοψηφία των σύγχρονων πυρηνικών αντιδραστήρων (θερμικοί αντιδραστήρες) το καύσιμο είναι εμπλουτισμένο ουράνιο και βρίσκεται μέσα σε δισκία (εικόνα 20) τα οποία συγκρατούν τα στερεά προϊόντα της σχάσης και είναι τοποθετημένα σε ένα λεπτό, μεταλλικό, κυλινδρικό περίβλημα (fuel can, cladding). Το περίβλημα αυτό, το οποίο διασφαλίζει τον περιορισμό των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης στο εσωτερικό του και την ελαχιστοποίηση διαρροών ραδιενεργών υλικών στο κύκλωμα του αντιδραστήρα, μαζί με το ίδιο το καύσιμο αποτελούν τη **ράβδο καυσίμου**

(fuel rod). Σε κάθε αντιδραστήρα υπάρχουν περισσότερες από μία ράβδοι καυσίμου, οι οποίες είναι οργανωμένες σε συστάδες και περιέχουν το σύνολο του σχάσιμου υλικού, μέσα στο οποίο πραγματοποιούνται οι σχάσεις. Με τον όρο **συστάδα (ή υποσυστάδα) καυσίμου (fuel assembly, subassembly, bundle)** εννοούμε το σύνολο των ράβδων καυσίμου που είναι τοποθετημένες σε ένα ενιαίο συγκρότημα με συγκεκριμένη (μεταλλική συνήθως) δομή ώστε να διατηρείται η μεταξύ τους απόσταση. Σε κάποιες περιπτώσεις, η συστάδα καυσίμου περικλείεται από ένα μεταλλικό πολυγωνικό σωλήνα που ονομάζεται **περιτύλιγμα ή χιτώνιο** της συστάδας και αποτελεί δομικό της στοιχείο. Η κάθε συστάδα ως επί το πλείστον αποτελείται από μερικές δεκάδες ράβδους και αποτελεί τη μικρότερη μονάδα καυσίμου που μπορεί να τοποθετηθεί ή να απομακρυνθεί από την καρδιά του αντιδραστήρα. Τυπικά, ο πυρήνας του αντιδραστήρα περιλαμβάνει μερικές εκατοντάδες συστάδων.



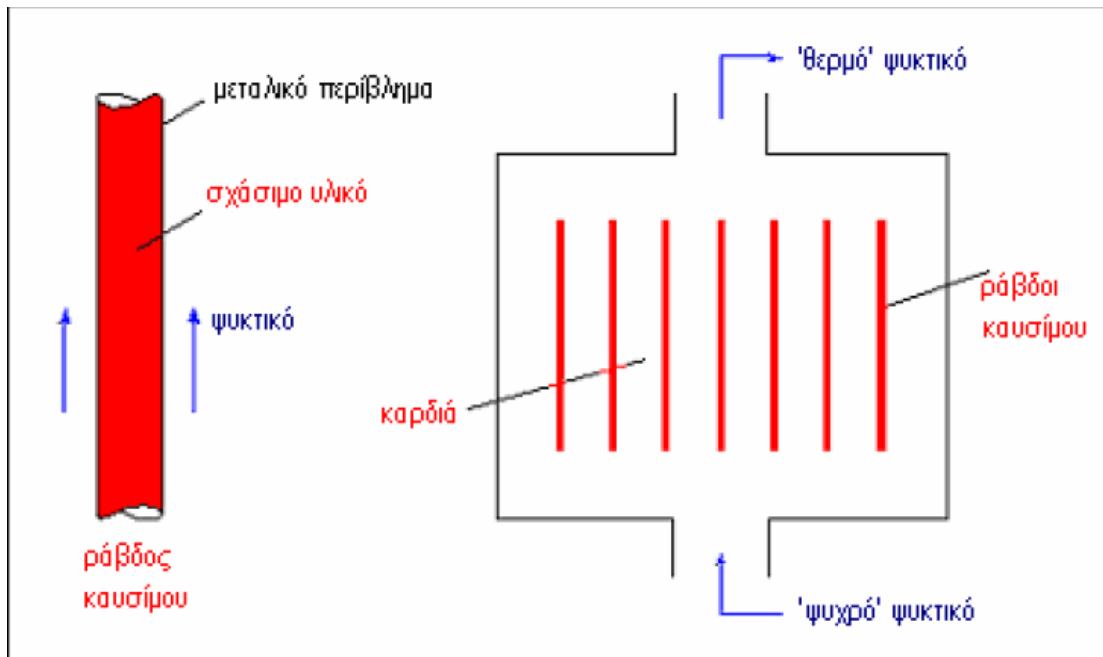
Εικόνα 21: Δεξαμενή εξαντλημένου καυσίμου: Ο ρόλος του νερού είναι διττός: εξασφαλίζει την απαραίτητη για τους εργαζομένους βιολογική θωράκιση και την ψύξη των ράβδων καυσίμου. [29]

Με την πάροδο του χρόνου, η ποσότητα του σχάσιμου υλικού του αντιδραστήρα μειώνεται λόγω των σχάσεων. Επιπλέον, η λειτουργική φθορά μειώνει τον εμπλουτισμό του καυσίμου και αυξάνει την ποσότητα των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης στις ράβδους καυσίμου. Το φαινόμενο αυτό, ήτοι η μείωση του εμπλουτισμού του καυσίμου λόγω των σχάσεων ονομάζεται **εξάντληση καυσίμου (fuel burnup)**. Όταν η εξάντληση των ράβδων καυσίμου υπερβεί κάποια ανώτατη τιμή οι συστάδες καυσίμου καθίστανται ακατάλληλες για τη διατήρηση της κρισιμότητας του αντιδραστήρα κι αντικαθίστανται. Έτσι, το εξαντλημένο καύσιμο ανανεώνεται διαρκώς με φρέσκο.

Οι συστάδες που απομακρύνονται από την καρδιά του αντιδραστήρα, αποθηκεύονται σε μια δεξαμενή νερού (**δεξαμενή εξαντλημένου καυσίμου - spent fuel pond** – εικόνα 21) για μερικούς μήνες μέχρις ότου τα επίπεδα ραδιενέργειας να μειωθούν αρκετά ώστε να μη θεωρούνται επιβλαβή για το περιβάλλον. Στη συνέχεια, απομακρύνονται από τον αντιδραστήρα και μεταφέρονται σε εργοστάσια ανακύκλωσης ή σε χώρους κατάλληλους για τη διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων.

Ο **επιβραδυντής (moderator)** χρησιμοποιείται στους θερμικούς αντιδραστήρες για την επιβράδυνση των ταχέων νετρονίων της σχάσης. Ως επί το πλείστον, αποτελείται από ράβδους γραφίτη που εσωκλείουν τις ράβδους καυσίμου. Σκοπός της διάταξης είναι η «εξουδετέρωση» των νετρονίων που κυκλοφορούν μέσα στον αντιδραστήρα προκειμένου είτε να πραγματοποιείται η σχάση στον επιθυμητό ρυθμό, είτε να σταματήσει εντελώς η σχάση και η παραγωγή νέων νετρονίων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ο έλεγχος της αλυσιδωτής αντίδρασης σχάσης. Σε αντίθετη περίπτωση, το πυρηνικό υλικό που περιέχεται στον αντιδραστήρα θα συνέχιζε να αντιδρά ταχύτατα εκλύοντας τεράστια ποσά ενέργειας και ακτινοβολίας. Τυπικά υλικά επιβραδυντών είναι, επίσης, το νερό και το βαρύ ύδωρ. Κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί και το βηρύλλιο (Be) και το οξείδιο του βηρυλλίου (BeO) – ένα λευκό κεραμικό υλικό-, αλλά έχουν υψηλό κόστος.

Οι **ράβδοι ελέγχου (control rods)** παρεμβάλλονται στον αντιδραστήρα και χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο αυτού. Πρόκειται για κινούμενα μέρη από υλικό



Εικόνα 22: Σχηματικό διάγραμμα απαγωγής θερμότητας από την καρδιά του αντιδραστήρα [29]

κατάλληλο για την απορρόφηση των νετρονίων. Οι ράβδοι ελέγχου ρυθμίζουν την παροχή των νετρονίων για διάσπαση. Αναλυτικότερα, καθώς απορροφούν νετρόνια, κάθε κίνηση τους μεταβάλλει το συντελεστή πολλαπλασιασμού k του αντιδραστήρα. Όταν οι ράβδοι ελέγχου προωθούνται αρκετά, απορροφούν τα περισσότερα από τα νετρόνια διάσπασης κι ως εκ τούτου ο συντελεστής k μειώνεται κι ο αριθμός των σχάσεων περιορίζεται. Όταν, οι ράβδοι ελέγχου αποσύρονται, όλο και περισσότερα νετρόνια διάσπασης είναι διαθέσιμα κι ως εκ τούτου ο συντελεστής k αυξάνεται κι η ένταση της αλυσιδωτής αντίδρασης αυξάνεται επίσης. Επομένως, με την εξαγωγή ή την εισαγωγή των ράβδων ελέγχου, επιτυγχάνεται η έναρξη κι η διακοπή λειτουργίας του αντιδραστήρα αντίστοιχα και προσαρμόζεται η παραγόμενη ισχύς στα επιθυμητά επίπεδα. Η διαδικασία αυτή γίνεται αυτόματα ανάλογα με την απαίτηση για την κάλυψη του φορτίου. 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 διατομή, κατάλληλη για τη σύλληψη νετρονίων), άφνιο ή κάδμιο (εξαιρετικά ικανά για τη θερμική απορρόφηση νετρονίων), ασήμι καθώς και διάφορα κράματα των παραπάνω μετάλλων. Το σχήμα τους είναι συνήθως κυλινδρικό, αλλά επίσης μπορεί να είναι φύλλα, λεπίδες ή λεπίδες σε σχήμα σταυρού, οπότε μιλάμε για σταυροειδείς ράβδους.

Γύρω από κάθε ράβδο καυσίμου ρέει κάποιο **ψυκτικό (coolant)** (νερό, βαρύ ύδωρ, διοξείδιο του άνθρακα, υγρό νάτριο, ήλιο κτλ) με σκοπό την απαγωγή των τεράστιων ποσών θερμότητας που απελευθερώνονται σε κάθε σχάση (εικόνα 22). Χάρη σε αυτό το σύστημα η θερμότητα που παράγεται οδηγείται έξω από την καρδιά του αντιδραστήρα στον εναλλάκτη θερμότητας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Νερό, βαρύ ύδωρ και κάποια αέρια είναι τα πιο συνηθισμένα ψυκτικά για θερμικούς αντιδραστήρες. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται νερό ή βαρύ ύδωρ, το ψυκτικό χρησιμεύει συχνά κι ως επιβραδυντής. Στους αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων, το νερό και το βαρύ ύδωρ δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ψυκτικά, τουλάχιστον σε υγρή μορφή, καθώς τα υλικά αυτά τείνουν να επιβραδύνουν τα νετρόνια σχάσης, τα οποία στο

συγκεκριμένο τύπο αντιδραστήρων πρέπει να διατηρούν υψηλά επίπεδα ενέργειας. Συνήθως, οι διατάξεις αυτές ψύχονται με τη χρήση υγρού νατρίου. Το νάτριο, με ατομικό βάρος 23, έχει εξαιρετικές θερμικές ιδιότητες, χωρίς να επιβραδύνει τα νετρόνια σχάσης μέσω ελαστικών σκεδάσεων. (Παρ' όλα αυτά, εξακολουθούν να συμβαίνουν ανελαστικές σκεδάσεις που μειώνουν την ενέργεια των νετρονίων σχάσης.) Τέλος, πολλά αέρια είναι επίσης κατάλληλα ψυκτικά για τους αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων.

Στους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες, γύρω από την καρδιά του αντιδραστήρα υπάρχει μια περιοχή με γόνιμο υλικό, που καλείται **μανδύας επώασης (blanket)** και είναι ειδικά σχεδιασμένη για μετατροπή ή αναπαραγωγή. Συγκεκριμένα, τα νετρόνια που διαφεύγουν από την καρδιά του αντιδραστήρα εισέρχονται στον μανδύα επώασης και χρησιμοποιούνται στις αντιδράσεις μετατροπής. Η περιοχή αυτή ψύχεται όπως και η καρδιά, καθώς υπάρχει η πιθανότητα ταχέα νετρόνια να διαφύγουν από την καρδιά του αντιδραστήρα και να εισέλθουν στο μανδύα επώασης προκαλώντας σχάσεις και εκλύοντας μεγάλα ποσά ενέργειας.

Ο μανδύας επώασης (ή η ίδια του καρδιά του αντιδραστήρα όταν αυτός δεν υπάρχει) περικλείεται από τον **ανακλαστή (reflector)**. Σκοπός αυτού του υλικού είναι η ανάκλαση των νετρονίων που διαφεύγουν από τον πυρήνα του αντιδραστήρα προκειμένου να επιστρέψουν σε αυτόν και να μειωθούν οι απώλειες. Η διάταξη είναι ιδιαίτερα σημαντική και παίζει καθοριστικό ρόλο στην ελάττωση της ποσότητας καυσίμου που απαιτείται για να είναι ένας αντιδραστήρας κρίσιμος. Το υλικό του ανακλαστή πρέπει να έχει μικρή διατομή απορρόφησης και μεγάλη διατομή σκέδασης των νετρονίων, δηλαδή ιδιότητες ίδιες με του επιβραδυντή. Για το λόγο αυτό τα υλικά που επιλέγονται για την υλοποίηση των δύο συστημάτων είναι σχεδόν πάντοτε τα ίδια.

Δεδομένου πως η καρδιά του αντιδραστήρα περιέχει τα προϊόντα της σχάσης, αποτελεί μια ισχυρή πηγή ραδιενέργειας, από την οποία διαφεύγουν νετρόνια και ακτινοβολίες β και γ με συνέπεια την καταπόνηση των υλικών των λειτουργικών μονάδων που την περιβάλλουν. Η σύγκρουση των νετρονίων με τους πυρήνες των υλικών της διάταξης προκαλεί αλλοιώσεις της δομής και κατά συνέπεια των ιδιοτήτων τους. Τόσο τα νετρόνια όσο και τα άλλα σωματίδια που διαφεύγουν από την καρδιά του αντιδραστήρα, εναποθέτουν ενέργεια στα υλικά καθώς συγκρούονται με ή απορροφώνται από τους πυρήνες αυτών. Δημιουργούνται, έτσι, διάσπαρτες πηγές θερμότητας στα υλικά γύρω από την καρδιά με αποτέλεσμα την ανάπτυξη διαφορικών θερμικών τάσεων και την καταπόνηση των υλικών. Για το λόγο αυτό, μεταξύ της καρδιάς και των εξαρτημάτων του αντιδραστήρα παρεμβάλλεται σιδηρό ή χαλύβδινο έλασμα, πάχους μερικών εκατοστών, με σκοπό την απορρόφηση των ακτινοβολιών και τη μείωση της έντασης τους εντός των ανεκτών ορίων για την προστασία των υλικών. Το έλασμα αυτό ονομάζεται **θερμική θωράκιση (thermal shield)**.

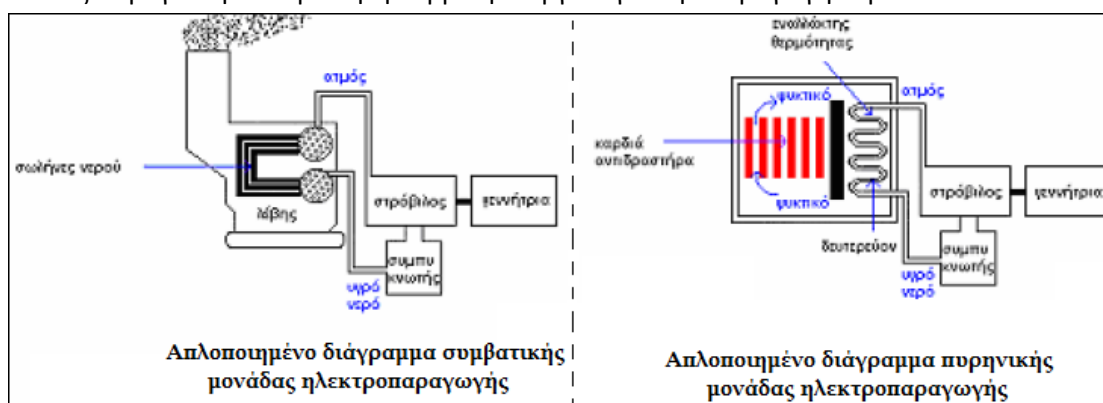
Οι παραπάνω διατάξεις περιέχονται συνήθως μέσα σε ένα δοχείο που βρίσκεται υπό πίεση και γι αυτό καλείται **δοχείο πίεσης (pressure vessel)**. Επιπλέον, για την προστασία των εργαζομένων στα πυρηνικά εργοστάσια το δοχείο περιβάλλεται από ένα είδος βιολογικής θωράκισης (shield) που στόχο έχει την εξασθένηση των ακτινοβολιών. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η θωράκιση αυτή είναι κοινό νερό ή σκυρόδεμα πάχους λίγων μέτρων.

Εν κατακλείδι, όλο το δοχείο πίεσης κι όλα τα άλλα εξαρτήματα που περιέχουν πηγές ραδιενέργειας, περιβάλλονται από το **δοχείο εγκλωβισμού (containment vessel)**. Αυτό είναι συνήθως κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα με πάχος μεγαλύτερο του ενός μέτρου και επενδύεται εσωτερικά με στεγανό χαλύβδινο έλασμα. Σκοπός του είναι η προστασία από τη διαρροή επικίνδυνων υλικών στο περιβάλλον σε περίπτωση ατυχήματος και είναι σχεδιασμένο ώστε να μην δημιουργούνται διαρροές ραδιενεργών υλικών ακόμη και κάτω από ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Υπό συνήθεις συνθήκες ομαλής λειτουργίας, η πίεση εντός του δοχείου είναι ελαφρώς υψηλότερη από την ατμοσφαιρική

προκειμένου να αποφευχθούν διαρροές αέρα από το δοχείο προς το περιβάλλον. Επιπλέον, καθώς ο χώρος αυτός είναι προσβάσιμος στο προσωπικό ελέγχεται συστηματικά από ανιχνευτές και καθαρίζεται από φίλτρα ώστε να διασφαλίζεται πως δεν υπάρχουν αιωρούμενα ραδιενεργά σωματίδια ή επιβλαβείς ακτινοβολίες.

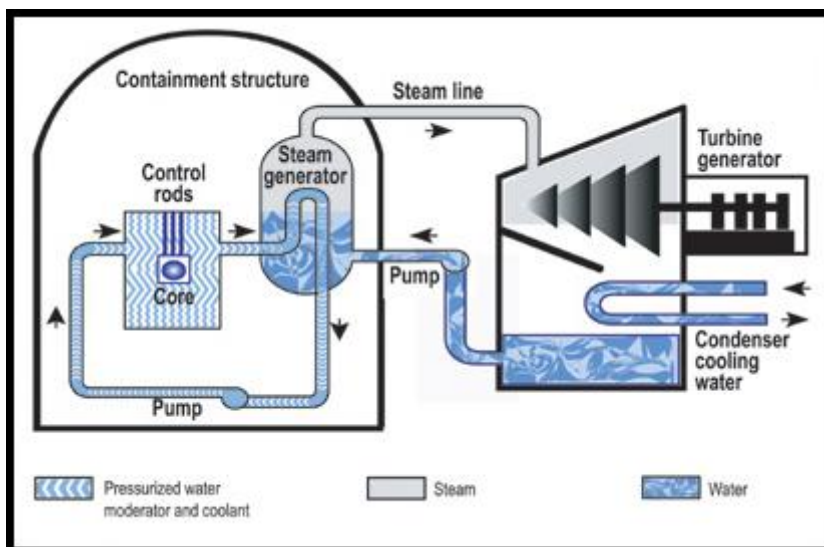
3.2.5 Ηλεκτροπαραγωγή από πυρηνικούς σταθμούς

Ο κύκλος παραγωγής στους πυρηνικούς σταθμούς είναι στη βάση της λογικής του ίδιος με εκείνος των συμβατικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ειδοποιός διαφορά, η οποία φαίνεται στην εικόνα 23, έγκειται στο γεγονός ότι στα πυρηνικά εργοστάσια ο λέβητας έχει στην ουσία αντικατασταθεί από τον πυρηνικό αντιδραστήρα, ο οποίος παράγει την απαραίτητη θερμική ενέργεια για την παραγωγή ατμού.



Εικόνα 23: Απλοποιημένα διαγράμματα συμβατικής και πυρηνικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [29]

Αναλυτικότερα, η ενέργεια, που απελευθερώνεται από τη σχάση στον αντιδραστήρα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού- είτε απευθείας (άμεσος θερμοδυναμικός κύκλος) είτε με τη μεσολάβηση ενός εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ της καρδιάς του αντιδραστήρα και του ατμοστροβίλου (έμμεσος θερμοδυναμικός κύκλος). Στον έμμεσο θερμοδυναμικό κύκλο, ο πυρηνικός αντιδραστήρας χρησιμοποιεί τις ράβδους καυσίμου (συνήθως από ουράνιο ή πλουτώνιο) για τη θέρμανση ενός ψυκτικού υγρού το οποίο βγαίνει από την καρδιά του αντιδραστήρα σε πολύ υψηλή πίεση και θερμοκρασία και οδηγείται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας, όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα της εικόνας 24. Μέσω αυτού επιτυγχάνεται η μεταφορά της θερμότητας στο κύκλωμα νερού ή δευτερεύον κύκλωμα ψυκτικού, όπως ονομάζεται. Έτσι, το ψυκτικό της καρδιάς βγαίνει από τον εναλλάκτη σχετικά πιο ψυχρό και επιστρέφει στην είσοδο της καρδιάς για την πραγματοποίηση της ψύξης και την επανάληψη του κύκλου. Ταυτόχρονα, ο ατμός που παράγεται από το βρασμό του νερού στην έξοδο του δευτερεύοντος συστήματος ψύξης οδηγείται στο στρόβιλο και τον κινεί. Αφού θέσει σε κίνηση το στρόβιλο, ο ατμός οδηγείται στο ψυγείο όπου υγροποιείται και στη συνέχεια κατευθύνεται και πάλι στην είσοδο του δευτερεύοντος για τον επόμενο κύκλο. Στον άμεσο θερμοδυναμικό κύκλο ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία με τη διαφορά ότι το ψυκτικό είναι νερό και η παραγωγή ατμού γίνεται με το βρασμό του ίδιου του ψυκτικού στην καρδιά του αντιδραστήρα. Στη συνέχεια, ο ατμός οδηγείται από την έξοδο της καρδιάς απευθείας στην είσοδο του ατμοστροβίλου. Στην εικόνα 23 φαίνεται σχηματικά η λειτουργία ενός τυπικού πυρηνικού σταθμού.



Εικόνα 24: Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας πυρηνικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής [30]

Στον πυρηνικό αντιδραστήρα η θερμότητα παράγεται μέσα στις ράβδους καυσίμου χωρίς να υπάρχει κάποιος πρακτικός περιορισμός ως προς τη δυνατότητα θερμικής ισχύος που μπορεί να παραχθεί. Έτσι, μια μη ελεγχόμενη αύξηση της ισχύος του αντιδραστήρα πέραν της καθορισμένης τιμής ή κάποια μείωση της ροής του ψυκτικού θα είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας στις ράβδους καυσίμου του αντιδραστήρα. Εάν η θερμοκρασία υπερβεί το σημείο τήξης του περιβλήματος της ράβδου, αυτό θα αρχίσει να λιώνει με συνέπειες που μπορούν να οδηγήσουν σε συμβάν (incident) ή ατύχημα (accident), αναλόγως της έκβασης και της έγκαιρης ή μη αντιμετώπισης της κατάστασης. Για το λόγο αυτό, οι απαιτήσεις αξιοπιστίας και οι προδιαγραφές ασφάλειας για το σύστημα ψύξης και τις αντοχές των υλικών στα πυρηνικά εργοστάσια είναι ιδιαίτερα αυστηρές.

3.3 Εξέλιξη πυρηνικών τεχνολογιών

3.3.1 Εισαγωγή

Ανάλογα με τη λειτουργία τους, την παραγόμενη ισχύ ή/και την τεχνολογία που χρησιμοποιούν διακρίνουμε πολλούς διαφορετικούς τύπους αντιδραστήρων. Η πρώτη κατηγορία αντιδραστήρων είναι οι **πειραματικοί αντιδραστήρες**. Πρόκειται για θερμικούς αντιδραστήρες με μικρή ισχύ που κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες W έως μερικές δεκάδες MW και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ραδιοϊσότοπων και για ερευνητικούς σκοπούς. Η θερμική τους ισχύς, συνήθως, δεν χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και γι' αυτό η μελέτη τους δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας και παραλείπεται.

Πυρηνικοί αντιδραστήρες ισχύος (Nuclear Power Reactor) ονομάζονται οι αντιδραστήρες με μεγάλη θερμική ισχύ. Ως επί το πλείστον χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά είναι επίσης κατάλληλοι για την πρόωση πλοίων και υποβρυχίων, για βιομηχανικές εφαρμογές καθώς και για τη θέρμανση πόλεων.

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες ισχύος διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το σύστημα ψύξης: στους **υδρόψυκτους** και τους **αεριοψυκτους**. Οι αντιδραστήρες της πρώτης κατηγορίας χρησιμοποιούν νερό ως ψυκτικό, ενώ οι δεύτεροι χρησιμοποιούν αέρια ψυκτικά. Οι βασικοί τύποι αντιδραστήρα που χρησιμοποιούνται σήμερα και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους αναλύονται ακολούθως.

Στο σημείο αυτό διευκρινίζεται πως όλοι οι αντιδραστήρες που μελετάμε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είναι **πυρηνικοί αντιδραστήρες σχάσης**. Εκτός από αυτούς υπάρχουν κι οι πυρηνικοί αντιδραστήρες σύντηξης, οι οποίοι στηρίζονται στο φαινόμενο της πυρηνικής σύντηξης.

3.3.2 Εξέλιξη πυρηνικών αντιδραστήρων

Στη σχετικά σύντομη ιστορία της πυρηνικής ενέργειας, πολλοί τύποι πυρηνικών αντιδραστήρων έχουν προταθεί για την παραγωγή ατμού. Συνήθως, οι αντιδραστήρες κατηγοριοποιούνται σε γενιές (γενιά I, II, III, III+ και IV), ανάλογα με τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούν. Οι αντιδραστήρες που αναφέρονται κάτωθι περιγράφονται πιο αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.4.

- **Γενιά I**

Περιλαμβάνει τους πρώτους πυρηνικούς αντιδραστήρες που αναπτύχθηκαν κυρίως τη δεκαετία του '50 και του '60. Πρόκειται, ως επί το πλείστον, για αεριοψυκτους αντιδραστήρες τύπου Magnox. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι πρώτοι αντιδραστήρες που σχεδιάστηκαν κι υλοποιήθηκαν, όπως ο Shippingport(1975-1982) στην Πενσυλβάνια, ο Dresden-I (1960-1978) στο Illinois και ο Calder Hall(1956-2003) στο Ηνωμένο Βασίλειο.

Η τελευταία εγκατάσταση που χρησιμοποιούσε αντιδραστήρες τέτοιου τύπου τέθηκε εκτός λειτουργίας το Δεκέμβριο του 2012. Πρόκειται για τον πυρηνικό σταθμό Wylfa στην Ουαλία.

- **Γενιά II**

Η ανάγκη για αξιοπιστία και οικονομική λειτουργία που προέκυψε από την εμπορική χρήση των πυρηνικών αντιδραστήρων οδήγησε στην επόμενη γενιά των. Αναπτύχθηκαν προς το τέλος της δεκαετίας του '60 με προσδόκιμο χρόνο λειτουργίας τα 40 έτη και περιλαμβάνουν τους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (Light Water Reactors – LWR, PWR, BWR), βαρέως ύδατος (Heavy Water Reactors, CANDU) και τους αντιδραστήρες AGR(Advanced Cooled Reactors). Στην κατηγορία αυτή ανήκει η πλειονότητα των ενεργών σταθμών πυρηνικής ενέργειας.

Χρησιμοποιούν κυρίως παραδοσιακά συστήματα ασφαλείας που περιλαμβάνουν ηλεκτρικές και μηχανικές λειτουργίες που εκκινούν αυτόματα αλλά σε πολλές περιπτώσεις μπορούν να τεθούν σε λειτουργία κι από τους χειριστές των πυρηνικών αντιδραστήρων. Μερικά μηχανικά συστήματα ενεργούν παθητικά (π.χ. με τη χρήση βαλβίδων εκτόνωσης της πίεσης) και λειτουργούν χωρίς την ανάγκη χειρισμού ή απώλειας ισχύος.

- **Γενιά III**

Οι αντιδραστήρες αυτής της γενιάς είναι παρόμοιοι με εκείνους της προηγούμενης, αλλά έχουν υποστεί μικρές βελτιώσεις προκειμένου να ανταπεξέλθουν στις αυξημένες απαιτήσεις ασφαλείας και οικονομικής ανταγωνιστικότητας. Οι αλλαγές αυτές επικεντρώνονται κυρίως στην τεχνολογία καυσίμου, τη θερμική απόδοση, στη διαμόρφωση των κατασκευών, τα συστήματα ασφαλείας (ιδιαίτερα την αντικατάσταση των ενεργητικών συστημάτων από παθητικά) και την τυποποίηση του σχεδιασμού. Σε γενικές γραμμές τα συστήματα αυτά στηρίζονται στη βάση του σχεδιασμού απλών διατάξεων (ώστε να παραμένει χαμηλό το κόστος κατασκευής) που όμως χρησιμοποιούν προηγμένα συστήματα ασφαλείας.

Ο προσδοκώμενος χρόνος λειτουργίας των αντιδραστήρων 3^{ης} γενιάς τυπικά είναι 60 χρόνια, με τη δυνατότητα επέκτασης του, πριν την ολική αναμόρφωση και αντικατάσταση

του δοχείου πίεσης του αντιδραστήρα. Βέβαια, για την παράταση της λειτουργίας σε διάστημα μεγαλύτερο των 60 χρόνων απαιτούνται έρευνες που να εξασφαλίζουν την αξιοπιστία της διάταξης.

Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι προηγμένοι αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος (Advanced Boiling Water Reactors – ABWR) της GE και οι προηγμένοι PWR (AP-600) της εταιρίας Westinghouse. Οι πρώτες εγκαταστάσεις με αντιδραστήρες αυτού του τύπου τέθηκαν σε λειτουργία στην Ιαπωνία το 1996. Επιπλέον, σε αυτή τη γενιά αντιδραστήρων συγκαταλέγονται οι αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος του τύπου System 80+, οι αντιδραστήρες βαρέως ύδατος Enhanced CANDU 6 κτλ.

Σήμερα, βρίσκονται σε λειτουργία μόνο 4 αντιδραστήρες 3^{ης} γενιάς παγκοσμίως. Είναι όλοι ABWR.

• Γενιά III+

Η εξελικτική πορεία των αντιδραστήρων 3^{ης} γενιάς οδήγησε στη γενιά III+, η οποία χαρακτηρίζεται από σημαντικές βελτιώσεις στο επίπεδο ασφαλείας. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι αντιδραστήρες APWR (Advanced PWR), VVER-1200/329M Reactor, Advanced CANDU Reactor (ACR-1000), AP1000 (στηρίζεται στον AP600 αλλά αποδίδει αυξημένη ισχύ), European Pressurized Reactor(EPR), Economic Simplified Boiling Water Reactor (ESBWR), APR-1400 (αναπτύχθηκε με πρότυπο τους System 80+), EU-ABWR (τυπικός ABWR προσαρμοσμένος στα Ευρωπαϊκά πρότυπα ασφαλείας με αυξημένη παραγωγή ισχύος).

Η ανάπτυξη των αντιδραστήρων γενιάς III+ ξεκίνησε τις αρχές της δεκαετίας του '90. Σε σχέση με τους προκατόχους τους, τα συστήματα αναμένεται να επιτύχουν μεγαλύτερη εξάντληση καυσίμου, παράγοντας λιγότερα απόβλητα. Η πιο σημαντική ίσως βελτίωση των αντιδραστήρων αυτών είναι η ενσωμάτωση παθητικών συστημάτων που δεν απαιτούν ενεργό έλεγχο ή παρέμβαση χειριστή, αλλά αντίθετα στηρίζονται στη βαρύτητα ή τη φυσική διάδοση θερμότητας για την εξάλειψη των συνεπειών κάποιας βλάβης ή ατυχήματος. Πέρα από τα προφανή πλεονεκτήματα τους σε θέματα ασφαλείας, η χρήση παθητικών συστημάτων μπορεί να επισπεύσει την αδειοδότηση και την κατασκευή του αντιδραστήρα.

• Γενιά IV

Πρόκειται για μελλοντικούς αντιδραστήρες. Αν και η ανάπτυξη τους εκτιμάται πως απαιτεί μία με δύο δεκαετίες ακόμα, κάποια μοντέλα πιθανώς να είναι έτοιμα πριν το τέλος του 2020. Οι αντιδραστήρες αυτής της γενιάς συγκεντρώνουν όλα τα χαρακτηριστικά των διατάξεων γενιάς III+ κι είναι προσανατολισμένοι στην καλύτερη δυνατή διαχείριση καυσίμου με υψηλότερο βαθμό εξάντλησης και αναπαραγωγή του εξαντλημένου ουρανίου. Μπορούν να λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες από το σύνολο των σύγχρονων συστημάτων και τυπικά περιλαμβάνουν συστήματα πλήρους ανακύκλωσης των ακτινίδων, τα οποία είναι τα πιο επικίνδυνα ραδιενεργά απόβλητα. Συνοπτικά, η τέταρτη γενιά πυρηνικών αντιδραστήρων υπόσχεται αυξημένη λειτουργική ασφάλεια, τη δυνατότητα αξιοποίησης των πυρηνικών αποβλήτων για ηλεκτροπαραγωγή, την παραγωγή πολλαπλάσιας ποσότητας ενέργειας (100-300 φορές περισσότερη ενέργεια) από την ίδια ποσότητα καυσίμου και τη μείωση του διαστήματος κατά το οποίο τα πυρηνικά απόβλητα παραμένουν ενεργά σε μερικούς μόνο αιώνες (εν συγκρίσει με τα χιλιάδες χρόνια του παρόντος). Σε αυτή τη γενιά περιλαμβάνονται αντιδραστήρες με ψύξη υγρού μετάλλου, αντιδραστήρες υψηλής και υπερυψηλής θερμοκρασίας, αντιδραστήρες που λειτουργούν με χρήση υπερκρίσιμου νερού, αντιδραστήρες τετηγμένου άλατος, αεριοψυκτοι αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων, καθώς και καινοτόμοι σχεδιασμοί όπως αντιδραστήρες μετάδοσης κύματος, οι οποίοι μέσω της πυρηνικής μεταστοιχείωσης μετατρέπουν το γόνιμο σε σχάσιμο υλικό.

3.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά πυρηνικών αντιδραστήρων

3.4.1 Αντιδραστήρες Ελαφρού Ύδατος

Πρόκειται για την πιο διαδεδομένη κατηγορία αντιδραστήρων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Χάρη στα τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά τους, χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στις ΗΠΑ και τη Γαλλία ενώ οι βελτιώσεις που έχουν υποστεί τα τελευταία χρόνια αύξησαν σημαντικά την αποδοτικότητά τους, δίνοντας τους σαφή προβάδισμα έναντι των αντίστοιχων συστημάτων AGR, που αναπτύχθηκαν μόνο στη Βρετανία.

Είναι θερμικοί αντιδραστήρες που χρησιμοποιούν κοινό νερό ως επιβραδυντή, ανακλαστή και ψυκτικό. Το H_2O είναι *ισχυρός επιβραδυντής*, καθώς για τη θερμοποίηση των ταχέων νετρονίων της σχάσης αρκούν λίγες σκεδάσεις με πυρήνες H-1. Έτσι, μια σχετικά μικρή διαδρομή των ταχέων νετρονίων μέσα στο νερό αρκεί για να γίνουν θερμικά. Ως εκ τούτου καθίσταται δυνατή η σχεδίαση αντιδραστήρων με *σχετικά μικρό όγκο πυρήνα* και κατ' επέκταση χαμηλό κόστος της καρδιάς (αυτό δεν είναι καθοριστικής σημασίας σε σχέση με το συνολικό κόστος της εγκατάστασης) και τη δυνατότητα κατασκευής του δοχείου πίεσης σε οποιαδήποτε περιοχή, ανεξάρτητα από την τελική θέση του αντιδραστήρα. Ο μικρός όγκος της καρδιάς έχει, επίσης, καθοριστική σημασία για κάποιες εφαρμογές όπως η πρόωση των υποβρυχίων, στα οποία κατ' εξοχήν χρησιμοποιούνται αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος (Pressured Water Reactors – PWR). Επιπλέον, το ίδιο το νερό είναι διαθέσιμο σε *χαμηλό κόστος*.

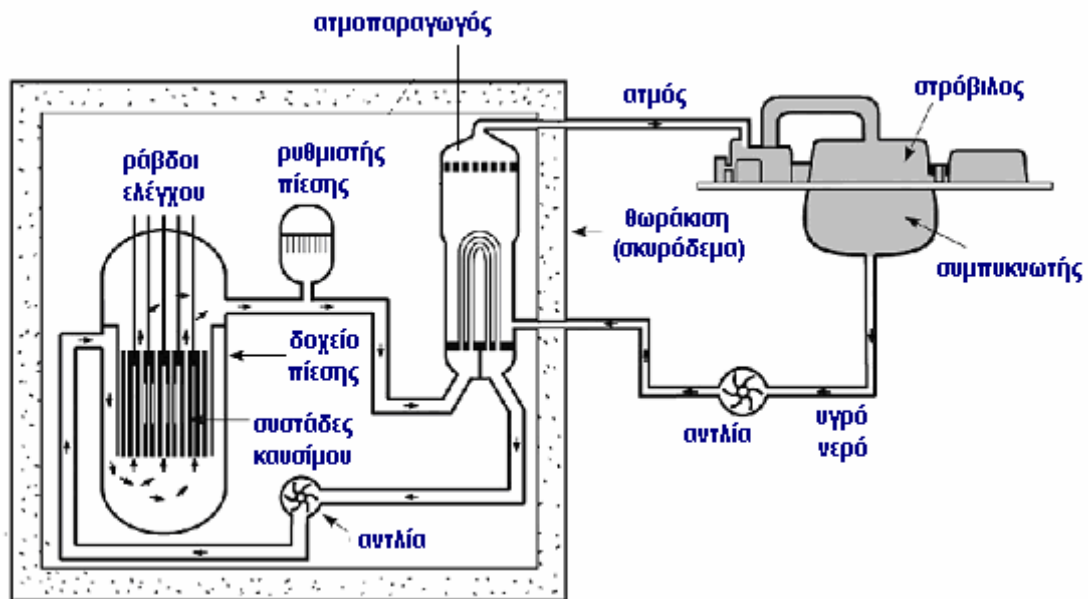
Ωστόσο, στο κύκλωμα του νερού απαιτούνται υψηλές πιέσεις για την αποφυγή βρασμού. Υπό κανονικές συνθήκες (ατμοσφαιρική πίεση), το νερό βράζει στους 100 °C. Με την αύξηση της πίεσης, το σημείο βρασμού αυξάνεται σημαντικά. Επιπλέον, η *μεγάλη διατομή απορρόφησης νετρονίων* καθιστά αδύνατη τη συγκρότηση κρίσιμου συστήματος νερού – φυσικού ουρανίου. Απαιτείται, λοιπόν, η χρήση εμπλουτισμένου ουρανίου. Μεγάλος εμπλουτισμός, όμως, συνεπάγεται και μεγάλο κόστος καυσίμου. Ενδεικτικά, αναφέρουμε πως στους σύγχρονους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (Light Water Reactors – LWR), ο εμπλουτισμός του καυσίμου φθάνει το ~3%. Για να μην καθίσταται απαγορευτικό το κόστος κατασκευής, απαιτείται ο λόγος του όγκου H_2O προς τον όγκο καυσίμου να παραμένει μικρός, ώστε να περιοριστεί το ποσοστό των απορροφήσεων των νετρονίων από το νερό. Για το λόγο αυτό, σε αυτούς τους αντιδραστήρες το H_2O λειτουργεί ως επιβραδυντής αλλά κι ως ψυκτικό της καρδιάς, αφού δεν υπάρχει διαθέσιμος χώρος για ξεχωριστό κύκλωμα ψυκτικού. Τέλος, η σχετική ευκολία μετάβασης του νερού από την υγρή στην αέρια φάση δημιουργεί σημαντικές απαιτήσεις ασφαλείας.

Σήμερα, υπάρχουν δύο κύριοι τύποι αντιδραστήρων ελαφρού ύδατος σε χρήση: οι αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος και οι αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος. Και οι δύο τύποι αντιδραστήρων εγκαθίστανται σε πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, με κόστος λειτουργίας συγκρίσιμο με τις συμβατικές μονάδες. Τα βασικά χαρακτηριστικά τους περιγράφονται ακολούθως.

3.4.1.1 Αντιδραστήρες Πεπιεσμένου Ύδατος

Οι αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος είναι ένας από τους πρώτους τύπους αντιδραστήρων ισχύος που κατασκευάστηκαν και μέχρι σήμερα αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τύπο αντιδραστήρα. Η ανάπτυξη τους ξεκίνησε από τις Ηνωμένες Πολιτείες (ΗΠΑ) και τη Σοβιετική ένωση για την πρόωση υποβρυχίων, αλλά πλέον παράγονται σε αρκετές χώρες (Γαλλία, Γερμανία, ΗΠΑ, Ρωσία κτλ). Στους PWR, το νερό χρησιμοποιείται τόσο ως επιβραδυντής όσο κι ως ψυκτικό.

Οι αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος ακολουθούν τον **έμμεσο θερμοδυναμικό κύκλο**, χρησιμοποιούν δηλαδή εναλλάκτες θερμότητας. Τυπικά παράγουν ηλεκτρική ισχύ από 900-



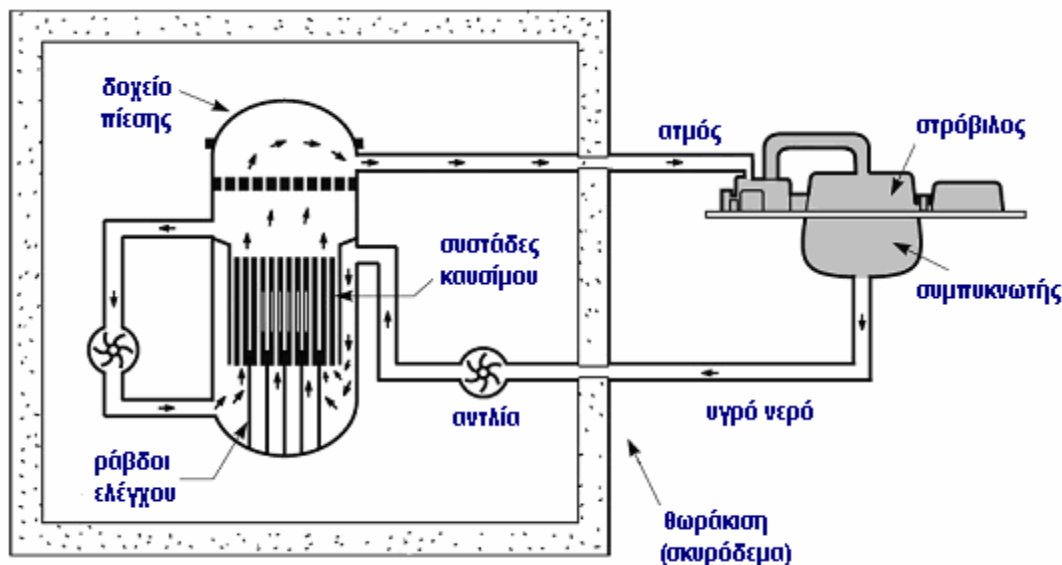
Εικόνα 25: Σχηματικό διάγραμμα αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος (PWR) [29]

1450MW, με βαθμό απόδοσης 32%. Η καρδιά ενός τυπικού αντιδραστήρα έχει διάμετρο και ύψος περίπου 3,5m και ολόκληρο το πρωτεύον κύκλωμα συμπεριλαμβανομένων και των ατμοπαραγωγών μονάδων, περιβάλλεται από βιολογική θωράκιση, κατασκευασμένη από σκυρόδεμα. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της εικόνας 25, το νερό εισέρχεται στο δοχείο πίεσης σε θερμοκρασία περίπου 290°C, ρέει εξωτερικά της καρδιάς του αντιδραστήρα όπου λειτουργεί σαν ανακλαστής και τελικά περνάει διαμέσου της όπου θερμαίνεται κι εξέρχεται από το δοχείο πίεσης με θερμοκρασία περίπου 325°C. Το νερό στους αντιδραστήρες αυτούς διατηρείται σε **υψηλή πίεση** (περίπου 150 atm), ώστε να αποφεύγεται ο βρασμός στην καρδιά του αντιδραστήρα.

Το καύσιμο που χρησιμοποιείται σε αυτούς τους αντιδραστήρες είναι κυρίως UO_2 (με εμπλουτισμό ~3-4%) ή οξείδιο ουρανίου-πλουτωνίου (MO_x). Η μάζα καυσίμου που απαιτείται για τη λειτουργία τους είναι περίπου 100 τόνοι και τοποθετείται σε ράβδους καυσίμου που περιβάλλονται από ανοξείδωτο ατσάλι ή κράμα ζirkονίου. Κάθε συστάδα καυσίμου περιλαμβάνει 225 ράβδους (από αυτές οι 200 περίπου περιέχουν καύσιμο ενώ οι άλλες χρησιμοποιούνται ως οδηγοί των ράβδων ελέγχου). Περίπου το 30% του συνόλου των συστάδων που περιέχει ο αντιδραστήρας χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του.

3.4.1.2 Αντιδραστήρες Ζέοντος Ύδατος

Πρόκειται για αντιδραστήρες **άμεσου κύκλου**, όπου το ψυκτικό ύδωρ βράζει και ο ατμός παράγεται στην καρδιά του αντιδραστήρα. Για πολλά χρόνια, υπήρχε η πεποίθηση πως ο βρασμός του νερού στο εσωτερικό της καρδιάς του αντιδραστήρα θα μπορούσε να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα ευστάθειας στο σύστημα. Ωστόσο, έρευνες που πραγματοποιήθηκαν τη δεκαετία του '50 έδειξαν πως κάτι τέτοιο συμβαίνει μόνο όταν ο βρασμός λαμβάνει χώρα σε συνθήκες χαμηλής πίεσης. Αντίθετα, σε υψηλή πίεση, ο βρασμός δεν καθιστά το σύστημα ασταθές και είναι δυνατός ο έλεγχος του αντιδραστήρα. Αυτό ήταν και το έναυσμα για την ανάπτυξη των BWR, με πολλαπλά οφέλη.

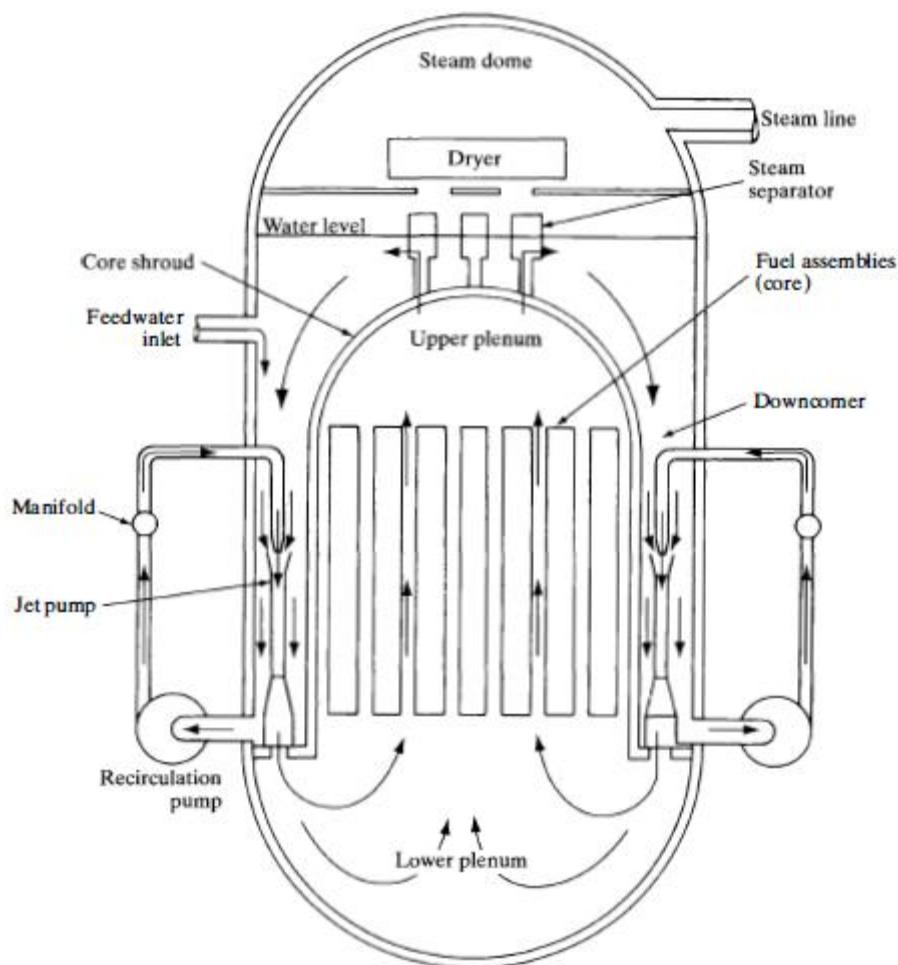


Εικόνα 26: Σχηματικό διάγραμμα αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος (BWR) [29]

Στους αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος (Boiling Water Reactors – BWR) ο ατμός παράγεται απευθείας στον πυρήνα του αντιδραστήρα, χωρίς τη χρήση ατμοπαραγωγών. Επιπλέον, για δεδομένη ποσότητα νερού, είναι δυνατή η απορρόφηση περισσότερης θερμότητας υπό σταθερή θερμοκρασία (λανθάνουσα θερμότητα), κατά την ατμοποίησης του. Όμως, όπως σε κάθε πυρηνικό αντιδραστήρα άμεσου κύκλου, επειδή ο ατμός παράγεται στην καρδιά είναι ραδιενεργός. Συγκεκριμένα, περιέχει μικρές ποσότητες των προϊόντων της σχάσης και κυρίως N-16, προϊόν της αντίδρασης του οξυγόνου με νετρόνια. Έτσι, όλες οι μονάδες στις οποίες χρησιμοποιείται ατμός, όπως ο στρόβιλος, το ψυγείο, ο αναθερμαντής, οι αντλίες κτλ, πρέπει να περιβάλλονται από βιολογική θωράκιση προκειμένου να περιορίζεται η διαρροή ακτινοβολίας. Σημειώνεται, επίσης, πως ο στρόβιλος και ο συμπυκνωτής στον άμεσο κύκλο αποτελούν μέρος του κυκλώματος του ψυκτικού.

Στους BWR η πίεση στο δοχείο πίεσης είναι σχεδόν η μισή από την αντίστοιχη στους PWR, ήτοι 70 atm. Στην πίεση αυτή το νερό βράζει στους $\sim 285^{\circ}\text{C}$ ενώ η πίεση και η θερμοκρασία του ατμού στην έξοδο του συστήματος είναι πρακτικά ίδιες με εκείνες των ατμοπαραγωγών των PWR.

Ακολουθώντας την πορεία του ψυκτικού σε έναν αντιδραστήρα BWR, όπως υποδεικνύεται και με τα βέλη της εικόνας 27, παρατηρούμε τα εξής: Το νερό, ξεκινώντας από το χαμηλότερο τμήμα, κινείται ανοδικά μέσω της καρδιάς απορροφώντας θερμότητα (λανθάνουσα και μη). Έτσι, μέχρι τη στιγμή που φθάνει στην κορυφή της καρδιάς, ένα μέρος του ψυκτικού έχει ήδη εξατμιστεί. Αυτό το μίγμα ατμού και νερού οδηγείται σε διαχωριστές ατμού, οι οποίοι απομακρύνουν το περισσότερο νερό. Ο ατμός στη συνέχεια περνάει μέσα από ένα αποξηραντή, ο οποίος απομακρύνει τυχόν νερό που έχει παραμείνει, και βγαίνει από τον αντιδραστήρα προς το στρόβιλο. Το νερό που έχει διαχωριστεί από τον ατμό με την παραπάνω διαδικασία, αναμιγνύεται με το νερό που βγαίνει από το συμπυκνωτή και οδηγείται και πάλι στο κατώτερο μέρος της διάταξης μέσω μιας δακτυλιοειδούς περιοχής ανάμεσα στο κάλυμμα του πυρήνα του αντιδραστήρα (εξωτερικά της καρδιάς) και το δοχείο πίεσης. Η παραπάνω κίνηση του ψυκτικού επιτυγχάνεται χάρη σε ένα σύστημα επανακυκλοφορίας (recirculation system), το οποίο αποτελείται από δύο βρόχους εξωτερικά του δοχείου του αντιδραστήρα, καθένας από αυτούς διαθέτει μια αντλία ανατροφοδότησης όπως απεικονίζεται και στο διάγραμμα. Η περαιτέρω ανάλυση του κυκλώματος επανακυκλοφορίας ξεφεύγει από τους στόχους της παρούσας εργασίας και παραλείπεται.



Εικόνα 27: Αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος. Η κίνηση του νερού υποδεικνύεται από τα βέλη [31]

Το καύσιμο που χρησιμοποιείται και σε αυτή την περίπτωση είναι UO_2 , τοποθετημένο σε ράβδους καυσίμου με περίβλημα από ανοξείδωτο ασάλι ή κράμα ζιρκονίου. Σε αντίθεση με τους PWR οι ράβδοι ελέγχου στους BWR τοποθετούνται στο κατώτερο μέρος του πυρήνα κι όχι στην κορυφή, καθώς το ανώτερο μέρος της καρδιάς είναι συνήθως κατελιμμένο με κενά ατμού με αποτέλεσμα η κίνηση των ράβδων ελέγχου να μην είναι τόσο αποτελεσματική.

3.4.1.3 Προηγμένοι Αντιδραστήρες Ελαφρού Ύδατος

Σε μια προσπάθεια να γίνει οικονομικά ανταγωνιστικότερη η χρήση της πυρηνικής ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή, πραγματοποιήθηκαν έρευνες για την ανάπτυξη νέων συστημάτων, απλούστερων κι ασφαλέστερων. Στα πλαίσια αυτά αναπτύχθηκαν οι προηγμένοι αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος (Advanced Boiling Water Reactor – ABWR) και οι αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος System 80+, οι οποίοι στηρίζονται σε απλά σχεδιαστικά συστήματα (για τη μείωση του κόστους) που αξιοποιούν συστήματα ασφαλείας υψηλής τεχνολογίας. Παράλληλα, την ίδια περίοδο σχεδιάστηκαν τα συστήματα παθητικής ψύξης για την αντιμετώπιση ενός ενδεχόμενου ατυχήματος. Τα παθητικά συστήματα χρησιμοποιούν φυσικές διεργασίες που στηρίζονται σε απλούς φυσικούς νόμους, όπως η βαρύτητα και οι θερμοκρασιακές διαφορές. Έτσι, για τη λειτουργία τους δεν απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια, γεγονός που μειώνει την πιθανότητα αστοχίας σε

περίπτωση ενός πυρηνικού ατυχήματος και τα καθιστά περισσότερα αξιόπιστα. Η τεχνολογία αυτή εφαρμόστηκε στη σχεδίαση των Advanced Passive 600(AP600) και των απλοποιημένων αντιδραστήρων ζέοντος ύδατος SBWR – Simplified Boiling Water Reactors.

3.4.2 Αντιδραστήρες Βαρέως Ύδατος

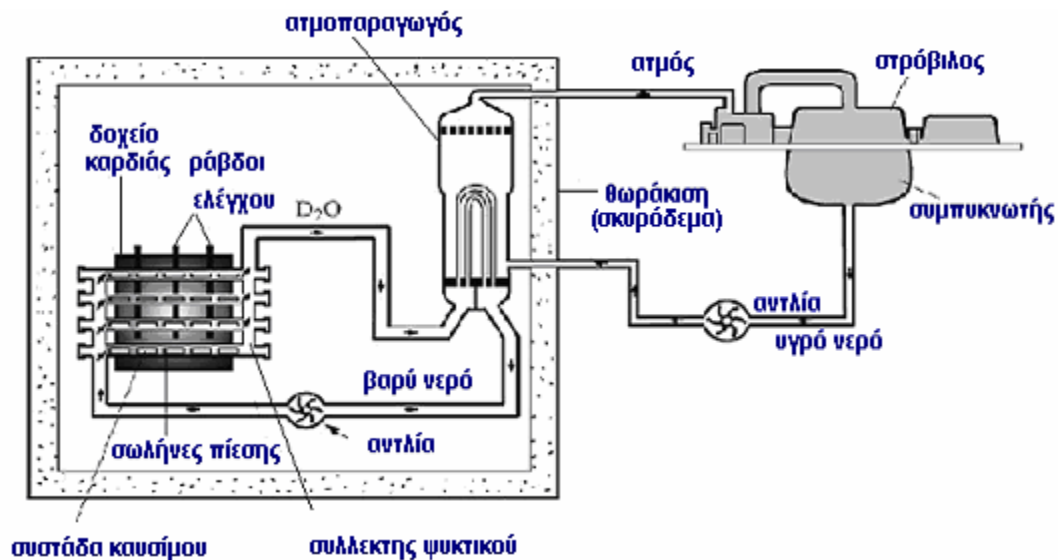
Οι αντιδραστήρες βαρέως ύδατος (Heavy Water Reactors – HWR) χρησιμοποιούν ως επιβραδυντή βαρύ ύδωρ D_2O . Αναπτύχθηκαν σε πολλές χώρες, με πρωτοπόρο τον Καναδά. Η έρευνα για τους HWR ξεκίνησε λίγο πριν το Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο για πολεμικές εφαρμογές. Ωστόσο, μετά τη λήξη του πολέμου ο Καναδάς αναγνώρισε σύντομα τη σημασία τους και προχώρησε στη συστηματική ανάπτυξή τους. Το D_2O έχει μικρή ενεργό διατομή, που ελαχιστοποιεί τον αριθμό των νετρονίων που χάνονται δίνοντας τη δυνατότητα χρήσης φυσικού ουρανίου και απαγκίστρωσης από τις εγκαταστάσεις εμπλουτισμού. Έτσι, γίνεται δυνατή η απευθείας αξιοποίηση των κοιτασμάτων φυσικού ουρανίου που υπάρχουν στην καναδική επικράτεια, χωρίς την ανάγκη κατασκευής εγκαταστάσεων εμπλουτισμού και χωρίς την εξάρτηση από τις εγκαταστάσεις εμπλουτισμού άλλων κρατών.

Ωστόσο, καθώς το δευτέριο στο D_2O είναι σχεδόν δυο φορές βαρύτερο από το υδρογόνο στο H_2O , η ικανότητα επιβράδυνσης του πρώτου είναι σαφώς μικρότερη. Έτσι, τα νετρόνια χάνουν κατά μέσο όρο λιγότερη ενέργεια στις σκεδάσεις τους στο D_2O από τις αντίστοιχες στο H_2O , με συνέπεια να διανύουν μεγαλύτερες αποστάσεις μέχρι να γίνουν θερμικά. Η καρδιά, λοιπόν, ενός αντιδραστήρα βαρέως ύδατος είναι σαφώς μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ενός LWR εξαιτίας του μεγαλύτερου όγκου του επιβραδυντή. Επιπλέον, απαιτείται πολύ μεγαλύτερο δοχείο πίεσης για την τοποθέτηση ενός τέτοιου αντιδραστήρα. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκαν διαφορετικές λύσεις, οικονομικότερες και πρακτικότερες του δοχείου πίεσης. Τέλος, οι HWR επιτρέπουν την αντικατάσταση των συστάδων εξαντλημένου καυσίμου κατά τη διάρκεια λειτουργίας, αίροντας τον αντίστοιχο περιορισμό που υπάρχει στους LWR κι επιβάλλει τη διακοπή λειτουργίας για την αλλαγή καυσίμου.

3.4.2.1 CANDU

Ο πιο σημαντικός τύπος αντιδραστήρα αυτής της κατηγορίας είναι οι **CANDU (CANadian Deuterium – Uranium)**.

Πρόκειται για αντιδραστήρες **έμμεσου κύκλου**, που χρησιμοποιούν βαρύ ύδωρ υπό πίεση (για να αποφεύγεται ο βρασμός) ως ψυκτικό. Η καρδιά του αντιδραστήρα CANDU συγκροτείται από πολλά οριζόντια κανάλια ψυκτικού, καθένα από τα οποία περιέχεται στο δικό του σωλήνα πίεσης. Το σύστημα αυτό των σωληνώσεων πίεσης χρησιμοποιείται για την αποφυγή του μεγάλου δοχείου πίεσης. Αναλυτικότερα, ο αντιδραστήρας αποτελείται από μία μεγάλη οριζόντια κυλινδρική δεξαμενή, η οποία περιέχει τον επιβραδυντή (D_2O) υπό πρακτικά καμία πίεση. Το δοχείο αυτό διαπερνάται οριζόντια από σωλήνες πίεσης (αυλοί), οι οποίοι περιέχουν το καύσιμο. Το ψυκτικό (D_2O) είναι ανεξάρτητο από τον επιβραδυντή και ρέει υπό πίεση 10 MPa μέσα στο σωλήνα πίεσης όπου τοποθετούνται συστάδες καυσίμου, η μία μετά την άλλη στη σειρά. Σχηματίζεται, έτσι, ένας κανονικός κánaβος καναλιών ψυκτικού-καυσίμου, βυθισμένος στον επιβραδυντή (D_2O).



Εικόνα 28: Σχηματικό διάγραμμα αντιδραστήρα CANDU [29]

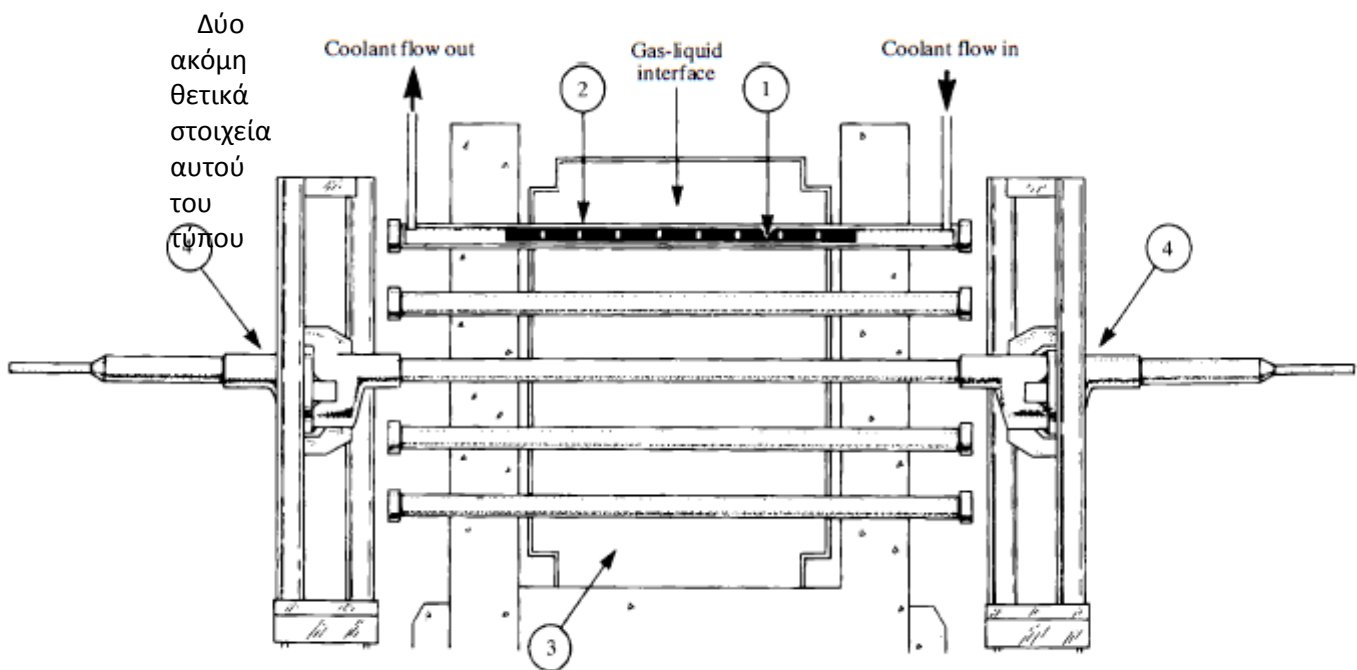
Το ψυκτικό από την έξοδο των σωλήνων πίεσης οδηγείται στους εναλλάκτες θερμότητας. Στο δευτερεύον κάθε ατμοπαραγωγού ρέει κοινό ύδωρ (H_2O). Με τη μεταφορά θερμότητας από το ψυκτικό D_2O , στο δευτερεύον του εναλλάκτη παράγεται ατμός υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, ο οποίος οδηγείται στον ατμοστρόβιλο. Κατόπιν, το ψυκτικό D_2O από την έξοδο των ατμοπαραγωγών μονάδων οδηγείται και πάλι στην είσοδο των αυλών της καρδιάς.

Δυστυχώς στους αντιδραστήρες αυτούς το πεπιεσμένο ψυκτικό D_2O δεν μπορεί να αποκτήσει αρκετά υψηλή θερμοκρασία ώστε να παράγει ατμό τόσο υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας όσο οι LWR. Συγκεκριμένα, το ψυκτικό εισέρχεται στον αντιδραστήρα με θερμοκρασία $266^{\circ}C$ και εξέρχεται σε θερμοκρασία $310^{\circ}C$. Επομένως η θερμοδυναμική απόδοση των αντιδραστήρων CANDU κυμαίνεται μεταξύ 28% - 30% και στους σταθμούς που εγκαθίστανται απαιτείται η χρήση μεγαλύτερων στροβίλων, ειδικά σχεδιασμένων ώστε να αποτρέπεται η διάβρωση από τη χρήση υγρού (μη ξηρού) ατμού. Για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων, έχει προταθεί η χρήση άλλων ψυκτικών (με τον ίδιο επιβραδυντή) όπως το κοινό ύδωρ ή οργανικά ρευστά. Τα οργανικά ψυκτικά είναι ικανά να παράγουν υψηλές θερμοκρασίες εξόδου στον αντιδραστήρα αλλά και οι δύο εναλλακτικές αυξάνουν σημαντικά την απορρόφηση νετρονίων, αίροντας τη δυνατότητα χρήσης φυσικού ουρανίου.

Καθώς ο επιβραδυντής διατηρείται σε ατμοσφαιρική σχεδόν πίεση, το δοχείο της καρδιάς είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα πάχους 2,5 περίπου cm (σχεδόν το 1/10 από το αντίστοιχο πάχος των PWR) με πλάτος και ύψος περίπου 7,6m. Ο επιβραδυντής, επιπλέον διαθέτει το δικό του σύστημα ψύξης (παραλείπεται στο διάγραμμα) το οποίο διατηρεί τη θερμοκρασία του σταθερή στους $10^{\circ}C$ περίπου.

Το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι φυσικό ουράνιο στη μορφή δισκίων UO_2 , τοποθετημένων σε ράβδους με περίβλημα από κράμα ζirkονίου. Παρ' όλα αυτά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ελαφρώς εμπλουτισμένο ουράνιο, επιτρέποντας την ουσιαστική μείωση του συνολικού όγκου της εγκατάστασης και κατ' επέκταση της απαιτούμενης επένδυσης. Άλλωστε, με τη χρήση ελαφρώς εμπλουτισμένου ουρανίου επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου και καλύτερη διαχείριση των διαθέσιμων κοιτασμάτων ουρανίου.

Επιπλέον, οι αντιδραστήρες CANDU προσφέρουν τη δυνατότητα αντικατάστασης του καυσίμου ενώ βρίσκονται η λειτουργία. Αυτό επιτυγχάνεται, όπως φαίνεται και στην εικόνα 29 που ακολουθεί, χάρη στην ύπαρξη δύο μηχανισμών ανατροφοδότησης που λειτουργούν μαζί στο αντίθετο άκρο κάθε σωλήνα καυσίμου. Μια νέα συστάδα καυσίμου εισάγεται σε έναν από τους δύο μηχανισμούς, ο οποίος την ωθεί στο άλλο άκρο του σωλήνα. Αυτή με τη σειρά της ωθεί την παλιά συστάδα προς τα έξω, όπου παραλαμβάνεται από το δεύτερο μηχανισμό και οδηγείται σε μια δεξαμενή καυσίμου. Αυτός ο τρόπος ανατροφοδότησης των αντιδραστήρων CANDU αυξάνει τη διαθεσιμότητα των εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής όπου εγκαθίστανται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 90%, δίνοντας τους ένα μεγάλο συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι των LWR, οι οποίοι πρέπει να θέτονται εκτός λειτουργίας για την ανατροφοδότηση τους.



Εικόνα 29: Σχηματικό διάγραμμα ενός αντιδραστήρα CANDU: (1) Συστάδες καυσίμου (2) Σωλήνες πίεσης (3) Επιβραδυντής Βαρέως Ύδατος (4) Μηχανισμοί ανατροφοδότησης καυσίμου [31]

αντιδραστήρα είναι πως χάρη στη μικρή διάμετρο του σωλήνα πίεσης, εξασφαλίζεται η αντοχή σε πολύ μεγαλύτερες πιέσεις απ' ότι στο δοχείο πίεσης των LWR. Έτσι, αυξάνεται η αξιοπιστία του συστήματος. Εν κατακλείδι, οι συνέπειες θραύσης ενός σωλήνα πίεσης είναι περιορισμένες συγκριτικά με τις αντίστοιχες σε περίπτωση θραύσης του δοχείου πίεσης. Βέβαια, και στους CANDU είναι πιθανό να συμβεί ατύχημα απώλειας ψυκτικού, λ.χ. με τη θραύση ενός από τους συλλέκτες εξόδου. Για το λόγο αυτό και οι CANDU διαθέτουν δοχείο εξοπλισμού.

Οι CANDU, βέβαια, δεν είναι ο μόνος τύπος αντιδραστήρα βαρέως ύδατος που έχει αναπτυχθεί. Στη Γερμανία έχουν επίσης κατασκευασθεί αντιδραστήρες βαρέως ύδατος, οι οποίοι χρησιμοποιούν ένα μεγάλο δοχείο πίεσης, αντί για σωλήνες πίεσης και τροφοδοτούνται επίσης με φυσικό ουράνιο. Τέτοιοι αντιδραστήρες είναι εγκατεστημένοι σε πυρηνικούς σταθμούς στην Atucha της Αργεντινής (έξω από το Buenos Aires). Η Ιαπωνία έχει επίσης αναπτύξει έναν αντιδραστήρα HWR με την ονομασία Fugen. Πρόκειται για μια διάταξη, που όπως και οι CANDU, αποτελείται από μια δεξαμενή βαρέως ύδατος D_2O , την οποία διαπερνά ένας μεγάλος αριθμός σωλήνων πίεσης. Ωστόσο σε αντίθεση με τους CANDU, οι σωλήνες πίεσης περιέχουν κοινό ύδωρ το οποίο βράζει στην καρδιά του αντιδραστήρα. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται στην περίπτωση αυτή είναι ένα μίγμα

οξειδίων φυσικού ουρανίου και πλουτωνίου. Οι διαστάσεις των Fugen είναι, συνεπώς, αρκετά μικρότερες από τις αντίστοιχες των канаδικών HWR.

3.4.3 Αεριοψυκτοι Αντιδραστήρες

Οι **αεριοψυκτοι αντιδραστήρες (Gas Cooled Reactor – GCR)** χρησιμοποιούν γραφίτη ως επιβραδυντή και κάποιο αέριο (συνήθως διοξείδιο του άνθρακα ή ήλιο) ως ψυκτικό. Οι αντιδραστήρες αυτοί αναπτύχθηκαν αρχικά στις ΗΠΑ για στρατιωτικές εφαρμογές κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των αντιδραστήρων αυτού του τύπου είναι η δυνατότητα χρήσης φυσικού ουρανίου χωρίς εμπλουτισμό ως καύσιμο. Παράλληλα, οι αεριοψυκτοι αντιδραστήρες μπορούν να λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες επιτυγχάνοντας υψηλότερο βαθμό απόδοσης.

Οι αεριοψυκτοι αντιδραστήρες ήταν από τους πρώτους τύπους που αναπτύχθηκαν. Στην πρώτη γενιά αντιδραστήρων συναντάμε δύο αεριοψυκτους αντιδραστήρες: τους Magnox που αναπτύχθηκαν στην Αγγλία και τους UNGG με χώρα προέλευσης τη Γαλλία. Η κύρια διαφορά τους έγκειται στο υλικό των ράβδων καυσίμου με κοινό χαρακτηριστικό πως κανένα από τα υλικά αυτά δεν ήταν κατάλληλο για την μεσοπρόθεσμη διαχείριση του εξαντλημένου καυσίμου σε δεξαμενές νερού. Ως επί το πλείστον, οι αεριοψυκτοι αντιδραστήρες χρησιμοποιούν γραφίτη ως επιβραδυντή και διοξείδιο του άνθρακα ή ήλιο ως ψυκτικό. Το ήλιο είναι εξαιρετικό ψυκτικό καθώς όντας αδρανέστερο από το CO₂, δεν απορροφά νετρόνια και συνεπώς δεν γίνεται εν γένει ραδιενεργό. Με το πέρασμα των χρόνων, αναπτύχθηκαν αρκετοί τύποι αεριοψυκτων αντιδραστήρων, οι οποίοι παρουσιάζονται συνοπτικά ακολούθως.

3.4.3.1 Αντιδραστήρες Γραφίτη – Αερίου

Στην κατηγορία αυτοί ανήκουν δύο βασικοί τύποι αντιδραστήρων. Πρόκειται για τους αντιδραστήρες Magnox, έναν από τους πρώτους τύπους αντιδραστήρα που αναπτύχθηκαν. Σχεδιάστηκαν στο Ηνωμένο Βασίλειο και εξήχθησαν σε αρκετές χώρες τόσο για χρήση στην ηλεκτροπαραγωγή όσο και για στρατιωτικές εφαρμογές. Το όνομα τους προέρχεται από το κράμα που χρησιμοποιείται ως επίστρωση των ράβδων καυσίμου στο εσωτερικό του αντιδραστήρα.

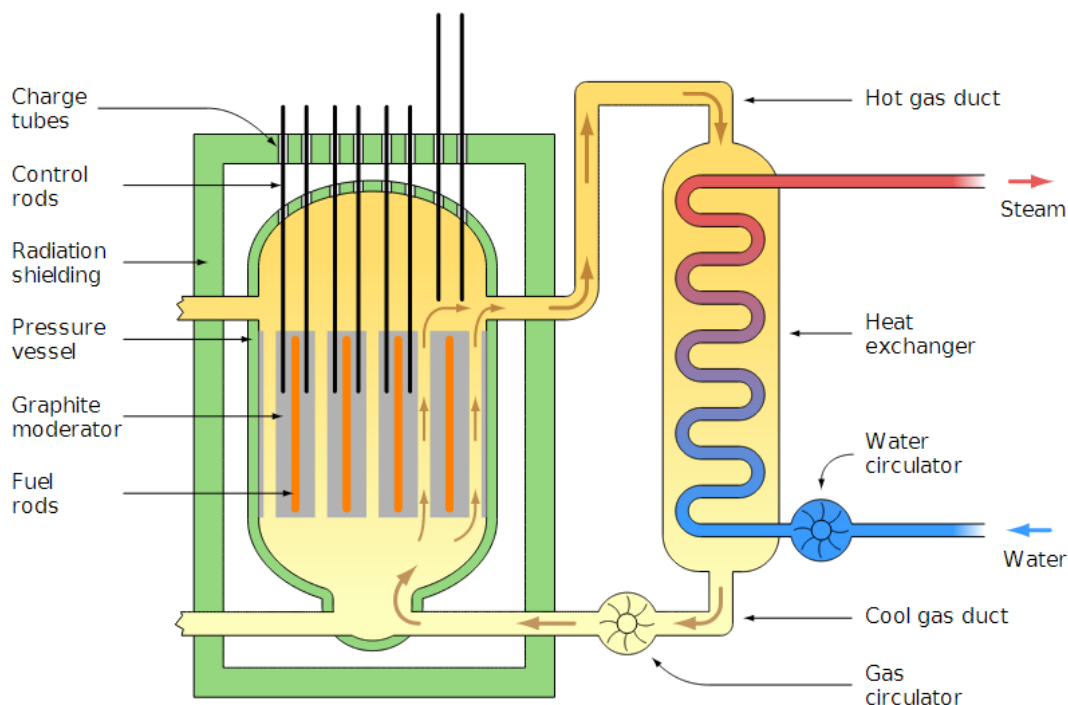
Ως ψυκτικό χρησιμοποιείται διοξείδιο του άνθρακα κι ως επιβραδυντής γραφίτης. Είναι σχεδιασμένοι για να λειτουργούν με φυσικό ουράνιο. Η επίστρωση των ράβδων καυσίμου αποτελείται από μαγνήσιο-αργίλιο ενώ για τις ράβδους ελέγχου χρησιμοποιείται ένα κράμα βορίου-χάλυβα. Εξαιτίας της συνεχούς εξέλιξης και βελτιστοποίησης, ελάχιστες μονάδες είναι πανομοιότυπες. Οι παλαιότεροι αντιδραστήρες χρησιμοποιούσαν δοχείο πίεσης από χάλυβα, ο οποίος στα πιο εξελιγμένα μοντέλα αντικαταστάθηκε από μπετόν. Επιπλέον, ενώ ο αρχικός σχεδιασμός ήταν σφαιρικός, συναντάμε και κυλινδρικές μονάδες.

Στη σχεδίαση αυτών των αντιδραστήρων εξ' αρχής δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στην αντικατάσταση του καυσίμου, χωρίς την απαίτηση αποσύνδεσης από το δίκτυο. Το στοιχείο αυτό ήταν ιδιαίτερα σημαντικό για τους Magnox καθώς το μη εμπλουτισμένο ουράνιο απαιτεί συχνότερη ανανέωση από τους αντιδραστήρες εμπλουτισμένου ουρανίου.

Όσον αφορά τα συστήματα ασφαλείας, οι Magnox θεωρούνταν (πλέον δεν υπάρχουν αντιδραστήρες τέτοιου τύπου σε λειτουργία) αρκετά ασφαλείς διατάξεις εξαιτίας της απλότητας του σχεδιασμού, της χαμηλής πυκνότητας ισχύος και της χρήσης αερίου ψυκτικού. Αυτός είναι κι ο λόγος που οι διατάξεις δεν περιλαμβάνουν δευτερογενή δοχεία εγκλωβισμού. Επιπλέον, η ύπαρξη αερίου ψυκτικού αίρει τον κίνδυνο υπερπίεσεων λόγω βρασμού που συναντάμε στους υδρόψυκτους αντιδραστήρες.

Ιστορικά, τύπου Magnox ήταν και ο πρώτος πυρηνικός ισθμός ηλεκτροπαραγωγής στην παγκόσμια ιστορία. Πρόκειται για τον Calder Hall ο οποίος συνδέθηκε για πρώτη φορά στο

δίκτυο στις 27 Αυγούστου 1956 και σταμάτησε να λειτουργεί στις 31 Μαρτίου του 2011, μετά από 47 χρόνια στην ηλεκτροπαραγωγή. Πλέον, ο μόνος αντιδραστήρας αυτού του τύπου που εξακολουθεί να παράγει βρίσκεται στον πυρηνικό σταθμό Wylfa κι αναμένεται να τεθεί εκτός λειτουργίας το Σεπτέμβριο του 2014.



Εικόνα 30: Σχηματικό διάγραμμα αντιδραστήρα Magnox [32]

Ο δεύτερος τύπος αντιδραστήρα που ανήκει σε αυτή την κατηγορία είναι οι αντιδραστήρες Φυσικού Ουρανίου Γραφίτη – Αερίου (Uranium Naturel Graphite Gaz- UNGG Reactor) που αναπτύχθηκαν από την Γαλλία την ίδια περίοδο και με παρόμοιες προδιαγραφές με τους Magnox. Χρησιμοποιούν, επίσης, γραφίτη ως επιβραδυντή, διοξείδιο του άνθρακα ως ψυκτικό και φυσικό ουράνιο ως καύσιμο. Η κύρια διαφορά των δύο συστημάτων έγκειται στον οριζόντιο προσανατολισμό των ράβδων καυσίμου που προβλέπει ο γαλλικός σχεδιασμός. Το υλικό επίστρωσης των ράβδων καυσίμου σε αυτή την περίπτωση είναι ένα κράμα μαγνησίου-ζirkονίου, το οποίο αντιδρά επίσης με το νερό και γι αυτό είναι απαραίτητη η επανεπεξεργασία του εξαντλημένου καυσίμου μετά από ένα σύντομο διάστημα παραμονής στις δεξαμενές φύλαξης. Οι πυρηνικοί σταθμοί με αντιδραστήρες αυτού του τύπου αποδείχθηκαν οικονομικά ασύμφοροι και παροπλίστηκαν μέχρι το τέλος του 1994, κυρίως εξαιτίας του αυξημένου κόστους προσωπικού.

3.4.3.2 Αεριοψυκτοι Αντιδραστήρες Βαρέως Ύδατος

Οι αεριοψυκτοι αντιδραστήρες βαρέως ύδατος (Heavy Water Gas Cooled Reactor- HWGCR) χρησιμοποιούν βαρύ ύδωρ ως επιβραδυντή και CO₂ ως ψυκτικό. Ο σχεδιασμός τους ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1960 με στόχο την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων χρήσης του CO₂ για χαμηλή απορρόφηση νετρονίων και δυνατότητα επίτευξης υψηλών θερμοκρασιών σε μέτρια επίπεδα πίεσης. Τελικά αναπτύχθηκαν τέσσερις τέτοιοι πυρηνικοί αντιδραστήρες σχετικά μικρού μεγέθους. Πρόκειται για τους:

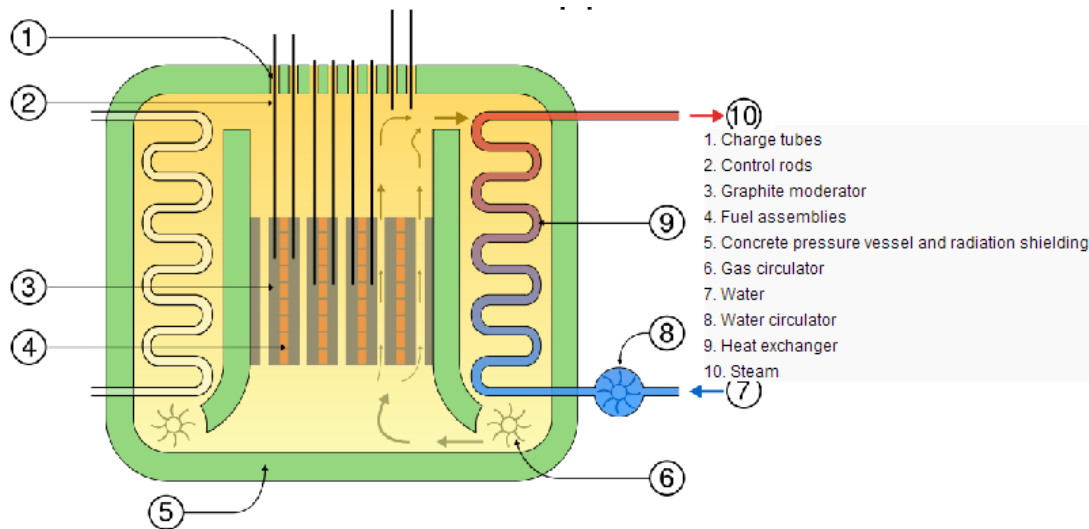
EL4 στη Γαλλία, Niederaichbach στο Μόναχο, Lucens στην Ελβετία, Bohunice KS150 στη Σλοβακία. Σήμερα, κανένας από αυτούς δε βρίσκεται πλέον σε λειτουργία.

Ανάμεσα στα καινοτόμα χαρακτηριστικά αυτών των διατάξεων ξεχωρίζουν ο κατακόρυφος προσανατολισμός των σωλήνων πίεσης και η υψηλή θερμοκρασία εξόδου του ψυκτικού από την καρδιά, η οποία τυπικά αγγίζει τους 500°C. Η θερμότητα στη συνέχεια, μεταφέρεται στους ατμοπαραγωγούς και κατόπιν ο ατμός οδηγείται στο στρόβιλο. Το πλεονέκτημα χρήσης διοξειδίου του άνθρακα ως ψυκτικό σε σχέση με τους παραδοσιακούς αντιδραστήρες βαρέως ύδατος είναι ότι το αέριο μπορεί να θερμανθεί σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες από ότι το νερό με συνέπεια καλύτερη θερμική αποδοτικότητα των συστημάτων. Στον αντίποδα, το CO₂ έχει σχετικά μέτριες δυνατότητες μεταφοράς και μετάδοσης θερμότητας. Οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιούσαν ως καύσιμο ελαφρώς εμπλουτισμένο ουράνιο, αλλά σύντομα εγκαταλείφθηκαν κι αντικαταστάθηκαν είτε από αντιδραστήρες τύπου CANDU, είτε από άλλους τύπους αεριοψυκτων αντιδραστήρων.

3.4.3.3 Προηγμένοι Αεριοψυκτοι Αντιδραστήρες

Πρόκειται για βρετανικούς αντιδραστήρες 2^{ης} γενιάς, που στην ουσία αποτελούν εξέλιξη των Magnox. Χρησιμοποιούν επίσης γραφίτη ως επιβραδυντή και διοξείδιο του άνθρακα ως ψυκτικό, αλλά είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες αερίου επιτυγχάνοντας υψηλότερο θερμικό βαθμό απόδοσης.

Οι προηγμένοι αεριοψυκτοι αντιδραστήρες (Advanced Gas Cooled Reactors- AGR) σχεδιάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε, η τελική κατάσταση του ατμού στην είσοδο του στρόβιλου να είναι πανομοιότυπη με εκείνη στους συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Κατά κανόνα, οι σταθμοί των AGR περιλαμβάνουν δύο αντιδραστήρες εγκατεστημένους στο ίδιο κτίριο, με τυπική ισχύ εξόδου από 550 – 670 MWe. Η καρδιά του αντιδραστήρα αποτελείται από μια 16- πλευρική στοίβα από διασυνδεδεμένους πλίνθους γραφίτη, όπου περιέχονται κάθετα κανάλια καυσίμου οργανωμένα σε τετράγωνα δικτυώματα. Τα κανάλια καυσίμου είναι οργανωμένα με τέτοιο τρόπο, ώστε το ψυκτικό να ρέει ανάμεσα στον επιβραδυντή και το καύσιμο. Ο σχεδιασμός αυτός επιβάλλεται από τις πολύ υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (η μέση θερμοκρασία θερμού ψυκτικού που βγαίνει από τον πυρήνα του αντιδραστήρα είναι 648 °C) προκειμένου να διασφαλιστεί η προστασία του γραφίτη στην καρδιά από την οξείδωση που υφίσταται όταν αντιδρά με το CO₂ σε τέτοιες θερμοκρασίες. Επιπλέον, για να ανταπεξέλθουν σε αυτές τις θερμοκρασίες οι ράβδοι καυσίμου επενδύονται με ανοξειδωτο χάλυβα. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι διοξείδιο του ουρανίου, ελαφρά εμπλουτισμένο.



Εικόνα 31: Σχηματικό διάγραμμα αντιδραστήρα AGR [33]

Βασικός πυλώνας στην ανάπτυξη των διατάξεων αυτών ήταν η υψηλή θερμική αποδοτικότητα, επιτυγχάνοντας θερμικό βαθμό απόδοσης της τάξεως του 41% που είναι σαφώς υψηλότερος από τον αντίστοιχο 34% των PWRs. Ιστορικά, αν και η λειτουργικότητα των διατάξεων αυτών επιτεύχθηκε το 1962, ο πρώτος AGR συνδέθηκε στην παραγωγή μόλις το 1976. Σήμερα υπάρχουν ακόμη εν ενεργεία αντιδραστήρες αυτού του τύπου στους πυρηνικούς σταθμούς Dugness B, Hartlepool, Heysham 1 & 2, Hinkley Point B, Hunterston B, Torness στην Αγγλία.

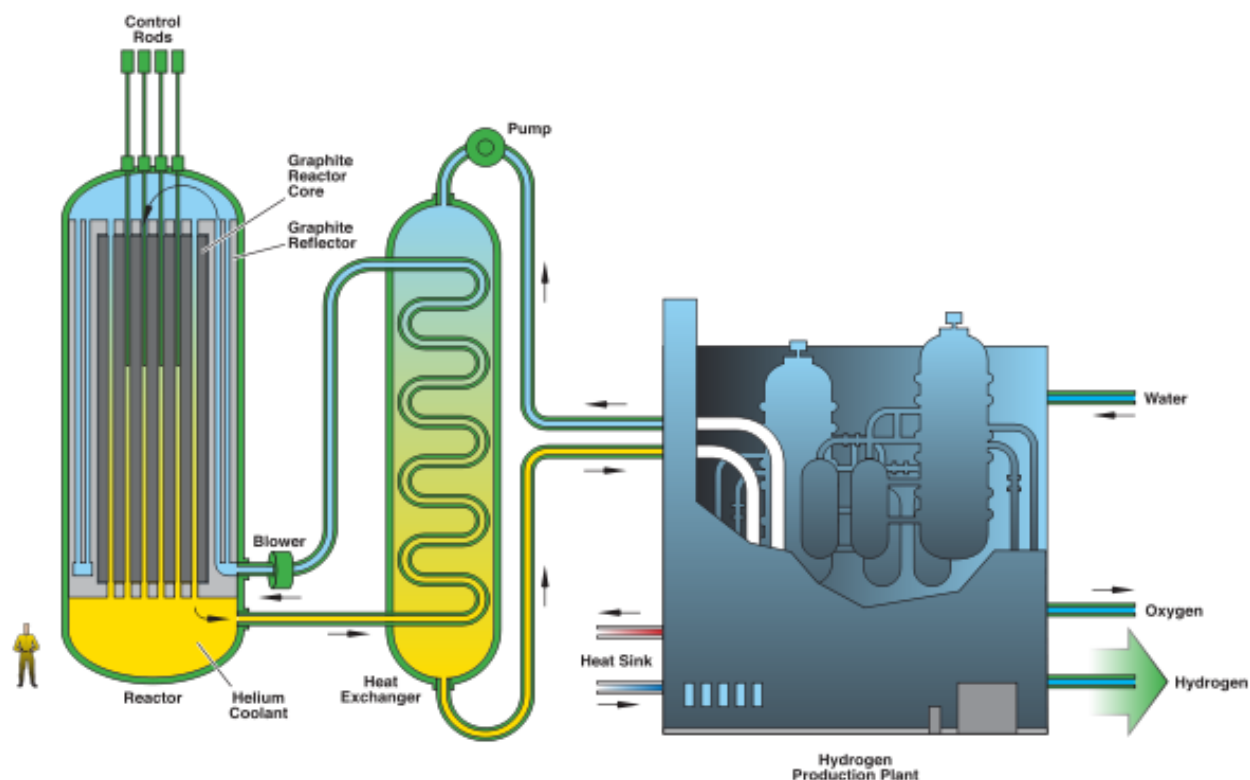
3.4.3.4 Αερίοψυκτοι Αντιδραστήρες Υψηλής Θερμοκρασίας

Οι αερίοψυκτοι αντιδραστήρες υψηλής θερμοκρασίας ((Very) High Temperature Gas-cooled Reactor – (V)HTGR) σχεδιάστηκαν κυρίως στη Γερμανία και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Είναι θερμικοί αντιδραστήρες 4^{ης} γενιάς που χρησιμοποιούν γραφίτη ως επιβραδυντή και ήλιο για ψύξη. Αν και το ήλιο θεωρητικά δεν απορροφά νετρόνια για να γίνει ραδιενεργό, στην πράξη αυτό δεν ισχύει καθώς αναμιγνύεται με μικρές ποσότητες ραδιενεργών αερίων που διαφεύγουν από το καύσιμο και με ραδιενεργά σωματίδια από τα τοιχώματα των καναλιών ψύξης.

Ως καύσιμο χρησιμοποιείται ένα μίγμα υψηλά εμπλουτισμένου ουρανίου U-235 και θωρίου. Κατά τη λειτουργία του αντιδραστήρα, ένα μέρος του θωρίου μετατρέπεται σε U-233, αλλά, καθώς ο αντιδραστήρας δεν αναπαράγει, το U-235 πρέπει να είναι πάντα διαθέσιμο. Η χρήση ουρανίου με υψηλό βαθμό εμπλουτισμού δίνει τη δυνατότητα σχεδιασμού σαφώς μικρότερων αντιδραστήρων σε σχέση με άλλους αερίοψυκτους αντιδραστήρες, μειώνοντας σημαντικά τα αρχικά κατασκευαστικά κόστη. Το καύσιμο οργανώνεται σε ράβδους που τοποθετούνται σε εξαγωνικές συστάδες καυσίμου και θωρακίζεται ώστε να μην έχουμε διαφυγή των προϊόντων της σχάσης. Ολόκληρη η διάταξη περιλαμβάνεται σε στεγανό δοχείο εγκλωβισμού.

Η λειτουργία των αντιδραστήρων αυτών είναι όμοια με εκείνη των βρετανικών AGR. Το ήλιο ψύχει στην καρδιά του αντιδραστήρα, περνώντας από ειδικά διαμορφωμένα κανάλια γραφίτη και στη συνέχεια οδηγείται στους ατμοπαραγωγούς και πάλι πίσω στην καρδιά μέσω κυκλοφορητών (άμεσος κύκλος λειτουργίας). Ο ατμός που παράγεται από τις μονάδες αυτές σε θερμοκρασία 540°C και πίεση 16 MPa, γεγονός που εξασφαλίζει υψηλή θερμική απόδοση της τάξης του 40%. Το συγκριτικό πλεονέκτημα των συστημάτων αυτών, άλλωστε, είναι η πολύ υψηλή θερμοκρασία του ψυκτικού ηλίου, η οποία τυπικά κυμαίνεται

μεταξύ 815°C και 870°C και η εξάλειψη του ενδιάμεσου κύκλου ατμού εξαιτίας της απευθείας χρήσης του ηλίου στον ατμοστρόβιλο για την οδήγηση των γεννητριών. Άμεση απόρροια του τελευταίου είναι η καλύτερη συνοχή των ατμοπαραγωγών και των επιμέρους συνιστωσών του κύκλου. Επιπλέον, επειδή η θερμοκρασία της θερμότητας που απορρίπτεται είναι πολύ υψηλή αυτή η ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές πέραν της ηλεκτροπαραγωγής, όπως αφαλάτωση νερού, αυξάνοντας τη συνολική απόδοση στο 50%.



Εικόνα 32: Σχηματικό διάγραμμα αεριοψυκτου αντιδραστήρα υψηλής θερμοκρασίας [34]

Στην κατηγορία αυτοί ανήκουν, επίσης, οι Pebble-bed Reactor (PBR). Πρόκειται για αεριοψυκτους αντιδραστήρες πολύ υψηλής θερμοκρασίας, που χρησιμοποιούν γραφίτη ως επιβραδυντή. Οφείλουν το όνομα τους στο σφαιρικό σχήμα που θυμίζει βότσαλο στο οποίο είναι διαμορφωμένο το πυρηνικό καύσιμο. Τα σφαιρίδια αυτά έχουν μέγεθος ανάλογο με μπαλάκι του τένις, αποτελούνται από πυρολυτικό γραφίτη (ο οποίος ενεργεί κι ως επιβραδυντής) και τυπικά περιέχουν σωματίδια μικρό-καυσίμου. Τα σωματίδια αυτά καλούνται TRISO και αποτελούνται από ένα σχάσιμο υλικό (όπως το U-235), το οποίο περιβάλλεται από ένα κεραμικό στρώμα καρβιδίου του πυριτίου. Η θωράκιση αυτή εξασφαλίζει τη δομική ακεραιότητα του καυσίμου και τη συγκράτηση των προϊόντων της σχάσης. Τυπικά, ο πυρήνας ενός PBR περιλαμβάνει μερικές χιλιάδες pebbles (το πλήθος των οποίων καθορίζει και την κρισιμότητα της διάταξης), η ψύξη των οποίων επιτυγχάνεται με κάποιο χημικά αδρανές ως προς τα στοιχεία του καυσίμου, πυρίμαχο αέριο, όπως το ήλιο, το άζωτο ή το διοξείδιο του άνθρακα. Έτσι, το πυρηνικό καύσιμο, η θωράκιση των προϊόντων της σχάσης και ο επιβραδυντής, που στους άλλους τύπους αντιδραστήρων αποτελούν διαφορετικά δομικά στοιχεία, τώρα βρίσκονται συγκεντρωμένα στο ίδιο σφαιρίδιο, γεγονός που μειώνει σημαντικά την πολυπλοκότητα της διάταξης. Οι PBRs χρησιμοποιούν αέριο ψυκτικό σε χαμηλές πιέσεις, το οποίο ρέει χωρίς την παρουσία

σωληνώσεων ανάμεσα στα σφαιρίδια του καυσίμου. Η απουσία υδρογόνου στο ψυκτικό αυξάνει την ασφάλεια και καθώς το αέριο ψυκτικό δεν απορροφά νετρόνια και ακαθαρσίες, μειώνεται σημαντικά η πιθανότητα να γίνει ραδιενεργό. Επιπλέον, οι αντιδραστήρες αυτοί είναι συμβατοί με διαφορετικούς τύπους καυσίμου, όπως θόριο, πλουτώνιο, φυσικό και εμπλουτισμένο ουράνιο (αν και δεν είναι εφικτή η ταυτόχρονη χρήση διαφορετικών τύπων καυσίμου). Η αντικατάσταση του καυσίμου είναι συνεχής και δεν απαιτεί τη διακοπή λειτουργίας της διάταξης. Κάθε σφαιρίδιο καυσίμου ανακυκλώνεται από τον πυθμένα προς της κορυφή της καρδιάς και ελέγχεται κάθε φορά που αφαιρείται. Εάν το καύσιμο έχει εξαντληθεί, το σφαιρίδιο αντικαθίσταται με ένα νέο και οδηγείται στο χώρο διαχείρισης των πυρηνικών αποβλήτων.

Οι PBRs χρησιμοποιούν παθητικά συστήματα ασφαλείας που εξασφαλίζουν την δυνατότητα ψύξης της διάταξης μέσω φυσικής κυκλοφορίας του ψυκτικού σε περίπτωση ατυχήματος. Επιπλέον, ο αντιδραστήρας είναι σε θέση να μειώσει παθητικά την παραγόμενη ισχύ σε περίπτωση αύξησης της θερμοκρασίας μέσω του φαινομένου διεύρυνσης Doppler. Αυτό το παθητικό στοιχείο ασφαλείας είναι χαρακτηριστικό των αντιδραστήρων που λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και δεν μπορεί να αξιοποιηθεί στους αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος, οι οποίοι απαιτούν συστήματα ενεργού ελέγχου. Έτσι, ακόμη κι όλα τα μηχανικά μέρη της διάταξης αποτύχουν ο αντιδραστήρας δεν εκρήγνυται κι αποτρέπεται το λιώσιμο της καρδιάς και η διαρροή επικίνδυνων αποβλήτων προς το περιβάλλον. Αυτό που συμβαίνει στην πραγματικότητα είναι πως ο αντιδραστήρας παραμένει σε μία προβλεπόμενη κατάσταση «ρελαντί» και μένει εκεί. Σε αυτή την κατάσταση το δοχείο του αντιδραστήρα ακτινοβολεί θερμότητα αλλά τόσο αυτό όσο και τα σφαιρίδια καυσίμου παραμένουν ανέπαφα και ασφαλή. Έτσι, το πυρηνικό καύσιμο μπορεί να απομακρυνθεί και τα μηχανικά μέρη να επισκευαστούν.

3.4.4 Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες

Οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες εικάζεται πως θα αποτελέσουν το μέλλον της πυρηνικής βιομηχανίας [29, 31]. Η πλειοψηφία των σχέσεων στους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες προκαλούνται από ταχεία νετρόνια, αποδίδοντας μεγαλύτερο αριθμό n νετρονίων μετά τη σχάση. Για το λόγο αυτό ονομάζονται αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων (Fast Breeder Reactor – FBR). Με τη χρήση των αναπαραγωγικών αντιδραστήρα, η βάση καυσίμου είναι το ισότοπο U-238 ή το θόριο, που βρίσκονται σε μεγαλύτερη αφθονία από το U-235. Επιπλέον, τα κατάλοιπα που προκύπτουν μετά τη διαδικασία εμπλουτισμού του ουρανίου— κυρίως U-238— μπορούν, επίσης να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο στους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες.

Η επιτακτικότητα της ανάγκης ανάπτυξης κι εγκατάστασης αναπαραγωγικών αντιδραστήρων, βέβαια, δεν αναγνωρίζεται εξίσου από όλες τις χώρες, κυρίως εξαιτίας της διάστασης απόψεων που επικρατεί σχετικά με την επάρκεια των κοιτασμάτων φυσικού ουρανίου και τη μελλοντική διάδοση της πυρηνικής τεχνολογίας. Έτσι, σε κάποιες χώρες υπάρχει η πεποίθηση πως επαρκείς ποσότητες ουρανίου θα ανακαλυφθούν και θα παραχθούν, παρά το αυξανόμενο κόστος, ικανοποιώντας τις υπάρχουσες ανάγκες μέσα στο πρώτο μισό του επόμενου αιώνα. Ένα μεγάλο μέρος της επιστημονικής κοινότητας, διατηρεί περισσότερες επιφυλάξεις σχετικά με τα αποθέματα ουρανίου και θεωρεί τους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες ως τη μόνη διέξοδο σε μια ενδεχόμενη μελλοντική «πυρηνική εποχή».

Σε χώρες χωρίς φυσικά κοιτάσματα ουρανίου, βέβαια, όπως η Αγγλία, η Γαλλία, η Γερμανία, η Ιαπωνία κτλ, οι αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες δεν αποτελούν τη λύση του μέλλοντος, αλλά τη σύγχρονη πραγματικότητα καθώς πρέπει να εκμεταλλεύονται στο έπακρο τις ποσότητες φυσικού ουρανίου που εισάγουν. Επιπρόσθετα, οι χώρες αυτές διαθέτουν ή είναι σε θέση να παράγουν μεγάλες ποσότητες εμπλουτισμένου ουρανίου. Η

Γαλλία, λ.χ. , εκτιμάται πως διαθέτει αρκετό εμπλουτισμένο ουράνιο για να ικανοποιήσει τις ενεργειακές της ανάγκες για τα επόμενα 100 χρόνια.

Ο πρώτος πειραματικός αναπαραγωγικός αντιδραστήρας αναπτύχθηκε το 1946, στο Los Alamos του Νέου Μεξικού, χρησιμοποιούσε ως καύσιμο πλουτώνιο και υδράργυρο ως ψυκτικό και παρήγαγε μια ισχύ της τάξης των ~25kW. Αργότερα, το 1951 αναπτύχθηκε στο Idaho, ένας αναπαραγωγικός αντιδραστήρας που ψυχόταν με τη χρήση ενός μίγματος καλίου- νατρίου και απέδιδε ισχύ 1,3 MW, ο EBR- I (Experiment Breeder Reactor- I). Οι πιο σημαντικοί τύποι αναπαραγωγικών αντιδραστήρων αναλύονται παρακάτω.

3.4.4.1 Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων υγρού-μετάλλου

Πρόκειται για την κύρια κατηγορία αναπαραγωγικών αντιδραστήρων που παρουσιάζουν εμπορική τυποποίηση και χρησιμοποιούνται διεθνώς για ηλεκτροπαραγωγή. Χρησιμοποιούν κύκλο καυσίμου ουρανίου- πλουτωνίου. Συγκεκριμένα, η καρδιά του αντιδραστήρα τροφοδοτείται με ισότοπα πλουτωνίου ενώ ο μανδύας επώασης περιέχει φυσικό ή εμπλουτισμένο ουράνιο. Καθώς ο λόγος και το κέρδος αναπαραγωγής αυξάνονται ανάλογα με την ενέργεια των νετρονίων που προκαλούν τη σχάση, η επιβράδυνση των νετρονίων αποφεύγεται και έτσι στους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες δεν υπάρχει επιβραδυντής: η καρδιά κι ο μανδύας επώασης περιλαμβάνουν μόνο τις ράβδους καυσίμου και το ψυκτικό.

Στην πλειοψηφία των σύγχρονων αναπαραγωγικών αντιδραστήρων ταχέων νετρονίων υγρού- μετάλλου (Liquid Metal Cooled Fast Breeder Reactor- LMFBR), το ψυκτικό που χρησιμοποιείται είναι το νάτριο, το οποίο δεν επιβραδύνει τα νετρόνια μέσω ελαστικών σκεδάσεων χάρη στο μικρό ατομικό του βάρος κι έχει εξαιρετική ικανότητα απαγωγής θερμότητας, επιτρέποντας στους LMFBR, να λειτουργούν με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Έτσι, οι διαστάσεις της καρδιάς παραμένουν μικρές. Μια ακόμη σημαντική ιδιότητα είναι το υψηλό σημείο ζέσης (~882°C σε ατμοσφαιρική πίεση) που επιτρέπει στο κύκλωμα ψυκτικού να λειτουργεί σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πρακτικά πίεσης, χωρίς να βράζει, αίροντας την ανάγκη για την ύπαρξη δοχείου πίεσης. Τέλος, το νάτριο σε αντίθεση με το νερό δεν φθείρει τα δομικά υλικά του αντιδραστήρα. Στον αντίποδα, το νάτριο είναι υψηλά ενεργό χημικά. Όταν είναι ζεστό αντιδρά βίαια με το νερό κι όταν έρχεται σε επαφή με τον αέρα αναφλέγεται, παράγοντας πυκνούς λευκούς καπνούς. Η έκλυση λευκού καπνού, βέβαια, καθιστά εύκολο τον εντοπισμό και τον περιορισμό των διαρροών, γεγονός που εξηγεί γιατί οι LMFBR έχουν πολύ μικρότερη εκπομπή ακτινοβολίας από τους αντίστοιχους LWR.

Παράλληλα, ο τρόπος με τον οποίο το ζεστό νάτριο αντιδρά με το νερό σε συνδυασμό με την ιδιότητα του να απορροφά νετρόνια γεννώντας ακτινοβολία β και γ καθιστούν αναγκαία την ύπαρξη και δεύτερου κυκλώματος νατρίου. Αναλυτικότερα, το νάτριο απορροφά νετρόνια, ακόμη και ταχέα, με αποτέλεσμα μετά τη διέλευσή του από την καρδιά του αντιδραστήρα να γίνεται ραδιενεργό. Έτσι, δεν είναι η δυνατή η απευθείας χρήση του για την παραγωγή ατμού στις ατμοπαραγωγούς μονάδες του σταθμού. Αντί αυτού, στα εργοστάσια όπου υπάρχουν εγκατεστημένοι LMFBRs χρησιμοποιούνται δύο κυκλώματα νατρίου: το πρωτεύον περιέχει το ραδιενεργό νάτριο κι ένα ενδιάμεσο με μη ραδιενεργό νάτριο που μεταφέρει με τη βοήθεια εναλλακτών την θερμότητα από το πρωτεύον στις ατμοπαραγωγούς μονάδες.

3.4.4.2 Αναπαραγωγικοί αεριοψυκτοί αντιδραστήρες

Πρόκειται για αντιδραστήρες 4^{ns} γενιάς που βρίσκονται υπό ανάπτυξη. Οι αναπαραγωγικοί αεριοψυκτοί αντιδραστήρες (Gas Cooled Fast Reactor - GCFR) χρησιμοποιούν ήλιο ως ψυκτικό κι ένα κράμα πλουτωνίου ουρανίου ως καύσιμο. Ο

πυρήνας τους είναι όμοιος με εκείνο των LMFBR. Το ψυκτικό εισέρχεται στην καρδιά από το κάτω μέρος σε θερμοκρασία 298°C και εξέρχεται από την κορυφή σε θερμοκρασία 520°C. Το θερμό ήλιο κατευθύνεται στη συνέχεια σε τρεις ατμοπαραγωγούς υπό την επίδραση κυκλοφορητών, όπως απεικονίζεται και στο σχηματικό διάγραμμα. Σε αντίθεση με τους LMFBR, οι διατάξεις αυτές δεν απαιτούν ενδιάμεσους εναλλάκτες θερμότητας για την κύρια λειτουργία τους. Ωστόσο, συνήθως περιλαμβάνονται βοηθητικοί κυκλοφορητές κι εναλλάκτες θερμότητας σε περίπτωση αποτυχίας του κεντρικού ψυκτικού συστήματος. Οι ατμοπαραγωγοί παράγουν υπέρθερμο ατμό σε θερμοκρασία 485°C, ενώ ολόκληρο το κύκλωμα ατμού μπορεί να αντικατασταθεί και το ήλιο να χρησιμοποιηθεί απευθείας στην ατμογεννήτρια, με πολλαπλά οφέλη.

Η χρήση ηλίου, άλλωστε, βελτιώνει σημαντικά το λόγο αναπαραγωγής καθώς δεν επιβραδύνει τα νετρόνια του αντιδραστήρα και δεν λαμβάνουν χώρα ανελαστικές σκεδάσεις όπως συμβαίνει στους LMFBR. Επιπλέον, επειδή το ήλιο στους GCFR δεν γίνεται υπερβολικά ραδιενεργό, οι εργασίες συντήρησης κι επισκευής μπορούν να πραγματοποιούνται πολύ σύντομα αμέσως μετά το κλείσιμο του αντιδραστήρα. Παράλληλα, εάν προκύψει κάποια βλάβη στο εσωτερικό του αντιδραστήρα είναι εύκολο να εντοπισθεί και να εξακριβωθεί με οπτικά μέσα. Ως εκ τούτου μειώνεται στο ελάχιστο ο χρόνος που απαιτείται να παραμένει εκτός λειτουργίας ο σταθμός παραγωγής, με προφανή οικονομικά οφέλη. Στον αντίποδα, στους LMFBR είναι αναγκαία η διαρκής θέρμανση του νατρίου, το οποίο είναι και ραδιενεργό και αδιαφανές, καθιστώντας ως εκ τούτου δύσκολες και πολύπλοκες τις εργασίες συντήρησης.

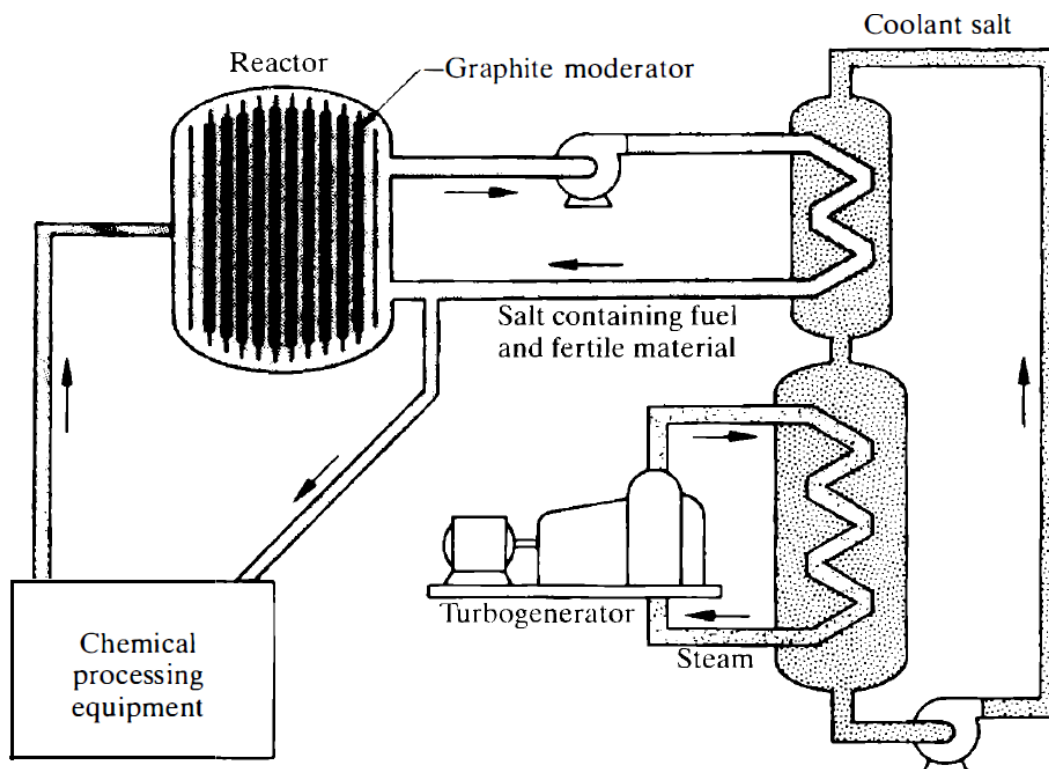
3.4.4.3 Αναπαραγωγικοί αντιδραστήρες τετηγμένων αλάτων

Πρόκειται, επίσης, για θερμικούς αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες. Χρησιμοποιούν κύκλο U-233 και θορίου και στηρίζονται σε ένα διαφορετικό τρόπο σχεδίασης, όπου το καύσιμο, το γόνιμο υλικό και το ψυκτικό έχουν αναμειχθεί σε ένα ομογενοποιημένο υγρό. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται μια ποικιλία φθοριούχων αλάτων, τα οποία θερμαίνονται μέχρι την τήξη τους σε ένα καθαρό, μη ιξώδες υγρό. Τα φθοριούχα άλατα συγκεντρώνουν σημαντικές ιδιότητες καθώς έχουν χαμηλό ποσοστό απορρόφησης νετρονίων, υψηλή διαλυτότητα στο ουράνιο και συγκαταλέγονται στις πιο σταθερές χημικές ενώσεις με καλές θερμικές ικανότητες και πολύ χαμηλή πίεση ατμών σε υψηλές θερμοκρασίες. Το γεγονός αυτό επιτρέπει στους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες τετηγμένων αλάτων (Molten - Salt Breeder Reactor- MSBR) να λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, αυξάνοντας το συνολικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης σε ~44% και χαμηλές πιέσεις, ελαφρώς υψηλότερες της ατμοσφαιρικής χωρίς την ανάγκη ύπαρξης ακριβού δοχείου πίεσης. Παράλληλα, τα άλατα δεν καταστρέφονται από την ακτινοβολία και δεν αντιδρούν βίαια με το νερό ή τον αέρα, με πολλά αυτά να παραμένουν αδρανή ακόμη και με το γραφίτη.

Όπως φαίνεται και στο σχηματικό διάγραμμα του επόμενου σχήματος (εικόνα 33), η καρδιά του αντιδραστήρα αποτελείται από μια διάταξη στοιχείων γραφίτη που περιλαμβάνει κανάλια για τη διέλευση του μίγματος τετηγμένων αλάτων. Καθώς το υγρό διασχίζει την καρδιά, το σύστημα γίνεται κρίσιμο και η ενέργεια της σχάσης απορροφάται απευθείας από το υγρό, το οποίο έχοντας πλέον θερμανθεί οδηγείται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας σε ένα ενδιάμεσο βρόχο ψύξης. Στη συνέχεια, το υγρό μίγμα οδηγείται πίσω στην καρδιά, έχοντας κατά ένα ποσοστό υποστεί χημική επεξεργασία σε μια ξεχωριστή διάταξη όπου αφαιρούνται τα προϊόντα της σχάσης.

Αυτό το «φιλτράρισμα» του πυρηνικού καυσίμου είναι πολύ σημαντικό καθώς η αύξηση της συγκέντρωσης των προϊόντων της σχάσης στο πυρηνικό καύσιμο είναι αυτή που είναι υπεύθυνη για την ανάγκη περιοδικής ανανέωσης του καυσίμου στους αντιδραστήρες που εξετάσαμε έως τώρα. Έτσι, οι αντιδραστήρες τετηγμένων αλάτων μπορούν να λειτουργούν

για μεγάλες χρονικές περιόδους χωρίς την ανάγκη ανεφοδιασμού και επανεκκίνησης. Επιπλέον, εξαιτίας της σημαντική εξοικονόμησης νετρονίων που τους χαρακτηρίζει οι MSBR απαιτούν σημαντικά μικρότερες ποσότητες καυσίμου - περίπου 1-1,2 kg σχάσιμου υλικού/ MWe (ισχύς εξόδου), ενώ η αντίστοιχη ποσότητα που χρησιμοποιεί ένας LWR είναι 3 kg και 3-4 kg στους LMFBR). Στον αντίποδα, το γεγονός ότι το ραδιενεργό μίγμα παίζει τόσο σημαντικό ρόλο στον κύκλο παραγωγής και έρχεται σε επαφή με πολλές διατάξεις, αυξάνει σημαντικά το κόστος των εργασιών συντήρησης κι επισκευής που απαιτούν απομακρυσμένες κι αυτοματοποιημένες διαδικασίες.



Εικόνα 33: Σχηματικό διάγραμμα αναπαραγωγικού αντιδραστήρα τετηγμένου άλατος [31]

3.4.4.4 Αναπαραγωγικοί Αντιδραστήρες Ελαφρού Ύδατος (Light Water Breeder Reactors)

Παρά την επικρατούσα για χρόνια άποψη πως δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστεί ένας αναπαραγωγικός αντιδραστήρας ελαφρού ύδατος, εξαιτίας της υψηλής απορρόφησης θερμικών νετρονίων από το νερό, οι LWBRs είναι πλέον διαθέσιμοι αν και το κέρδος αναπαραγωγής τους είναι σαφώς χαμηλότερο από εκείνο των υπόλοιπων αναπαραγωγικών αντιδραστήρων. Για να καταστεί δυνατή η αναπαραγωγή, αποφασίστηκε η μείωση της ποσότητας νερού σε σχέση με το καύσιμο. Οι μεγαλύτερες ποσότητες καυσίμου που απαιτούν οι LWBRs αντισταθμίζεται από τη δυνατότητα χρήσης Th-232, το οποίο βρίσκεται σε σχετική αφθονία φυσικών πηγών.

Παρ' όλα αυτά, οι αντιδραστήρες αυτοί βρίσκονται ακόμη υπό ανάπτυξη και αναμένεται να βελτιώσουν σημαντικά τον τρόπο με τον οποίο αξιοποιούνται τα πυρηνικά καύσιμα.

3.4.5 Πυρηνικοί Αντιδραστήρες Σύντηξης

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες σύντηξης αποτελούν μια διαφορετική τεχνολογία αντιδραστήρων, η οποία ακόμη βρίσκεται σε πολύ πρώιμο στάδιο ανάπτυξης, παρά τις μακροχρόνιες έρευνες που έχουν συντελεστεί. Στηρίζονται στην πυρηνική σύντηξη κι όχι σχάση, όπως οι αντιδραστήρες που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Κατά τη πυρηνική σύντηξη πραγματοποιείται η συνένωση δύο ελαφρών πυρήνων για το σχηματισμό ενός βαρύτερου. Επειδή η μάζα των προϊόντων της σύντηξης είναι μικρότερη από το άθροισμα των μαζών των αρχικών πυρήνων κατά τη σύντηξη εκλύονται σημαντικά ποσά ενέργειας.

Στους αντιδραστήρες σύντηξης δε θα χρησιμοποιούνται, λοιπόν, βαρείς πυρήνες ουρανίου ή θορίου, αλλά υδρογόνο το οποίο βρίσκεται στη φύση σε αφθονία και δεν είναι ραδιενεργό. Έτσι, οι αντιδραστήρες σύντηξης αναμένεται να είναι ακίνδυνοι, καθώς το μόνο σχετικά ραδιενεργό στοιχείο που μπορεί να παραχθεί στον κύκλο λειτουργίας τους είναι το τρίτιο (ισότοπο του υδρογόνου με δύο νετρόνια στον πυρήνα του), το οποίο είναι σχετικά ασφαλές για τον άνθρωπο και το περιβάλλον (ειδικά στον άνθρωπο η έκθεση σε μεγάλες ποσότητες τρίτιου μπορεί να προκαλέσει προβλήματα γονιμότητας).

Παρ' όλα αυτά, οι πιέσεις που απαιτούνται για την πρόκληση της σύντηξης καθιστούν οικονομικά ασύμφορη αυτή την τεχνολογία. Για το λόγο αυτό και καθώς δεν υπάρχει ακόμη τυποποίηση κι εμπορευματοποίηση τους, οι αντιδραστήρες σύντηξης δεν ελήφθησαν υπόψη στην παρούσα εργασία.

3.5 Ασφάλεια Πυρηνικών Αντιδραστήρων

Ο σχεδιασμός, η κατασκευή και οι διαδικασίες λειτουργίας των πυρηνικών αντιδραστήρων υπακούουν σε υψηλά πρότυπα ασφαλείας, τα οποία καθορίζονται κι επιβλέπονται από διεθνείς οργανισμούς. Αναλυτικά, οι φορείς που είναι αρμόδιοι για τη διασφάλιση της ασφαλούς ανάπτυξης της πυρηνικής ενέργειας είναι:

- Οι δύο επιτροπές για την ασφάλεια των πυρηνικών εγκαταστάσεων της Υπηρεσίας Πυρηνικής Ενέργειας (Nuclear Energy Agency): Committee on the Safety of Nuclear Installations, CSNI με τη συμμετοχή ερευνητικών φορέων και η Committee on Nuclear Regulatory Activities, CRNA που συγκροτείται κυρίως από ρυθμιστικούς φορείς κι είναι υπεύθυνη για τρέχοντα θέματα ασφαλείας σε υψηλό επίπεδο.
- Ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας που προτείνει και συντάσσει πρότυπα, κανονισμούς κι οδηγίες ασφαλείας, κατοχυρώνει διεθνείς συμβάσεις κι οργανώνει ενημερωτικά, υποστηρικτικά προγράμματα για μια ειρηνική και κατά το δυνατόν ασφαλέστερη πυρηνική ανάπτυξη.
- Η Δυτικοευρωπαϊκή Ρυθμιστική Αρχή για την Πυρηνική Ενέργεια – Western European Nuclear Regulation's Association, που απαρτίζεται από τους επικεφαλές των ευρωπαϊκών ρυθμιστικών επιτροπών.

Επιπλέον, τα πρότυπα ασφαλείας για τα πυρηνικά εργοστάσια υπόκεινται και στους εθνικούς περιορισμούς κι ελέγχους της χώρας εγκατάστασης. Μάλιστα, στατιστικά η πυρηνική ενέργεια αποτελεί την ασφαλέστερη από πλευράς ατυχημάτων πηγή ηλεκτροπαραγωγής.

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες, όπως είδαμε, αποτελούνται από πολλές επιμέρους συνιστώσες, καθεμία από τις οποίες έχει ένα βαθμό αξιοπιστίας και μια πιθανή αστοχία θα μπορούσε να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στη λειτουργία του αντιδραστήρα με μη ελέγξιμες πιθανόν συνέπειες. Για το λόγο αυτό ο προγραμματισμός και σχεδιασμός ασφαλείας ενός πυρηνικού σταθμού στηρίζεται στην καλούμενη **άμυνα σε βάθος**, σύμφωνα με την οποία:

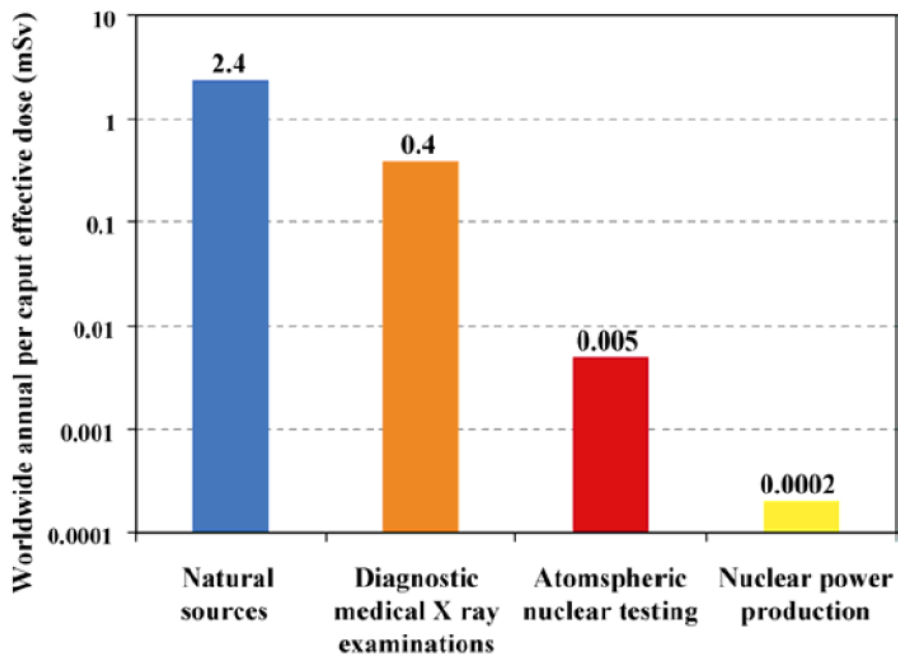
- 1) Πρέπει να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα πρόκλησης ατυχήματος. Συγκεκριμένα, θεσπίζεται μια προδιαγεγραμμένη τιμή την οποία δεν μπορεί να υπερβεί η πιθανότητα εκκίνησης ατυχήματος.
- 2) Επιβάλλεται το σύστημα να έχει σχεδιαστεί και να λειτουργεί έτσι ώστε σε περίπτωση που εκκινήσει κάποιο ατύχημα να αποτρέψει την ανάπτυξη του και να επαναφέρει τον αντιδραστήρα σε ασφαλή κατάσταση. Η πιθανότητα πρόκλησης εκτεταμένου πυρηνικού ατυχήματος πρέπει, επίσης, να είναι μικρότερη από μια καθορισμένη τιμή που προβλέπεται από τους κανονισμούς της χώρας στην οποία εγκαθίσταται ο αντιδραστήρας.
- 3) Τέλος, σε περίπτωση ατυχήματος, πρέπει ο σχεδιασμός και η κατασκευή του συστήματος να είναι τέτοιος ώστε να ελαχιστοποιούνται οι συνέπειες στο περιβάλλον και την κοινωνία.

Ως δείκτης της ασφάλειας ενός πυρηνικού σταθμού έχει θεσμοθετηθεί το worst case scenario κατά τη λειτουργία του που είναι η εμφάνιση ενός **LOCA –Loss of Coolant Accident**, ενός **ατυχήματος** δηλαδή **απώλειας ψυκτικού**. Πρόκειται για μια από τις κρισιμότερες καταστάσεις που μπορεί να προκύψουν σε έναν αντιδραστήρα και για αυτό η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εμφάνισής του και ο άμεσος περιορισμός των συνεπειών του αποτελούν βασικό στοιχείο στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη των αντιδραστήρων. Σκοπός είναι σε κάθε περίπτωση να τεθεί όσο πιο γρήγορα γίνεται εκτός λειτουργίας ο αντιδραστήρας.

Σε περίπτωση αστοχίας του συστήματος αυτόματου ελέγχου κι αδυναμίας έγκαιρης διακοπής της λειτουργίας του αντιδραστήρα και αποτελεσματικής ψύξης της καρδιάς μετά το LOCA, είναι πιθανό να προκληθεί τήξη γυμνών, δηλαδή μη περιβαλλόμενων και μη ψυχόμενων από νερό ράβδων καυσίμου και τελικά μερική ή ολική **τήξη της καρδιάς** του αντιδραστήρα (**core meltdown**). Στόχος του σχεδιασμού του αντιδραστήρα είναι η μείωση της πιθανότητας ατυχήματος κάτω από μια προδιαγεγραμμένη τιμή που επιβάλλεται από τα πρότυπα ασφαλείας και την ισχύουσα νομοθεσία στη χώρα εγκατάστασης. Στα σύγχρονα πυρηνικά εργοστάσια, το κόστος της ασφάλειας είναι περίπου το 25% του συνολικού κόστους του κεφαλαίου [35].

Επιπλέον, κατά την αξιολόγηση της ασφάλειας των πυρηνικών σταθμών συνυπολογίζεται η ακτινοβολία στην οποία εκτίθενται τα άτομα που εργάζονται σε αυτόν ή διαβιούν πλησίον του. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της εικόνας 32, η δόση αυτή είναι μικρότερη κατά τέσσερις τάξεις μεγέθους από την αντίστοιχη ακτινοβολία ραδιενεργών υλικών που συναντώνται στο φυσικό περιβάλλον και πρακτικά θεωρείται αμελητέα.

Τέλος, οι προδιαγραφές κατασκευής των πυρηνικών σταθμών θέτουν αυστηρούς κανονισμούς για την προστασία από σεισμούς κι άλλα εξωτερικά γεγονότα. Αυτό επιτυγχάνεται τόσο με τα αυστηρά κριτήρια επιλογής της περιοχής εγκατάστασης όσο και με τις υψηλές προδιαγραφές για την αντοχή και την αξιοπιστία των υλικών του σταθμού. Ενδεικτικά, αναφέρουμε πως στη Γαλλία οι εθνικοί κανονισμοί για τους πυρηνικούς αντιδραστήρες θέτουν ως όριο την αντοχή σε σεισμό διπλάσιου μεγέθους από το εκτιμώμενο της ισχυρότερης σεισμικής δόνησης που ενδέχεται να καταγραφεί εντός χιλιετίας στην περιοχή εγκατάστασης του σταθμού. Στην ίδια λογική, οι κανονισμοί προβλέπουν την προληπτική διακοπή λειτουργίας των αντιδραστήρων μέσω scram σε περίπτωση σεισμικής δραστηριότητας πάνω από ένα συγκεκριμένο όριο. Αφού, η κατάσταση εξομαλυνθεί πραγματοποιείται επανεκκίνηση του σταθμού. Οι τυπικές προδιαγραφές αντοχής που τίθενται εν γένει εξετάζουν το σενάριο σεισμού 6,5 βαθμών στην κλίμακα Ρίχτερ με επίκεντρο ακριβώς κάτω από τον αντιδραστήρα. Σε ιδιαίτερα σειсмоγενείς περιοχές λαμβάνονται ως κριτήριο ισχυρότερες σεισμικές δονήσεις.



Εικόνα 34: Δόσεις Ακτινοβολίας [27]

Πυρηνικά Ατυχήματα

Τρία είναι τα σημαντικότερα πυρηνικά ατυχήματα που έχουν καταγραφεί στην παγκόσμια ιστορία, αυτό στο Three Mile Island (PWR), το ατύχημα στο Chernobyl (RMBK) και το πρόσφατο περιστατικό στη Fukushima. Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκαν τα παραπάνω ατυχήματα καθώς και οι επιπτώσεις τους παρουσιάζονται αναλυτικά ακολούθως.

- Three Mile Island:** Στο πυρηνικό σταθμό του Three Mile Island, κοντά στο Harrisburg της Pennsylvania των Ηνωμένων Πολιτειών προκλήθηκε μερική τήξη της καρδιάς του αντιδραστήρα. Πρόκειται για το σημαντικότερο ατύχημα στην ιστορία της αμερικανικής πυρηνικής βιομηχανίας που οδήγησε στην απελευθέρωση στο περιβάλλον σχεδόν 2,5 εκατομμυρίων curies³ ραδιενεργών αερίων και 15 curies ιωδίου -131 [36]. Το Three Mile Island είναι ένα μακρόστενο νησί, πάνω στο οποίο έχει χτιστεί ένα συγκρότημα αντιδραστήρων τύπου PWR. Τα ξημερώματα της 28^{ης} Μαρτίου 1979, οι αντλίες που τροφοδοτούσαν με νερό τις τουρμπίνες της ηλεκτρογεννήτριας της μονάδας TMI-2 σταμάτησαν να λειτουργούν με συνέπεια τη διακοπή ροής νερού και παραγωγής ηλεκτρισμού. Το αυτοματοποιημένο σύστημα ασφαλείας, έθεσε άμεσα εκτός λειτουργίας την τουρμπίνα και την ηλεκτρογεννήτρια. Ωστόσο, καθώς δεν υπήρχε ροή νερού προς την καρδιά του αντιδραστήρα σταμάτησε και η απαιτούμενη ψύξη του πυρήνα του αντιδραστήρα, με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση της καρδιάς και την απότομη αύξηση της πίεσης. Ενεργοποιήθηκε τότε η βαλβίδα ασφαλείας στο επάνω μέρος του περιβλήματος της καρδιάς, απελευθερώνοντας ένα μέρος του ατμού. Ταυτόχρονα, διακόπηκε οι ράβδοι ελέγχου βυθίστηκαν στην καρδιά, διακόπτοντας την αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης. Παρ' όλα αυτά, η ραδιενεργός διάσπαση των προϊόντων

³ Πρόκειται για μονάδα μέτρησης της ραδιενέργειας. Ορίζεται ως: 1 Ci = 3.7 * 10¹⁰ διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο. Τυπικά στο ανθρώπινο σώμα υπό φυσιολογικές συνθήκες συναντάμε περίπου 0,1 mCi φυσικού καλίου -40.

της σχάσης συνέχισε να απελευθερώνει θερμότητα (ποσότητα μεγαλύτερη του 7% της θερμότητας σχάσης σε συνθήκες ομαλής λειτουργίας) [36, 37].

Η αλληλουχία των παραπάνω γεγονότων είχε ως αποτέλεσμα να μείνει το πάνω μέρος της καρδιάς του αντιδραστήρα, να υπερθερμανθεί το πυρηνικό καύσιμο και τελικά να αντιδράσει χημικά με το νερό παράγοντας υδρογόνο. Κατόπιν, ποσότητα υδρογόνου διέφυγε προς την οροφή του κτιρίου προκαλώντας έκρηξη και απελευθερώνοντας μεγάλες ποσότητες ραδιενέργειας. Μετά από αυτό, διατάχθηκε η απομάκρυνση των εγκύων και των παιδιών προσχολικής ηλικίας σε μία ακτίνα 8 χιλιομέτρων από τον πυρηνικό σταθμό. Συνολικά 140000 άτομα απομακρύνθηκαν από τα σπίτια τους, ενώ χρειάστηκαν 6 μέρες για τη σταθεροποίηση της κατάστασης στην καρδιά του αντιδραστήρα. Τελικά, η μονάδα TMI-2 σφραγίστηκε κάτω από τόνους σκυροδέματος και τον Αύγουστο του ίδιου έτους ξεκίνησαν οι εργασίες καθαρισμού των ραδιενεργών υλικών που διέρρευσαν, οι οποίες ολοκληρώθηκαν το Δεκέμβριο του 1993 και στοιχισαν συνολικά πάνω από ένα δισεκατομμύριο δολάρια. Το ατύχημα αυτό εκτιμήθηκε ως «Ατύχημα με ευρύτερες συνέπειες» στο επίπεδο 5 της επτάβάθμιας διεθνούς κλίμακας κατάταξης των πυρηνικών συμβάντων. Παρά ταύτα, σήμερα, είναι ευρέως, αν κι όχι καθολικά αποδεκτό, πως οι συνέπειες του ατυχήματος στη δημόσια υγεία ήταν μικρές [38].

- **Chernobyl:** Στις 26 Απριλίου 1986, στο συγκρότημα πυρηνικών αντιδραστήρων του Chernobyl στην Ουκρανία έλαβε χώρα ένα από τα χειρότερα πυρηνικά ατυχήματα στην ιστορία της ανθρωπότητας, κι ένα από τα δύο που κατηγοριοποιήθηκαν στο επίπεδο 7 της Διεθνούς Κλίμακας Αξιολόγησης Πυρηνικών Συμβάντων (το δεύτερο είναι το ατύχημα στη Fukushima). Όλα ξεκίνησαν με μια καταστροφική και απροσδόκητη αύξηση της ισχύος στον αντιδραστήρα Νο 4 του πυρηνικού σταθμού κατά τη διάρκεια προγραμματισμένης άσκησης ασφαλείας σε περίπτωση αστοχίας του συστήματος ψύξης της καρδιάς. Αποτέλεσμα ήταν η πρόκληση ρήγματος στο δοχείο του αντιδραστήρα και μια σειρά από εκρήξεις ατμού.

Συγκεκριμένα, εκείνο το βράδυ κατά τη διάρκεια του κανονικού τερματισμού της λειτουργίας του αντιδραστήρα, είχε προγραμματιστεί η υλοποίηση ενός πειράματος προκειμένου να διασφαλιστεί πως σε περίπτωση ανάγκης η παροχή νερού στο σύστημα ψύξης του αντιδραστήρα από τις αντλίες στο διάστημα που απαιτείται για την εκκίνηση των βοηθητικών γεννητριών θα ήταν επαρκής. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, παρουσιάστηκαν σημαντικά προβλήματα στην ψύξη και τη σταθεροποίηση της λειτουργίας του αντιδραστήρα στα προβλεπόμενα επίπεδα ισχύος. Παρά τις προσπάθειες των χειριστών, να διατηρήσουν την ισχύ εξόδου σταθερή, συνέβη μια απότομη αύξηση (η ισχύς εξόδου του αντιδραστήρα από τα 200 MW αυξήθηκε στα 530 MW σε τρία μόλις δευτερόλεπτα) η οποία τελικά φαίνεται πως πυροδότησε μια σειρά μη αντιστρέψιμων γεγονότων με τα γνωστά αποτελέσματα. Σημειώνουμε πως δεν υπάρχουν επίσημα καταγεγραμμένα στοιχεία για το τι ακολούθησε την απότομη αυτή αύξηση ισχύος, αλλά προσομοιώσεις που έγιναν δείχνουν πως τόσο η θερμοκρασία του καυσίμου όσο και η πίεση του ατμού αυξήθηκαν απότομα με αποτέλεσμα τη διάρρηξη της επένδυσης των ράβδων καυσίμου, και την ανάμειξη του σχάσιμου υλικού με το ψυκτικό. Κατόπιν, η ισχύς που παρήγαγε ο αντιδραστήρας ξεπέρασε το δεκαπλάσιο της κανονικής λειτουργίας (η τελευταία ανάγνωση στον πίνακα ελέγχου ήταν 33.000 MW) και εκτιμάται πως η υπερβολική πίεση από τη συσσώρευση οδήγησε στην έκρηξη του λέβητα. Λίγα δευτερόλεπτα μετά την πρώτη ακολούθησε και μια δεύτερη έκρηξη, η οποία διέλυσε τον ήδη κατεστραμμένο πυρήνα κι ανέκοψε την αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης. Η δεύτερη έκρηξη ευθύνεται ως επί το πλείστον για την καταστροφή του δοχείου εγκλωβισμού και την απελευθέρωση υπέρθερμου γραφίτη, ο οποίος με την έκθεσή του στον ατμοσφαιρικό αέρα αναφλέχθηκε, συμβάλλοντας έτσι στην εξάπλωση

της ραδιενέργειας. Η δύναμη της δεύτερης έκρηξης και η αναλογία ραδιοϊσότοπων που απελευθέρωσε υποδεικνύουν πως μάλλον πρόκειται για πυρηνική έκρηξη που ήταν το αποτέλεσμα της τήξης της καρδιάς του πυρήνα απουσία επένδυσης, ψυκτικού και επιβραδυντή.

Αποτέλεσμα των παραπάνω ήταν μια πρωτοφανούς κλίμακας καταστροφή με τα επίπεδα ραδιενέργειας στις πλέον μολυσμένες περιοχές του εργοστασίου να υπολογίζεται πως έφθασαν τα 5,6 Roentgen ανά δευτερόλεπτο, ήτοι 20.000 Roentgen ανά ώρα, τη στιγμή που θανάσιμη για τον άνθρωπο είναι η έκθεση σε 500 Roentgen σε 5 ώρες. Για μια εβδομάδα μετά το ατύχημα πραγματοποιούνταν συνεχείς ρίψεις σάκων που περιείχαν άμμο, μόλυβδο και βορικό οξύ από ελικόπτερα πάνω από τον αντιδραστήρα. Συνολικά πάνω από 5.000 τόνοι άμμου κάλυψαν το κτίριο όπου έλαβε χώρα το ατύχημα, το οποίο πριν το Δεκέμβριο του 1986 σφραγίστηκε σε μια τεράστια τσιμεντένια «σαρκοφάγο» για να διασφαλιστεί η αποτροπή περαιτέρω διαρροών [36]. Τις μέρες μετά το συμβάν, η τοποθεσία γύρω από το χώρο του ατυχήματος αποκλείστηκε και βαθμονομήθηκε σε ζώνες ανάλογα με το βαθμό επικινδυνότητας και τα επίπεδα ραδιενέργειας. Το Σεπτέμβριο του 2007 η ουκρανική κυβέρνηση ανακοίνωσε την κατασκευή ενός ασφάλινου κελύφους προς αντικατάσταση της υπάρχουσας τσιμεντένιας σαρκοφάγου, η οποία έχει υποστεί σημαντικές φθορές. Μετά το πέρας της κατασκευής θα ξεκινήσει και η σταδιακή αποδόμηση του πυρήνα.

Ο απολογισμός του ατυχήματος αναφέρει 31 θανάτους μέσα στους τρεις πρώτους μήνες και 237 περιπτώσεις οξείας μόλυνσης από ραδιενέργεια [39]. Εκτός, από τις γειτονικές περιοχές το συμβάν επηρέασε σημαντικά τις περισσότερες χώρες της Ευρώπης κι ο αντίκτυπος του δεν έχει ακόμη παρέλθει. Υπολογίζεται ότι από τη συνολική δόση ραδιενέργειας στην οποία εκτέθηκε ο παγκόσμιος πληθυσμός, λόγω του ατυχήματος, το 36% αντιστοιχεί στους κατοίκους Ρωσίας, Ουκρανίας και Λευκορωσίας και το 53% στους υπόλοιπους Ευρωπαίους. Όσο αφορά την Ελλάδα, το ραδιενεργό νέφος της έκρηξης έπληξε κυρίως το βόρειο μέρος της χώρας και τη Θεσσαλία, όπου ακόμη και χρόνια αργότερα εξακολουθούν να ανιχνεύονται ποσά ραδιενέργειας άνω του κανονικού ορίου.

- **Fukushima:** Το ατύχημα στη Fukushima είναι το δεύτερο που βαθμονομήθηκε στην κλίμακα 7 της παγκόσμιας κατάταξης πυρηνικών συμβάντων. Στις εγκαταστάσεις της Fukushima στεγάζονταν 6 αντιδραστήρες σε 3 κτίρια. Επρόκειτο για αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος – BWR δεύτερης γενιάς. Στις 11 Μαρτίου 2011, σημειώθηκε ισχυρή σεισμική δόνηση (9 βαθμοί της κλίμακας Ρίχτερ) στην υποθαλάσσια περιοχή ανατολικά του Σεντάι. Αμέσως μετά το σεισμό, η ηλεκτροδότηση στο συγκρότημα της Fukushima διεκόπη. Οι αντιδραστήρες 1-3 που λειτουργούσαν απενεργοποιήθηκαν άμεσα με τη βύθιση όλων των ράβδων ελέγχου στον πυρήνα (SCRAM), όπως ορίζουν οι κυβερνητικοί κανονισμοί, και τέθηκαν σε ισχύ οι εφεδρικές γεννήτριες του συστήματος ψύξης της εγκατάστασης. Οι υπόλοιποι αντιδραστήρες του σταθμού βρίσκονταν εκτός λειτουργίας.

Σχεδόν μία ώρα μετά το σεισμό, ο πυρηνικός σταθμός επλήγη από τσουνάμι ύψους 13 μέτρων με αποτέλεσμα το κτίριο όπου στεγάζονταν οι εφεδρικές γεννήτριες του συστήματος ψύξης να πλημμυρίσει και οι γεννήτριες εκτάκτου ανάγκης να καταστραφούν. Ενεργοποιήθηκαν, τότε, οι εφεδρικές μπαταρίες του σταθμού για μεταφορά ρεύματος και εξασφάλισης της ψύξης του πυρήνα. Παρά τις οργανωμένες προσπάθειες των τεχνικών του σταθμού οι βλάβες στο σύστημα των γεννητριών δεν αποκαταστάθηκαν έγκαιρα κι έτσι λίγες ώρες μετά, κι ενώ οι μπαταρίες του συστήματος είχαν πλήρως αποφορτιστεί, οι αντλίες νερού σταμάτησαν να λειτουργούν και η ψύξη στην καρδιά ανεκόπη. Έτσι, ο πυρήνας του αντιδραστήρα άρχισε να υπερθερμαίνεται. Λίγη ώρα αργότερα, σημειώθηκε έκρηξη στη μονάδα και σύντομα

ακολούθησα οι μονάδες 3, 4 και 2. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις, οι εκρήξεις οφείλονταν στο αέριο υδρογόνο που παράχθηκε από την αντίδραση των θηκών Zr με το νερό.

Για την αντιμετώπιση της κρίσης, αποφασίστηκε η άμεση παροχή θαλασσινού και βωριωμένου νερού στους αντιδραστήρες λόγω των προβλημάτων στην άντληση καθαρού νερού. Τελικά, κρίθηκε αναγκαία η ελεγχόμενη απελευθέρωση ραδιενεργού ατμού και υδρογόνου στο εσωτερικό του εξωτερικού κτιρίου και, μετά την έκρηξη, στο περιβάλλον προκειμένου να αποφευχθεί μια ενδεχόμενη κλιμάκωση της κατάστασης.

Όσο αφορά τον απολογισμό του ατυχήματος, δεν καταγράφηκε κανένας άμεσος θάνατος από έκθεση σε ακτινοβολία, ωστόσο σημαντικές ποσότητες ραδιενεργών υλικών διέφυγαν προγραμματισμένα ή ακούσια στο εναέριο και υποθαλάσσιο περιβάλλον. Σύμφωνα με τους εμπειρογνώμονες, η μόλυνση από το ατύχημα στη Fukushima αντιστοιχεί στο 1/10 της αντίστοιχης του Chernobyl και περίπου το ίδιο ισχύει και για την έκταση των περιοχών που μολύνθηκαν άμεσα. Το σοβαρότερο πρόβλημα έγκειται στη μόλυνση της θαλάσσιας περιοχής με ραδιενεργά κατάλοιπα, η οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει καταγραφεί ποτέ [40].

Επιπλέον, επίσημα δεν έχει ακόμη διαπιστωθεί με ασφάλεια η διακοπή της διαρροής ραδιενεργών υλικών στη θάλασσα καθώς όπως ανέφερε σε ανακοίνωση της η εταιρεία TEPCO τον Οκτώβριο του 2012, αν και τα επίπεδα ακτινοβολίας έχουν σταθεροποιηθεί, μεγάλο μέρος των οι εγκαταστάσεων παραμένει υπόγεια πλημμυρισμένο με νερό ψύξης. Για την ακρίβεια, ο φόβος αυτός επιβεβαιώθηκε μόλις τον Ιούλιο του 2013 με την διαπίστωση πως περίπου 300 τόνοι υψηλά ραδιενεργού νερού είχαν απελευθερωθεί στον ωκεανό. Η διαρροή αυτή βαθμονομήθηκε στο επίπεδο 3 της παγκόσμιας κλίμακας για τα πυρηνικά συμβάντα. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, κι έπειτα από εντολή της Ιαπωνικής κυβέρνησης στις 26 Αυγούστου 2013, ξεκίνησε η λήψη πρόσθετων μέτρων για την οριστική αντιμετώπιση της διαρροής ραδιενεργών υλικών.

3.6 Διαχείριση Ραδιενεργών Καταλοίπων

Ως ραδιενεργά κατάλοιπα θεωρούνται τα υλικά που έχουν προκύψει από την χρήση ραδιενεργών υλικών και περιέχουν αξιόλογη ποσότητα ραδιενεργών ισότοπων. Από την εξόρυξη του φυσικού ουρανίου και την κατασκευή του καυσίμου έως τη λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων και τη μετέπειτα διαχείριση κι ανακύκλωση του εξαντλημένου πυρηνικού καυσίμου, ο κύκλος λειτουργίας των πυρηνικών σταθμών παραγωγής είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τη διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων. Ραδιενεργά κατάλοιπα προκύπτουν, επίσης, κατά την κατασκευή και την αποικοδόμηση των πυρηνικών εργοστασίων. Έτσι, η διαχείριση των επικίνδυνων αυτών υλικών αποτελεί μια σημαντική παράμετρο της ίδιας της λειτουργίας των πυρηνικών τεχνολογιών. Μάλιστα, το ζήτημα αυτό δεν επηρεάζει μόνο τις βιομηχανικές εφαρμογές αξιοποίησης της πυρηνικής ενέργειας, όπως η χρήση της στην ηλεκτροπαραγωγή, αλλά και κάθε άλλου είδους δραστηριότητα, όπως οι ιατρικές εφαρμογές.

Τα πυρηνικά απόβλητα, ανάλογα με τον αναμενόμενο χρόνο επιβίωσης, την ποσότητα και το είδος των ραδιενεργών ισότοπων που περιέχουν κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

- **Χαμηλού Επιπέδου Κατάλοιπα:** Πρόκειται για τα απόβλητα εκείνα που περιέχουν πολύ μικρή ποσότητα ή βραχύβια ραδιενεργά ισότοπα. Ως επί το πλείστον, είναι χαρτιά, εργαλεία, μπουκάλια, ρουχισμός, φίλτρα κι άλλα αναλώσιμα που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές της πυρηνικής τεχνολογίας στην ιατρική, σε ερευνητικά εργαστήρια και τη βιομηχανία. Συνήθως, η διαχείριση τους δεν είναι επικίνδυνη, αλλά πρέπει να γίνεται με προσοχή και να πληροί συγκεκριμένες

προδιαγραφές. Αναλυτικότερα, προβλέπεται η κατά το δυνατόν μείωση του όγκου τους με τη συμπίεση των στερεών και την αποξήρανση των υγρών σε κατάλληλες εγκαταστάσεις. Κατόπιν φυλάσσονται σε ειδικά δοχεία και είτε θάβονται σε μικρό βάθος σε εγκεκριμένες τοποθεσίες είτε οδηγούνται σε κατάλληλα διαμορφωμένους χώρους συγκέντρωσης όπου παραμένουν μέχρι να μειωθούν τα ποσοστά της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εντός των επιτρεπτών ορίων, οπότε και ακολουθούν τις συνήθεις διαδικασίες διαχείρισης κοινών απορριμμάτων. Υπολογίζεται πως σε αυτή την κατηγορία ανήκει ποσοστό μεγαλύτερο από το 90% του συνολικού όγκου των ραδιενεργών αποβλήτων, αν και η ολική περιεκτικότητα τους σε ραδιενέργεια δεν ξεπερνά το 1%.

- **Ενδιάμεσου Επιπέδου Κατάλοιπα:** Περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες ραδιενέργειας και συνήθως χρειάζονται θωράκιση. Συνήθως, χρησιμοποιείται θωράκιση σκυροδέματος ή αν πρόκειται για υγρά εμποτίζονται σε σκυρόδεμα πριν από τη φύλαξη ή την εναπόθεση τους σε κατάλληλους χώρους. Σύμφωνα με τις διεθνείς εκτιμήσεις, αποτελούν το 7% του συνολικού όγκου και το 4% της περιεκτικότητας επί του συνόλου των ραδιενεργών καταλοίπων.
- **Υψηλού Επιπέδου Κατάλοιπα:** Θεωρούνται τα μεγάλης ραδιενέργειας προϊόντα της σχάσης και κάποια βαρέα μακρόβια ραδιενεργά ισότοπα παραγόμενα στους αντιδραστήρες. Πρόκειται για τα πιο επικίνδυνα από τα ραδιενεργά απόβλητα. Η διαχείριση τους είναι πιο πολύπλοκη και προϋποθέτει ειδική θωράκιση κατά τη μεταφορά και το χειρισμό τους. Επίσης, είναι απαραίτητη η ψύξη τους εξαιτίας των μεγάλων ποσών θερμότητας που εκλύονται από τη διάσπαση των ραδιονουκλιδίων. Η διαχείριση τους περιλαμβάνει τρία στάδια:

Βραχυπρόθεσμη Διαχείριση: Αφορά το πρώτο στάδιο διαχείρισης των ραδιενεργών καταλοίπων που προκύπτουν κατά τη λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων. Όπως ήδη είδαμε, πολλά από τα προϊόντα της σχάσης είναι ραδιενεργά και μάλιστα καθώς ο χρόνος λειτουργίας του πυρηνικού αντιδραστήρα αυξάνεται, η περιεκτικότητα του καυσίμου σε ραδιενεργά κατάλοιπα μεγαλώνει. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, οι απορροφητές νετρονίων στο πυρηνικό καύσιμο έχουν αυξηθεί τόσο πολύ σε σχέση με το σχάσιμο υλικό ώστε να μην μπορεί να διατηρηθεί πια η κρισιμότητα της διάταξης. Τότε μιλάμε για εξάντληση του πυρηνικού καυσίμου, το οποίο είναι πλέον ακατάλληλο για χρήση.

Η ανάγκη ψύξης είναι επιτακτική γιατί υπάρχει η πιθανότητα τήξης του περιβλήματος των ράβδων καυσίμου και διαρροής των ραδιενεργών προϊόντων εξαιτίας της θερμότητας που εκλύεται από τις σχάσεις (επισημαίνουμε πως, όπως ήδη εξηγήσαμε, οι σχάσεις εξακολουθούν να λαμβάνουν χώρα ακόμη και μετά την απομάκρυνση των συστάδων από την καρδιά του αντιδραστήρα). Ενδεικτικά, αναφέρουμε μια εξαντλημένη συστάδα καυσίμου ενός LWR, ηλεκτρικής ισχύος 1000MW, αμέσως μετά την εξαγωγή της αποδίδει θερμότητα μερικών kW. Μέσα σε ένα έτος η θερμότητα αυτή μειώνεται σε ~5 kW, ενώ μετά από 5 χρόνια έχει περιοριστεί κάτω από το 1 kW.

Μεσοπρόθεσμη Διαχείριση: Αφού τα επίπεδα ραδιενέργειας των εξαντλημένων καυσίμων μειωθούν σε ασφαλή επίπεδα, υπάρχουν δύο πολιτικές μεσοπρόθεσμης διαχείρισης που μπορούν να εφαρμοστούν:

- **Ανακύκλωση:** Μέσω της διαδικασίας της ανακύκλωσης, επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός του ουρανίου και πλουτωνίου από τα «λοιπά ραδιενεργά υλικά», τα οποία περιέχουν τα προϊόντα της σχάσης και τα υπερουράνια στοιχεία. Έτσι, καθίσταται δυνατή η αξιοποίηση του εναπομείναντος σχάσιμου υλικού με συνέπεια σημαντική

εξοικονόμηση καυσίμου, δεδομένου των περιορισμένων διαθέσιμων κοιτασμάτων, και μείωση του όγκου των καταλοίπων. Η πολιτική αυτή ακολουθείται από την πλειονότητα των ευρωπαϊκών χωρών και από την Ιαπωνία.

Στην περίπτωση αυτή, οι συστάδες εξαντλημένου καυσίμου μετά την παραμονή τους στη δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης, μεταφέρονται με κατάλληλα θωρακισμένα δοχεία σε εργοστάσια ανακύκλωσης. Τα κατάλοιπα που προκύπτουν μετά τη διαδικασία ανακύκλωσης είναι επίσης υψηλού κινδύνου και ακτινοβολούν έντονα ραδιενέργεια. Συνήθως αποθηκεύονται προσωρινά σε υγρή μορφή σε κατάλληλες δεξαμενές πολλαπλών τοιχωμάτων από ανοξείδωτο χάλυβα, περιβαλλόμενες από προεντεταμένο σκυρόδεμα, όπου ψύχονται συνέχεια.

- Αντιμετώπιση του συνόλου της χρησιμοποιημένης συστάδας καυσίμου ως καταλοίπου: Σε κάποιες χώρες, όπως η Σουηδία, οι ΗΠΑ και πρόσφατα ο Καναδάς, η διαδικασία ανακύκλωσης θεωρείται ασύμφορη και η συστάδα εξαντλημένου καυσίμου αντιμετωπίζεται ως κατάλοιπο στο σύνολό της. Προφανώς, η πρακτική αυτή αυξάνει σημαντικά τον όγκο των ραδιενεργών καταλοίπων. Οι συστάδες καυσίμου, στην περίπτωση αυτή, παραμένουν είτε στις δεξαμενές καυσίμου του πυρηνικού σταθμού είτε σε ξηρά αποθήκευση.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση της Σουηδίας, η οποία διαθέτει κεντρική εγκατάσταση αποθήκευσης καταλοίπων ήδη από το 1988. Έτσι, οι συστάδες καυσίμου παραμένουν στη δεξαμενή εξαντλημένου καυσίμου του πυρηνικού σταθμού για περίπου ένα έτος και στη συνέχεια μεταφέρονται στην κεντρική εγκατάσταση. Εκεί αποθηκεύονται σε δεξαμενή νερού, στην οποία παραμένουν για 40 έτη.

Μακροπρόθεσμη Διαχείριση: Πρόκειται για το τελευταίο στάδιο διαχείρισης των ραδιενεργών καταλοίπων που έχει ως στόχο την ασφαλή εναπόθεση των μακρόβιων ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης και των υπερουρανίων σε κατάλληλες εγκαταστάσεις ώστε να μην υπάρξουν διαρροές προς τη βιόσφαιρα, την τροφική αλυσίδα και τον άνθρωπο.

3.7 Τεχνοοικονομικά Στοιχεία Πυρηνικών Σταθμών

Ο σχεδιασμός, η χωροθέτηση και η κατασκευή ενός πυρηνικού σταθμού είναι μία πολύπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία, που απαιτεί την εκπόνηση εκτενών τεχνοοικονομικών ερευνών, την εξασφάλιση των απαραίτητων πόρων, την εναρμόνιση με τα αυστηρά νομικά και θεσμικά πλαίσια σε εθνικό και διεθνές επίπεδο και την εύρεση του κατάλληλου χώρου για τη στέγαση της εγκατάστασης. Η κατασκευή ενός πυρηνικού σταθμού διαφέρει σημαντικά από την περίπτωση συμβατικών μονάδων και συνδέεται με μακροπρόθεσμες δεσμεύσεις (100 – 150 χρόνων). Χρονικά, ο προγραμματισμός ενός πυρηνικού σταθμού χωρίζεται σε τρία στάδια:

1. Κατασκευή Πυρηνικού Σταθμού
2. Λειτουργία
3. Παροπλισμός (Decomissioning)

3.7.1 Χωροθέτηση Πυρηνικού Σταθμού

Πρώτο βήμα για την κατασκευή ενός πυρηνικού εργοστασίου είναι φυσικά η εύρεση του κατάλληλου χώρου για την εγκατάσταση του. Η καταλληλότητα της υποψήφιας περιοχής κρίνεται από πολλούς επιμέρους παράγοντες, όπως:

- a. Το είδος, τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά και την προβλεπόμενη λειτουργία του σταθμού.
- b. Την πυκνότητα του πληθυσμού και τον τρόπο αξιοποίησης της γης στην ευρύτερη περιοχή. Συγκεκριμένα, κατά το σχεδιασμό ενός πυρηνικού εργοστασίου αξιολογούνται επίσης:
 - **Ζώνη Αποκλεισμού:** Πρόκειται για την περιοχή γύρω από τις εγκαταστάσεις του σταθμού. Σύμφωνα με την άδεια του εργοστασίου, προβλέπεται πως η υψηλή κυριότητα αυτής της ζώνης ελέγχεται από το σταθμό, η διεύθυνση του οποίου καθορίζει όλες τις δραστηριότητες που μπορούν να πραγματοποιούνται εντός αυτής.
 - **Ζώνη Χαμηλού Πληθυσμού:** Είναι η περιοχή που περιβάλλει τη ζώνη αποκλεισμού. Σύμφωνα με τους κανονισμούς, ο συνολικός αριθμός και η πυκνότητα των κατοίκων σε αυτή υπόκεινται σε συγκεκριμένους περιορισμούς ώστε σε περίπτωση σοβαρού ατυχήματος να μπορούν να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα για την προστασία τους.
 - **Απόσταση από το κέντρο πληθυσμού:** Ορίζεται ως η απόσταση του εργοστασίου από το πλησιέστερο σύνορο με μια πυκνοκατοικημένη περιοχή.

Ενδεικτικά, αναφέρουμε πως μαζί με τη ζώνη αποκλεισμού, ένα πυρηνικό εργοστάσιο 1000MW χρειάζεται έκταση 1000 έως 4000 στρεμμάτων.

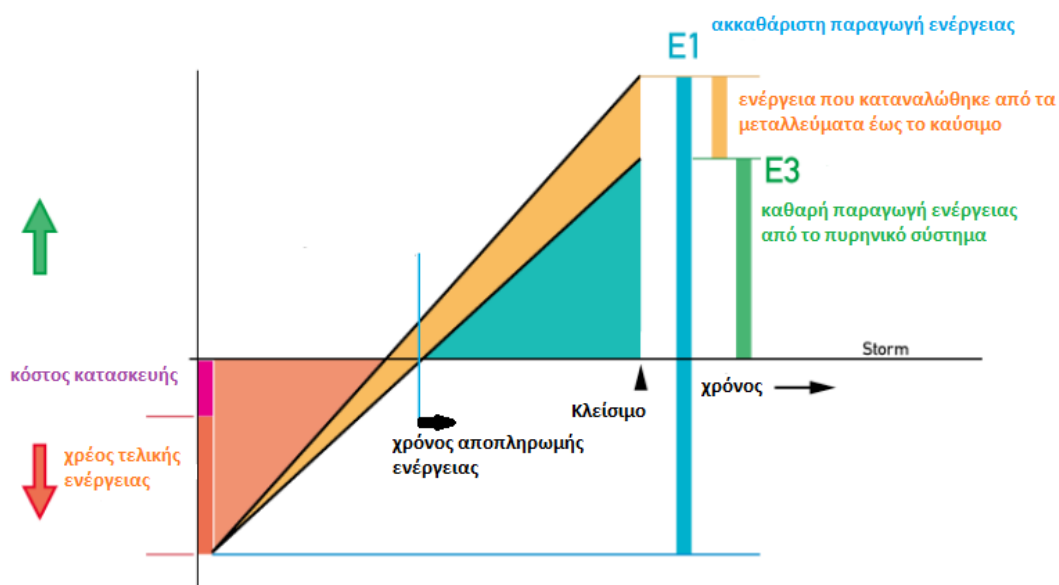
- c. Τα γεωλογικά και κλιματικά στοιχεία της περιοχής, όπως οι δονήσεις εδάφους, η τεκτονική παραμόρφωση της επιφάνειας, τα ποσοστά υποτροπής σε σεισμούς, η γεωμετρία, τα ποσοστά ολίσθησης και τα υλικά θεμελίων της περιοχής, σεισμικά κύματα και πλημμύρες υδάτων. Τέλος, υπ' όψη λαμβάνονται και η σταθερότητα εδάφους, η φυσική και τεχνητή σταθερότητα και η δυνατότητα παροχής νερού για ψύξη.

Για το να αποτιμηθούν όλες οι παραπάνω παράμετροι απαιτούνται μια σειρά από μελέτες και τεχνικές εκθέσεις για την υποψήφια περιοχή εγκατάστασης. Συγκεκριμένα, πρέπει να καταγραφεί η σεισμική δραστηριότητα της περιοχής και να αξιολογηθεί η συμπεριφορά των γεωλογικών υλικών σε περίπτωση σεισμικής δραστηριότητας. Επιπλέον, πρέπει να προσδιοριστούν η λιθολογία, η στρωματογραφία, η υδρολογία στρωμάτων κι οι διαρθρωτικές εδαφολογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής, δίνοντας προσοχή στη γεωλογική της ιστορία. Η πιθανότητα πλημμύρας, τσουνάμι ή άλλων ακραίων συνθηκών συνυπολογίζονται. Τέλος, μια από τις σημαντικότερες έρευνες που πρέπει να υλοποιηθούν αφορά τη δυνατότητα παροχής νερού για ψύξη. Τόσο η διασφάλιση επαρκούς ύδρευσης για ψύξη σε περίπτωση εκτάκτου ανάγκης όσο και δυνατότητα μακροπρόθεσμης θερμικής απομάκρυνσης, αποτελούν στοιχεία καθοριστικής σημασίας για την τελική επιλογή.

3.7.2 Κατασκευή Πυρηνικού Σταθμού

Ο μέσος χρόνος κατασκευής ενός πυρηνικού εργοστασίου κυμαίνεται από 10 έως 15 χρόνια, ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε αυτόν. Το μεγάλο αυτό διάστημα αυτό οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, οι οποίοι σχετίζονται με θεσμικά, κοινωνικά κι οικονομικά ζητήματα. Αρχικά, ένα σημαντικό ζήτημα είναι η αδειοδότηση του σταθμού, η οποία είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, τυπικά περιλαμβάνει μακροχρόνιες

δικαστικές διαμάχες και μπορεί να χρειαστεί έως και 10 χρόνια. Για την αδειοδότηση ενός πυρηνικού σταθμού στις ΗΠΑ, λ.χ. απαιτούνται δύο στάδια. Αρχικά, ο υποψήφιος παραγωγός υποβάλλει μια αίτηση στις αρμόδιες αρχές για την οικοδόμηση του εργοστασίου. Η αίτηση εξετάζεται και πολύ συχνά περνάει κι από κανόνες δικαστηρίου. Ακολουθεί μι μακροχρόνια περίοδος δημόσιου σχολιασμού και αξιολόγησης μέχρι τη χορήγηση της άδειας και την έναρξη των εργασιών κατασκευής. Μετά το πέρας της κατασκευής, ο παραγωγός καλείται να υποβάλλει εκ νέου αίτηση για να του παραχωρηθεί το δικαίωμα εκμετάλλευσης και χρήσης της εγκατάστασης. Η αίτηση αυτή αξιολογείται και πάλι, εκκινώντας ξανά όλη την προαναφερθείσα διαδικασία.



Εικόνα 35: Χρονοδιάγραμμα Πυρηνικού Σταθμού [27]

Τυπικά, κάθε πυρηνικός σταθμός περιλαμβάνει τις εξής εγκαταστάσεις:

- ✓ **Πύργος Ψύξης:** Είναι το μεγαλύτερο οίκημα του πυρηνικού σταθμού. Σε αυτούς ψύχεται το νερό από το κύκλωμα ψύξης. Οι μεγάλες ποσότητες ατμού που εξέρχονται από αυτούς, λοιπόν, δε σχετίζονται με το σύστημα ατμοπαραγωγής, δεν αποτελούν ρύπους και φυσικά δεν είναι ραδιενεργοί (εικόνα 36).
- ✓ **Κτίριο Συγκράτησης:** Πρόκειται για το κτίριο που στεγάζει τον αντιδραστήρα και το σύστημα ψύξης, το οποίο περιέχει άκρωσ ραδιενεργά υλικά. Συνήθως διακρίνεται από το χαρακτηριστικό ημισφαιρικό θόλο, που είναι σχεδιασμένο να διατηρεί σταθερή την πίεση στο εσωτερικό του. Είναι κατασκευασμένο από χάλυβα και συχνά περιβάλλεται από μια επιπλέον δομή σκυροδέματος. Το κτίριο συγκράτησης είναι το 3^ο φράγμα της άμυνας σε βάθος.
- ✓ **Βοηθητικό Κτίριο ή Κτίριο Αντιδραστήρα:** Στεγάζει ένα μεγάλο μέρος του εξοπλισμού υποστήριξης και ίσως περιέχει επίσης ραδιενεργά υγρά κι αέρια. Δε συστεγάζεται με το κτίριο συγκράτησης και περιλαμβάνει τον εξοπλισμό εκτάκτου ανάγκης.



Εικόνα 36: Πυρηνικός σταθμός ενέργειας στο Κατενόμ της Γαλλίας. Μη ραδιενεργός ατμός εξέρχεται από τους ψυκτικούς πύργους. [41]

- ✓ **Κτίριο Στροβίλου:** Εδώ βρίσκονται ο στρόβιλος, η γεννήτρια, ο συμπυκνωτής και το σύστημα τροφοδοσίας ύδατος.
- ✓ **Κτίριο Εισροής:** Στεγάζεται ο εξοπλισμός που απαιτείται (αντλίες, φίλτρα κτλ) για την άντληση, καθαρισμό και κυκλοφορία του νερού που αντλείται από την παρακείμενη λίμνη, ποτάμι ή θάλασσα και ψύχει τον συμπυκνωτή.
- ✓ **Κτίριο Καυσίμου:** Εδώ φυλάσσονται οι ράβδοι εξαντλημένου καυσίμου σε κατάλληλα διαμορφωμένες δεξαμενές νερού, και σε κάποιες περιπτώσεις και η νέα πρώτη ύλη πριν τη μετάβαση της στο κτίριο συγκράτησης για τον ανεφοδιασμό του αντιδραστήρα.
- ✓ **Κτίριο Γεννήτριας Diesel:** Το κτίριο αυτό χρησιμοποιείται για να στεγάσει τις γεννήτριες εκτάκτου ανάγκης και τον απαιτούμενο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό που υποστηρίζει τα επιμέρους συστήματα της εγκατάστασης (αέρας, νερό, ανεμιστήρες, ψυγείο, μαζούτ, λιπαντικά έλαια, κλιματισμό, εξαερισμό κτλ.)
- ✓ **Λοιπά Κτίρια:** Εκτός από τα παραπάνω βασικά κτίσματα, σε ένα πυρηνικό σταθμό υπάρχουν κι άλλα βοηθητικά κτίρια όπως το κτίριο διοίκησης, το κτίριο ελέγχου, η ασφάλεια, τα συστήματα επεξεργασίας και καθαρισμού του νερού, ο μηχανολογικός εξοπλισμός για την άντληση του νερού στον πύργο ψύξης κ.ο.κ.



Εικόνα 37: Απλοποιημένη ενδεικτική διάταξη πυρηνικού σταθμού [42]

3.7.3 Οικονομική Αξιολόγηση Πυρηνικού Σταθμού

Η πυρηνική ενέργεια αποτελεί εν γένει μια οικονομικά ανταγωνιστική μέθοδος ηλεκτροπαραγωγής σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα παρά τα σημαντικά αρχικά κεφάλαια που απαιτεί. Αν και το κόστος παραγωγής ποικίλει ανάλογα με την τοποθεσία της εγκατάστασης, παρουσιάζεται μια ποιοτική ανάλυση των οικονομικών στοιχείων κατασκευής και λειτουργίας ενός πυρηνικού σταθμού. Το κόστος ενός πυρηνικού σταθμού διαμορφώνεται από πολλές συνιστώσες. Συγκεκριμένα συνυπολογίζονται:

- Το **κόστος κεφαλαίου**, το οποίο περιλαμβάνει τα έξοδα για την περιοχή τις εγκατάστασης, τις υποδομές ψύξης, τη διαχείριση του έργου, την άδεια

λειτουργίας, την κατασκευή των πυρηνικών εγκαταστάσεων, των βοηθητικών και διοικητικών χώρων.

- Το **κόστος χρηματοδότησης**, το οποίο μαζί με το κόστος κεφαλαίου συνιστούν το κόστος του έργου. Το κόστος χρηματοδότησης εξαρτάται από την αναλογία μεταξύ των ιδίων κεφαλαίων που θα χρησιμοποιηθούν και το ποσό του δανεισμού, το επιτόκιο του χρέους κτλ.
- Τα **λειτουργικά κόστη** που αφορούν τις δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης, το κόστος καυσίμου και την απόδοση των μετοχικών κεφαλαίων.
- Το **εξωτερικό κόστος** σχετίζεται με την υγεία και το περιβάλλον κι, αν και δε λαμβάνεται υπόψη στο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να προσδιοριστεί ποσοτικά. Συγκεκριμένα, οι εξωτερικές δαπάνες ενός πυρηνικού σταθμού που αφορούν την εκπομπή αερίων, τη διασπορά και την τελική επίδραση στο περιβάλλον ανέρχεται κατά μέσο όρο σε 0,4 €/kWh, το οποίο είναι σχεδόν ταυτόσημο με εκείνο των υδροηλεκτρικών εργοστασίων και αρκετά χαμηλότερο από τα ορυκτά καύσιμα [27].
- Τέλος το **μέσο κόστος**. Πρόκειται για το μέσο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο διαμορφώνεται από τα κεφάλαια, τη χρηματοδότηση, τις δαπάνες για τον χώρο, τα καύσιμα και τα λειτουργικά έξοδα, τον παροπλισμό του σταθμού και τη διάθεση των αποβλήτων.

Γενικά, οι δαπάνες κατασκευής ενός πυρηνικού σταθμού είναι αυτές που ρυθμίζουν στην ουσία το κόστος της πυρηνικής ηλεκτροπαραγωγής, καθώς η ανάγκη για εξειδικευμένα υλικά, περίπλοκα συστήματα ασφαλείας και εξοπλισμό ελέγχου αυξάνει τα αρχικά κεφάλαια που απαιτούνται σε επίπεδα πολύ υψηλότερα από εκείνα των συμβατικών μονάδων. Αντίθετα, το κόστος λειτουργίας, συντήρησης και καυσίμου των πυρηνικών σταθμών είναι δευτερευούσης σημασίας και σαφώς χαμηλότερο από εκείνο των ορυκτών καυσίμων. Άλλωστε, τα πυρηνικά εργοστάσια χρειάζονται ελάχιστη ποσότητα καυσίμου για να λειτουργήσουν, το κόστος του οποίου τα τελευταία χρόνια έχει σταθεροποιηθεί σε χαμηλά επίπεδα. Όσο αφορά το χρόνο απόσβεσης της αρχικής επένδυσης ενός πυρηνικού σταθμού υπολογίζεται πως απαιτούνται 5-11 χρόνια πλήρους λειτουργίας, ήτοι 6-14 ημερολογιακά έτη, χρόνος πολύ μικρότερος από την τυπική διάρκεια ζωής του εργοστασίου.

Ενδεικτικά αναφέρουμε πως για έναν πυρηνικό σταθμό ισχύος 1000MW, λαμβάνοντας υπόψη τις τρέχουσες τυπικές τιμές στην αγορά ενέργειας, τα ετήσια έσοδα ανέρχονται σε € 75 δις, με τα συνολικά κόστη να μην ξεπερνούν τα € 8,5 δις [27, 43].

3.7.4 Παροπλισμός Πυρηνικού Σταθμού

Μετά την παύση λειτουργίας ενός πυρηνικού σταθμού, απαιτείται να γίνουν μια σειρά από ενέργειες εκκαθάρισης και στεγανοποίησης της εγκατάστασης προκειμένου να αποφευχθεί η διαρροή επικίνδυνων υλικών στο περιβάλλον. Η διαδικασία παροπλισμού αρχίζει αμέσως μετά την οριστική διακοπή λειτουργίας του σταθμού και συνεχίζει ιδανικά μέχρι την πλήρη αποκατάσταση κι εκκαθάριση της περιοχής της εγκατάστασης. Συγκεκριμένα, οι ενέργειες που υλοποιούνται περιλαμβάνουν:

- Την ασφαλή διαχείριση των ραδιενεργών υλικών της εγκατάστασης
- Τον καθαρισμό κι απολύμανση των αντιδραστήρων
- Την αποσυναρμολόγηση και κατεδάφιση του σταθμού
- Την αποκατάσταση του χώρου.

Οι παραπάνω δράσεις υλοποιούνται σταδιακά. Αρχικά, πραγματοποιείται ο καθαρισμός του αντιδραστήρα και η απομάκρυνση των ραδιενεργών καταλοίπων, ήτοι του χρησιμοποιημένου πυρηνικού καυσίμου (σε αυτό συγκεντρώνεται κατά 99% η ραδιενέργεια της εγκατάστασης). Μετά τη συγκέντρωσή τους, τα ραδιενεργά υλικά

οδηγούνται σε κατάλληλους χώρους για την ασφαλή μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη διαχείριση τους, σύμφωνα με όσα περιγράφονται στην παράγραφο 3.6. Οι ίδιες διαδικασίες ακολουθούνται και για τα ραδιενεργά απόβλητα που έχουν συσσωρευτεί στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας καυσίμου. Οι πισίνες αποθήκευσης αναλωμένου καυσίμου εκκενώνονται και ο αντιδραστήρας κι οι συναφείς εγκαταστάσεις προετοιμάζονται για τη διαδικασία διάλυσης ή παραμένουν για μια περίοδο σε φάση συντήρησης και περίθαλψης.

Για τον καθαρισμό και την απορρύπανση του σταθμού χρησιμοποιούνται συμβατικά ή περισσότερο ενισχυμένα αντιδραστήρια με μηχανικές διαδικασίες. Ορισμένα στοιχεία του εξοπλισμού ενέχουν δυνητικούς κινδύνους και γι αυτό απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στο χειρισμό τους προκειμένου να αποφευχθεί η διάδοση επικίνδυνων ουσιών. Στόχος της όλης διαδικασίας είναι η απεγκατάσταση να πραγματοποιηθεί με το μικρότερο δυνατό κόστος, μειώνοντας στο ελάχιστο τον όγκο των αποβλήτων και περιορίζοντας την έκθεση των εργαζομένων στην ακτινοβολία. Ακολουθεί η απολύμανση όλου του σταθμού, η οποία προβλέπει την άρση της μόλυνσης από τις επιφάνειες του εξοπλισμού και των εγκαταστάσεων.

Μετά την απολύμανση, το σύνολο των μηχανημάτων εντός της εγκατάστασης μπορεί να απομακρυνθεί από αυτήν. Ο εξοπλισμός της μη ραδιενεργού πλευράς του σταθμού (όπως γραφεία, στρόβιλοι, αίθουσες τουρμπίνας κτλ) αφαιρούνται, αποσυναρμολογούνται και μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν με ασφάλεια. Στη συνέχεια, τα κτίρια μπορούν να κατεδαφιστούν και η περιοχή να απελευθερωθεί για περαιτέρω χρήση μετά το σφράγισμα του αντιδραστήρα. Αφού η εκτεταμένη απολύμανση ολοκληρωθεί και τα πυρηνικά συστήματα διαλυθούν κι απομακρυνθούν, το εργοστάσιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μη πυρηνικούς σκοπούς.

Πρακτικά, η κατεδάφιση ή επαναχρησιμοποίηση των εγκαταστάσεων, μετά τον καθαρισμό, την απορρύπανση κι αποψίλωση της περιοχής εξαρτάται από τη στρατηγική παροπλισμού και τον προγραμματισμό που θα τεθεί. Από τη στιγμή που διαπιστωθεί πως η περιοχή είναι ασφαλής και τα επίπεδα ακτινοβολίας είναι εντός των επιτρεπτών εθνικών ορίων, η άδεια λειτουργίας λήγει και η αξιοποίηση του χώρου μπορεί να τεθεί εκ νέου επί τάπητος. Διακρίνουμε, δύο κύριες επιλογές παροπλισμού:

- ❖ «Πρώιμη απελευθέρωση περιοχής»: Προβλέπεται η πρόωρη διάλυση και αναβολή της μιας ή και περισσότερων φάσεων.
- ❖ «Ενταφιασμός»: Η τακτική αυτή έχει καθιερωθεί στις ΗΠΑ και αναφέρεται στο περίβλημα της πυρηνικής μονάδας, με μακρά διάρκεια ζωής, όπως είναι το σκυρόδεμα. Η εγκατάσταση συντηρείται και τελεί υπό παρακολούθηση έως ότου η ραδιενέργεια μειωθεί εντός των επιτρεπτών εθνικών ορίων, οπότε και λήγει η άδεια χρήσης της περιοχής.

3.8 Πλεονεκτήματα Χρήσης της Πυρηνικής Ενέργειας

Η αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας, ειδικά σε εφαρμογές όπως η ηλεκτροπαραγωγή αποτέλεσε από την πρώτη στιγμή αντικείμενο διαμάχης και αντιπαράθεσης, εμπλέκοντας πολλές παραμέτρους, τόσο ιδεολογικές όσο και πρακτικές. Η συζήτηση γύρω από τις πυρηνικές τεχνολογίες κορυφώθηκε κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970 και 1980 με τις δύο πλευρές να υποστηρίζουν σθεναρά τα επιχειρήματά τους [44].

Στη μία όψη του νομίσματος, από τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας μπορούν να προκύψουν σημαντικά οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη.

- Η πυρηνική ενέργεια έχει σχεδόν μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου

Τα πυρηνικά εργοστάσια έχουν σχεδόν μηδενικές εκπομπές αερίων ρύπων σε αντίθεση με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής και συνεπώς δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον και το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ο λευκός καπνός που απελευθερώνεται από τους πύργους

ψύξης των πυρηνικών εργοστασίων δεν είναι παρά ατμός και δεν περιέχει ρυπογόνες ουσίες. Αντίθετα, η καύση ορυκτών καυσίμων εκτός από τις τεράστιες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου (όπως το διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου και του θείου, μεθάνιο κτλ) που παράγει, απελευθερώνει επίσης μικρές ποσότητες ραδιενεργών στοιχείων και συγκεκριμένα ουρανίου και φθορίου.

- Η πυρηνική ενέργεια μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην αιεφόρο ανάπτυξη

Η κάλυψη των διαρκώς διογκούμενων ενεργειακών αναγκών αποτελεί μείζον ζήτημα στις μέρες μας. Η αξιοποίηση των ορυκτών καυσίμων για το σκοπό αυτό συνοδεύεται από την έντονη ανησυχία για την επάρκεια των διαθέσιμων κοιτασμάτων και την περιβαλλοντική επιβάρυνση που μπορεί να προκαλέσει. Από την άλλη πλευρά, οι ΑΠΕ δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη του φορτίου βάσης καθώς έχουν χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα και χαμηλή αξιοπιστία. Ο διάσπαρτος και διακοπτόμενος χαρακτήρας τους, η εν δυνάμει απότομη απώλεια ισχύος και η ποιότητα της ενέργειας που παράγουν (αρμονικές, αδυναμία ρύθμισης αέργου ισχύος κτλ) θέτουν σημαντικά προβλήματα στην διεύρυνση της χρήσης τους στην ηλεκτροπαραγωγή.

Στον αντίποδα, η πυρηνική ενέργεια χαρακτηρίζεται από μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα και αποτελεί μία από τις πιο αξιόπιστες διαθέσιμες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας στις μέρες μας. Κατά μέσο όρο έχει συντελεστή χρησιμοποίησης μεγαλύτερο από 90%, επιτυγχάνοντας μέγιστη απόδοση, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες και την ώρα της ημέρας. Καθίσταται, λοιπόν, ιδανική τεχνολογία για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης ενέργειας βασικού φορτίου.

- Η πυρηνική ενέργεια είναι οικονομικά ανταγωνιστική

Το κόστος παραγωγής των πυρηνικών εργοστασίων είναι σημαντικά χαμηλότερο από εκείνο των περισσότερων συμβατικών σταθμών. Είναι γεγονός πως η εγκατάσταση ενός νέου πυρηνικού σταθμού απαιτεί τεράστιες επενδύσεις και αρχικά κεφάλαια, ωστόσο τα λειτουργικά του κόστη είναι πολύ χαμηλότερα. Στην πραγματικότητα, το κόστος της κλινοβατώρας από πυρηνική ηλεκτροπαραγωγή εξαρτάται ελάχιστα από την τιμή του καυσίμου. Αντίθετα, στους συμβατικούς σταθμούς το κόστος παραγωγής διαμορφώνεται κυρίως από το κόστος καυσίμου, το οποίο αυξάνεται διαρκώς. Ειδικά, τα τελευταία χρόνια οι τιμές του πετρελαίου και του φυσικού αερίου ακολουθούν σταθερά αυξητικές τάσεις. Επιπλέον, το κόστος παραγωγής από ορυκτά καύσιμα επιβαρύνεται από το μηχανισμό εμπορίας εκπομπών CO₂ και τις δεσμεύσεις των δυτικών χωρών, σύμφωνα με το πρωτόκολλο του Κιότο. Στον αντίποδα η πυρηνική ηλεκτροπαραγωγή δε συνοδεύεται από περιβαλλοντολογικές επιβαρύνσεις ενώ το κόστος του κύκλου του πυρηνικού καυσίμου έχει ήδη ενσωματωθεί στην τιμή της κλινοβατώρας.

- Η εισαγωγή της πυρηνικής ενέργειας στον ενεργειακό προγραμματισμό συμβάλλει σημαντικά στην οικονομική ανάπτυξη

Η δημιουργία ενός πυρηνικού σταθμού δημιουργεί σημαντικές προϋποθέσεις οικονομικής ανάπτυξης σε εθνικό και τοπικό επίπεδο. Αρχικά, οι πυρηνικοί σταθμοί παράγουν σημαντικές ποσότητες ενέργειας (η τυπική εγκατεστημένη ισχύς των σύγχρονων πυρηνικών σταθμών κυμαίνεται στα 1000 – 1600 MW) με χαμηλό κόστος, προσφέροντας τη δυνατότητα κάλυψης των εγχώριων ενεργειακών εξοικονομώντας χρήματα και διευρύνοντας τις ευκαιρίες εξαγωγών. Επιπλέον, η κατασκευή ενός πυρηνικού σταθμού δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της υλοποίησης του έργου υπολογίζεται πως απασχολούνται κατά μέσο όρο 1600-1900 άτομα, ενώ μετά το

πέρας της κατασκευής απαιτείται μόνιμο προσωπικό 400-700 ατόμων. Στα παραπάνω οφέλη πρέπει να συνυπολογίσουμε την ανάπτυξη που θα συντελεστεί κατά την περίοδο περάτωσης του έργου, καθώς το εργατικό δυναμικό που θα εγκατασταθεί στην περιοχή θα δημιουργήσει σημαντικές χρηματικές εισροές για τις τοπικές επιχειρήσεις. Σύμφωνα με έρευνες, για κάθε ευρώ που δαπανάται για ένα τυπικό πυρηνικό εργοστάσιο, η τοπική κοινωνία κερδίζει 1,07 €. Επιπλέον, ο τυπικός μισθός των εργαζόμενων ενός πυρηνικού σταθμού υπερβαίνει εν γένει τις αντίστοιχες αμοιβές σε εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής άλλων τεχνολογιών και είναι κατά 35% περίπου υψηλότερος από το μέσο όρο των αμοιβών στην τοπική κοινωνία. Συνολικά, ένα μέσο πυρηνικό εργοστάσιο δημιουργεί εισροές € 40 εκατ. στο σύνολο του εισοδήματος και περίπου € 430 στην αγορά αγαθών και υπηρεσιών της τοπικής κοινωνίας.

Και σε εθνικό επίπεδο, όμως, η υψηλή φορολόγηση που προβλέπεται για τις πυρηνικές εγκαταστάσεις αυξάνει σημαντικά τα κρατικά έσοδα, εξασφαλίζοντας πολύτιμα κεφάλαια που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για κοινωφελή έργα (όπως σχολεία, νοσοκομεία κτλ). Κατά μέσο όρο, υπολογίζεται πως ένας πυρηνικός σταθμός αποδίδει στο κράτος φόρο ύψους € 20 εκατ. Ετησίως [27].

- Η πυρηνική ενέργεια μπορεί να προσφέρει ενεργειακή ανεξαρτησία

Η θεμελίωση της βάσης της σύγχρονης ηλεκτροπαραγωγής με συμβατικές μεθόδους καύσης οδηγεί το δυτικό κόσμο σε μια αναπόφευκτη «ομηρία» από τις χώρες που διαθέτουν σημαντικά κοιτάσματα ορυκτών καυσίμων. Η κατάσταση αυτή καθίσταται ιδιαίτερα ανησυχητική αν λάβει κανείς υπόψη του την πολιτική αστάθεια που επικρατεί στις περιοχές αυτές (κυρίως χώρες της Μέσης Ανατολής), η οποία κατά καιρούς απειλεί να τινάξει στον αέρα τον παγκόσμιο ενεργειακό σχεδιασμό. Από την άλλη πλευρά, η εγκατάσταση της πυρηνικής ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να εξασφαλίσει την ενεργειακή αυτονομία κι ανεξαρτησία του δυτικού κόσμου. Με ελάχιστες απαιτήσεις σε πρώτες ύλες και τεράστια ενεργειακή πυκνότητα καυσίμου, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές απαιτήσεις των σύγχρονων κοινωνιών, αίροντας τον κίνδυνο ενεργειακής υποτέλειας σε άλλες χώρες και τις ανάγκες για εκτεταμένες εισαγωγές καυσίμων.

- Η πυρηνική ενέργεια στατιστικά θεωρείται μία από τις ασφαλέστερες μεθόδους ηλεκτροπαραγωγής

Παρά την κοινωνικά επικρατούσα άποψη πως η πυρηνική ενέργεια είναι επικίνδυνη, τα ατυχήματα στα πυρηνικά εργοστάσια είναι σπάνια και στην πλειοψηφία τους έχουν μηδαμινές απώλειες. Για την ακρίβεια, το μεγαλύτερο πυρηνικό συμβάν ήταν αυτό που συνέβη στο Chernobyl το 1986 και κόστιζε τη ζωή εκατοντάδων ανθρώπων, επηρεάζοντας την υγεία πολλών περισσότερων. Ωστόσο, ο αντιδραστήρας αυτός ήταν πεπαλαιωμένος, πολλοί κανόνες ασφαλείας δεν τηρήθηκαν και διαπιστώθηκαν πολλές παραλείψεις στην κατασκευή, τη συντήρηση και τον τρόπο λειτουργίας του. Ακόμη και στο πρόσφατο ατύχημα στη Fukushima, επρόκειτο για έναν αντιδραστήρα 2^{ης} γενιάς. Άλλωστε, το συμβάν καταγράφηκε κάτω από τις ακραίες συνθήκες μιας ιδιαίτερα ισχυρής φυσικής καταστροφής. Οι σύγχρονοι αντιδραστήρες, εξάλλου, κατασκευάζονται σύμφωνα με πολλά αυστηρά πρότυπα αντοχής κι αξιοπιστίας, υπακούουν σε διεθνή πρότυπα ασφάλειας και διαθέτουν τεχνολογικά εξελιγμένα συστήματα ασφαλείας που περιορίζουν την πιθανότητα πρόκλησης κι εξέλιξης ενός ατυχήματος και τις πιθανές επιπτώσεις στον άνθρωπο και το περιβάλλον σε περίπτωση εκτάκτου ανάγκης.

- Η ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας προάγει την τεχνολογική ανάπτυξη

Η διεύρυνση της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην τεχνολογική, πνευματική και πολιτιστική ανάπτυξη σε τοπικό και εθνικό επίπεδο. Η εγκατάσταση ενός πυρηνικού σταθμού και η δημιουργία νέων θέσεων εργασίας αποτελεί σαφώς ένα ισχυρό κίνητρο για την ενασχόληση νέων ανθρώπων με την έρευνα που συντελείται στον τομέα της πυρηνικής τεχνολογίας και την πρόσληψη πανεπιστημιακής μόρφωσης. Επιπλέον, δημιουργούνται οι προϋποθέσεις για την δημιουργία ερευνητικών υποδομών και θέσεων εργασίας με στόχο την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην πυρηνική βιομηχανία.

3.9 Τα αρνητικά σημεία της πυρηνικής ανάπτυξης

Στον αντίποδα των παραπάνω θετικών στοιχείων, στην διάδοση της πυρηνικής ενέργειας ως μέσο ηλεκτροπαραγωγής ελλοχεύουν και αρκετοί κίνδυνοι.

- Οι συνέπειες ενός πυρηνικού ατυχήματος είναι δύσκολα διαχειρίσιμες

Παρά την τεχνολογική πρόοδο που έχει συντελεστεί και τη σημαντική μείωση της πιθανότητας ενός ευρείας έκτασης πυρηνικού ατυχήματος, είναι γεγονός πως η πυρηνική ενέργεια ενέχει ένα εναπομείναν ρίσκο (residual risk), το οποίο δεν μπορεί να παραβλεφθεί. Έτσι, σε περίπτωση ενός εκτεταμένου πυρηνικού συμβάντος, όπως μιας πυρηνικής έκρηξης, οι επιπτώσεις στην ανθρωπότητα και το περιβάλλον θα είναι σημαντικές. Τα τεράστια ποσά ενέργειας που σχετίζονται με ένα τέτοιο ενδεχόμενο, ο ραγδαίος τρόπος με τον οποίο διαχέεται η ραδιενέργεια, η αδυναμία λήψης αποτελεσματικών μέτρων για την καταστολή των αποτελεσμάτων ενός πυρηνικού συμβάντος και το βάθος χρόνου στο οποίο αυτά συνεχίζουν να εξελίσσονται εγείρουν σοβαρές ανησυχίες για τους κινδύνους και τα αποτελέσματα ενός πυρηνικού ατυχήματος.

- Διασπορά Πυρηνικών Όπλων

Η διεθνής απειλή της τρομοκρατίας και το ενδεχόμενο διάδοσης των πυρηνικών όπλων αποτελεί ακόμη ένα σημαντικό κίνδυνο που εγκυμονεί η χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Η ευρεία εισαγωγή, χρήση κι εμπλουτισμός του φυσικού ουρανίου σε παγκόσμια κλίμακα, η συνεχής τεχνολογική ανάπτυξη των πυρηνικών τεχνολογιών και η εξάπλωση των πυρηνικών εγκαταστάσεων αυξάνουν σημαντικά την πιθανότητα χρήσης της πυρηνικής ενέργειας για μη ειρηνικούς σκοπούς. Ακόμη και τα πυρηνικά απόβλητα (εξαντλημένο καύσιμο) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία πυρηνικών όπλων – αν και όχι αρκετά ισχυρά για να προκαλέσουν μια πυρηνική έκρηξη. Παρ' όλα αυτά, ο κίνδυνος αυτός είναι υπαρκτός και συχνά έρχεται στο προσκήνιο η ανάγκη λήψης μέτρων για τη φύλαξη του εξαντλημένου καυσίμου και των λοιπών ραδιενεργών υλικών ώστε να μην πέσουν σε λάθος χέρια. Ενδεικτικά, αναφέρουμε πως το Σεπτέμβριο του 1999, 5 εργαζόμενοι σε πυρηνικό σταθμό της Ρωσίας κατηγορήθηκαν πως αποπειράθηκαν να προωθήσουν πυρηνικά κατάλοιπα στην αγορά για την ανάπτυξη οπλικών συστημάτων. Εκτός από τις παραπάνω επιφυλάξεις, ιστορικά τα ίδια τα πυρηνικά εργοστάσια έχουν αποτελέσει στόχους στρατιωτικών συγκρούσεων (π.χ. το Σεπτέμβριο του 1980, το Ιράν βομβάρδισε πυρηνικές εγκαταστάσεις στο Ιράκ, ενώ τον επόμενο χρόνο Ισραηλινές δυνάμεις κατέστρεψαν ολοκληρωτικά ιρακινές εγκαταστάσεις όπου γίνονταν έρευνες για τα πυρηνικά. Τα επόμενα χρόνια παρόμοιες επιθέσεις πραγματοποιήθηκαν από το Ιράν, τις ΗΠΑ και το Ισραήλ ενάντια σε Ιράκ, Συρία και Ιράν). Κανείς, λοιπόν, δεν μπορεί να εγγυηθεί πως στο μέλλον οι πυρηνικοί σταθμοί δε

θα αποτελέσουν και πάλι στόχο τρομοκρατικών ενεργειών ή στρατιωτικών επιχειρήσεων με πιθανές ολέθριες συνέπειες.

- Η διαχείριση των πυρηνικών καταλοίπων

Ένα ακόμη θέμα που εγείρει ανησυχία είναι η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων. Όπως, ήδη αναλύθηκε στην παράγραφο 3.6, η ασφαλής διαχείριση του εξαντλημένου πυρηνικού καυσίμου αποτελεί ένα πολύπλοκο ζήτημα, που περιλαμβάνει πολλά στάδια και τεράστιες χρονικές κλίμακες. Δεδομένου, ότι για την ασφαλή διαχείριση των καταλοίπων απαιτούνται αρκετά χιλιάδες χρόνια και εμπλέκονται πολλές επερχόμενες γενιές, τίθενται πολλά αμφιλεγόμενα ζητήματα σχετικά με την μακροπρόθεσμη ευστάθεια των γεωλογικών σχηματισμών, την ανθεκτικότητα των δοχείων εγκλωβισμού στη διάβρωση, την ευστάθεια και αδιαλυτότητα των ραδιενεργών καταλοίπων.

- Ο παροπλισμός των πυρηνικών σταθμών

Ο παροπλισμός των πυρηνικών σταθμών αποτελεί μια πολύπλοκη και μακροχρόνια διαδικασία, η οποία απαιτεί σημαντικά κεφάλαια και μπορεί να αυξήσει σημαντικά το τελικό κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού. Επιπλέον, ο χώρος της εγκατάστασης και η ζώνη αποκλεισμού γύρω από αυτόν παραμένουν υπό συνεχή επίβλεψη για πολλά χρόνια μετά το οριστικό κλείσιμο του, δεσμεύοντας μεγάλες εκτάσεις γης και αποκλείοντας κάθε δυνατότητα αξιοποίησης του για άλλες χρήσεις. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε επιπλέον απώλειες εσόδων τόσο σε ιδιωτικό όσο και εθνικό επίπεδο.

- Αρνητική αποδοχή και προκατάληψη της κοινής γνώμης

Η πυρηνική ενέργεια αντιμετωπίζεται με μεγάλη δυσπιστία- αν όχι πλήρη αποδοκιμασία- από την πλειοψηφία της κοινής γνώμης ως επικίνδυνη, ρυπογόνος και εξεζητημένη. Η δυσπιστία αυτή, η οποία στις χώρες της Ευρώπης οφείλεται κατά κύριο λόγο στο ατύχημα του Chernobyl, αποτελεί σημαντικό ανασταλτικό παράγοντα στις προσπάθειες προγραμματισμού, αδειοδότησης, χρηματοδότησης, κατασκευής και λειτουργίας των πυρηνικών σταθμών. Πολλοί, άλλωστε, θεωρούν πως οι ενεργειακές απαιτήσεις μπορούν να καλυφθούν επαρκώς με τη χρήση εναλλακτικών πηγών, όπως οι ανανεώσιμες, κι επομένως δεν υπάρχει ανάγκη υιοθέτησης της πυρηνικής ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΕΠΙΛΟΓΩΝ

4.1 Πολυκριτηριακές μέθοδοι ανάλυσης αποφάσεων

Οι πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης αποφάσεων (Multi Criteria Decision Making) είναι μία εφαρμογή της Επιχειρησιακής έρευνας που μπορεί να αποτελέσει σημαντικό υποστηρικτικό εργαλείο στη διαμόρφωση ενεργειακής πολιτικής, προσφέροντας τη δυνατότητα αξιολόγησης πολλών διαφορετικών παραμέτρων (οικονομικών, κοινωνικών, περιβαλλοντικών κτλ) των υπό εξέταση εναλλακτικών. Η ειδοποιός διαφορά της πολυκριτηριακής ανάλυσης από τις υπόλοιπες εναλλακτικές είναι πως η προσέγγιση του προβλήματος γίνεται υπό το πρίσμα της λήψης ορθολογικών αποφάσεων με βάση ένα σύστημα αξιών και προτιμήσεων που ορίζονται από τον αποφασίζοντα, συνειδητά ή ασυνειδητά. Έτσι, στη διαδικασία εντοπισμού και αξιολόγησης των διαθέσιμων εναλλακτικών ενσωματώνονται οι προτιμήσεις εκείνου που αποφασίζει και λαμβάνονται υπόψη ιδιαιτερότητες τους.

Η μεθοδολογία της πολυκριτηριακής ανάλυσης λήψης αποφάσεων περιλαμβάνει εν γένει τα εξής στάδια:

1. Διαμόρφωση του προβλήματος:
 - Καθορισμός των μεταβλητών απόφασης (decision variables)
 - Προσδιορισμός του στόχου του προβλήματος (objective)
 - Προσδιορισμός πιθανών λύσεων(feasible solutions)
2. Κατασκευή του κατάλληλου μοντέλου που αποτυπώνει το πρόβλημα:
 - Μαθηματική αναπαράσταση προβλήματος
 - Μεταβλητές απόφασης, στόχοι και περιορισμοί
3. Επίλυση μοντέλου
 - Μαθηματική μέθοδος
 - Προσδιορισμός των τιμών των μεταβλητών απόφασης
4. Αξιολόγηση Λύσεων
 - Ανάλυση Ευαισθησίας
 - Μελέτη Ευστάθειας
5. Υλοποίηση Λύσης

Κατά την εφαρμογή των πολυκριτηριακών μεθόδων διαμορφώνονται σχέσεις προτίμησης μεταξύ των εναλλακτικών, οι οποίες στηρίζονται στην αξιολόγηση τους με βάση τα κριτήρια που έχουν ορισθεί. Για το σκοπό αυτό ορίζονται αποδόσεις και βάρη που αποτυπώνουν τη σημαντικότητα των κριτηρίων και το βαθμό στον οποίο οι εναλλακτικές τα ικανοποιούν. Τα στοιχεία αυτά οργανώνονται σε έναν πίνακα αποδοτικότητας, ο οποίος συνήθως αποτελεί και το τελικό αποτέλεσμα της μεθοδολογίας.

Γίνεται εύκολο αντιληπτό πως τα αποτέλεσμα της πολυκριτηριακής ανάλυσης ενέχουν σημαντικό βαθμό υποκειμενικότητας που σχετίζεται με τις προσωπικές αξίες και την κρίση του αποφασίζοντα. Εν γένει, πάντως, έχουν αναπτυχθεί και προταθεί πολλές διαφορετικές μεθοδολογίες και τεχνικές καθορισμού των βαρών κι αξιολόγησης της αποδοτικότητας ώστε να μειωθεί η επιρροή του αποφασίζοντα και να ενισχυθεί η αντικειμενικότητα της ανάλυσης.

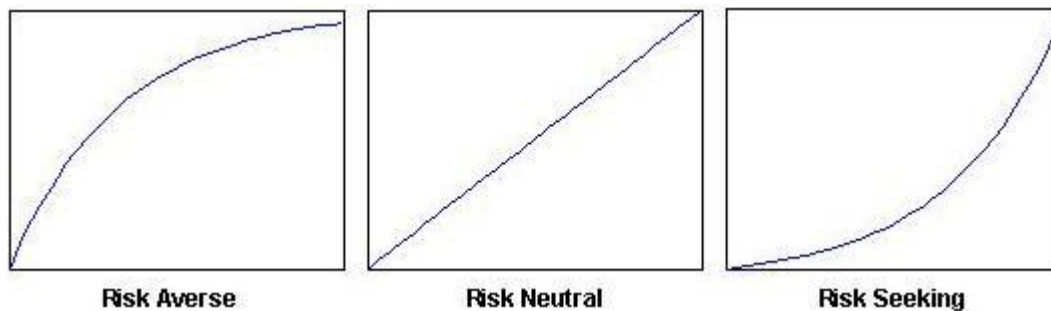
Οι πολυκριτηριακές μέθοδοι αποφάσεων που έχουν αναπτυχθεί είναι πολλές, όπως η μέθοδος MAUT (Multi- Attribute Utility Theory), η MAVT (Multi- Attribute Value Theory), η UTA (Utility Theory Additive), η STEM, η SMART, η SAW, η DEA (Data Envelopment Analysis), η NAIADE, η οικογένεια μεθόδων ELECTRE, η PROMETHEE, η μέθοδος TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), η CBR (Case – Based Reasoning), η αναλυτική ιεραρχική διαδικασία AHP (Analytical Hierarchy Process), η αναλυτική διαδικασία δικτύου ANP (Analytical Network Process) κτλ.

Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι πιο κοινές πολυκριτηριακές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται συχνά ως αρωγή για τη λήψη αποφάσεων στην ενεργειακή πολιτική.

4.2 Μέθοδος MAUT (Multi- Attribute Utility Theory)

Πρόκειται για μια από τις πιο ευρέως διαδεδομένες μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης. Στηρίζεται στη θεωρία της χρησιμότητας κι έχει ως στόχο την εντοπισμό της βέλτιστης λύσης μεταξύ εναλλακτικών σε καταστάσεις όπου τα αποτελέσματα της απόφασης χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα. Στη μέθοδο αυτό συντίθενται οι προτιμήσεις του αποφασίζοντα προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη χρησιμότητα.

Για το σκοπό αυτό ορίζεται η συνάρτηση χρησιμότητας $u(x)$, η οποία ποσοτικοποιεί τις προτιμήσεις του αποφασίζοντα μέσω ενός αριθμητικού δείκτη για το επίπεδο ικανοποίησης κάθε κριτηρίου. Οι συνήθεις μορφές για τις συναρτήσεις χρησιμότητας παρουσιάζονται στην εικόνα 38.



Εικόνα 38: Βασικές μορφές συναρτήσεων χρησιμότητας [45]

Για τον υπολογισμό της χρησιμότητας κάθε εναλλακτικής υπολογίζεται το γινόμενο της επίδοσής της σε κάθε κριτήριο επί τη βαρύτητα του κριτηρίου. Κατόπιν, τα γινόμενα αυτά αθροίζονται και προκύπτει η συνολική χρησιμότητα της εναλλακτικής j σύμφωνα με τη σχέση:

$$U_j = \sum_i w_i * u_i^{(j)}$$

Τελικά ως βέλτιστη επιλέγεται η εναλλακτική με τη μεγαλύτερη τιμή [59].

4.3 Αναλυτική ιεραρχική διαδικασία (Analytical Hierarchy Process)

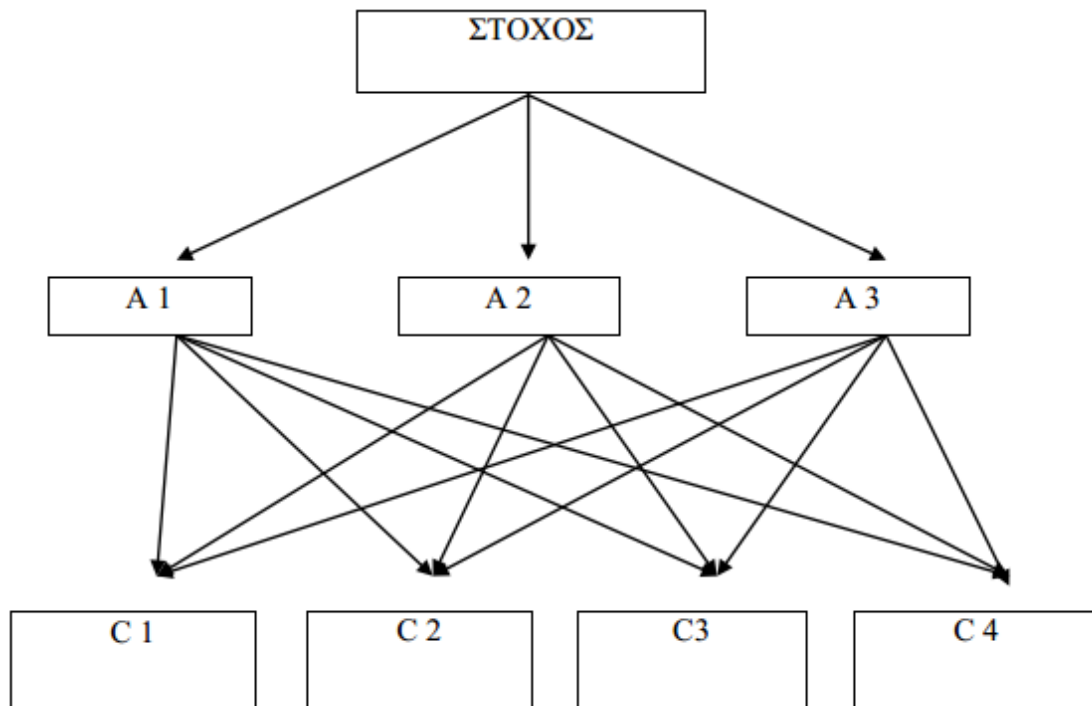
Η «ΑΗΡ» αναπτύχθηκε το 1970 από τον Saaty [46] και προβλέπει την αποδόμηση του υπό εξέταση προβλήματος σε μια ιεραρχία κριτηρίων κι εναλλακτικών. Στόχος της μεθόδου είναι η επιλογή της βέλτιστης εναλλακτικής κι η ιεραρχική κατάταξη των υπολοίπων, σύμφωνα με τα κριτήρια που έχουν τεθεί. Για το σκοπό αυτό το αρχικό πρόβλημα αναλύεται σε μικρότερα προβλήματα απόφασης, λιγότερο σύνθετα, τα οποία αντιμετωπίζονται διαδοχικά σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται ακολούθως.

Αρχικά, ορίζεται ο στόχος (αντικείμενο), ο οποίος τίθεται στην κορυφή της ιεραρχίας. Κατόπιν, ορίζονται τα κριτήρια στα οποία θα στηριχθεί η επιλογή καθώς και οι διαθέσιμες εναλλακτικές. Οι παραπάνω πληροφορίες συντίθεται προκειμένου να καθοριστούν οι «αποδόσεις» των εναλλακτικών. Η μέθοδος μπορεί να αποτιμήσει τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά κριτήρια, ορίζοντας τα κατάλληλα βάρη και προτεραιότητες.

Το στοιχείο κλειδί της μεθόδου είναι οι κατά ζεύγη συγκρίσεις που χρησιμοποιούνται για την έκφραση της σχετικής σημασίας μεταξύ των κριτηρίων. Για το σκοπό αυτό δημιουργείται μια μήτρα A , σε κάθε θέση a_{ij} της οποίας τοποθετείται το αποτέλεσμα της σύγκρισης του στοιχείου i με το στοιχείο j .

$$A = \begin{matrix} a_{11} & a_{12} & \cdot & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdot & a_{2n} \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdot & a_{nn} \end{matrix}$$

Κατόπιν, η μήτρα κανονικοποιείται και υπολογίζεται το ιδιοδιάνυσμα της, υψώνοντας τη σε δυνάμεις που διαδοχικά τετραγωνίζονται. Στη συνέχεια υπολογίζονται τα αθροίσματα κατά γραμμή του πίνακα που προκύπτει κι η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων δεν ξεπερνάει μια προκαθορισμένη τιμή. Το ιδιοδιάνυσμα που προκύπτει μετά το πέρας της διαδικασίας μας δίνει τη σχετική σημασία των κριτηρίων.



Εικόνα 3119: Ιεραρχικό μοντέλο τριών επιπέδων στη μέθοδο AHP [47]

Με όμοιο τρόπο, υπολογίζονται τα ιδιοδιανύσματα των εναλλακτικών για κάθε κριτήριο. Τα βάρη που προκύπτουν οργανώνονται σε ένα πίνακα, κάθε στοιχείο του οποίου δίνει την απόδοση της εναλλακτικής i με βάση το κριτήριο j . Ο πίνακας αυτός πολλαπλασιάζεται με το ιδιοδιάνυσμα των αποδόσεων των κριτηρίων που υπολογίστηκε στο πρώτο βήμα. Το τελικό ιδιοδιάνυσμα που προκύπτει μας δίνει τη συνολική απόδοση της εναλλακτικής i . Βέλτιστη είναι η επιλογή με τον υψηλότερο βαθμό.

4.4 Προτίμηση που ταξινομεί τη μέθοδο οργάνωσης για την αξιολόγηση εμπλουτισμού (PROMETHEE)

Η μέθοδος PROMETHEE στηρίζεται στη σχέση επικράτησης για να ιεραρχήσει τις εναλλακτικές λύσεις, συνδυάζοντας ευκολία χρήσης και μειωμένη πολυπλοκότητα. Κι εδώ πραγματοποιούνται συγκρίσεις ανά ζεύγη για τις διαθέσιμες εναλλακτικές προκειμένου αυτά να ταξινομηθούν όσον αφορά σε διάφορα κριτήρια.

Το πρώτο βήμα για την υλοποίηση της PROMETHEE είναι η ανάπτυξη της σχέσης υπεροχής με τον προσδιορισμό του δείκτη προτίμησης (preference index) $\pi(x_i, x_j)$ για κάθε ζεύγος εναλλακτικών x_i και x_j , σύμφωνα με τη σχέση:

$$\pi(x_i, x_j) = \sum_{k=1}^{16} w_k * p_k(x_i, x_j)$$

Ο δείκτης μερικής προτίμησης $p_k(x_i, x_j)$ για το κριτήριο x_k ορίζεται συναρτήσει της διαφοράς $x_{ik} - x_{jk}$ μεταξύ των επιδόσεων των δύο εναλλακτικών στο κριτήριο x_k . Συγκεκριμένα, εφαρμόζεται η σχέση:

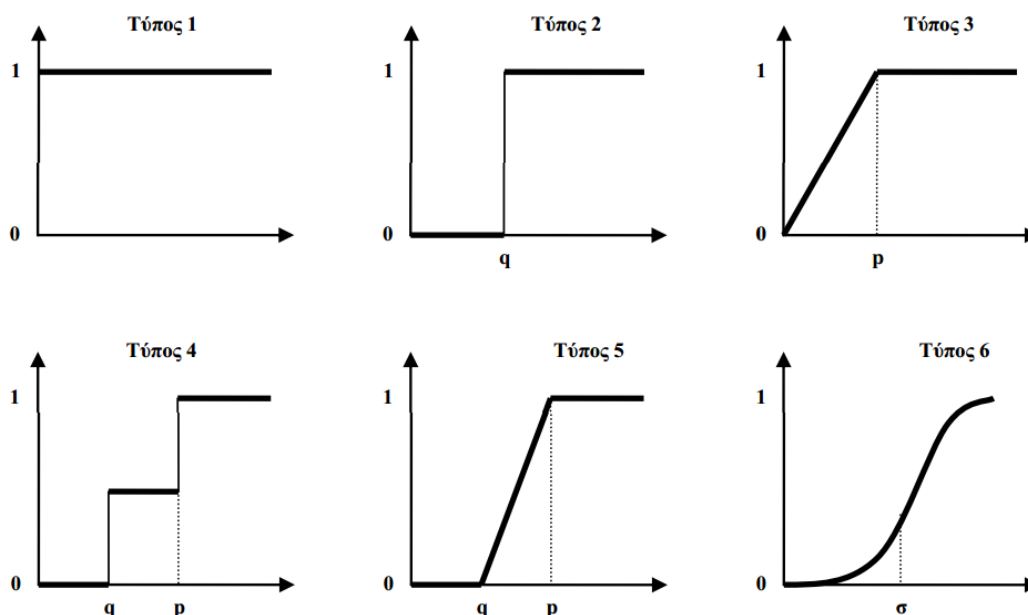
$$p_k(x_i, x_j) = \begin{cases} 0, & \text{αν } x_{ik} < x_{jk} \\ h_k * (x_{ik} - x_{jk}), & \text{αν } x_{ik} \geq x_{jk} \end{cases}$$

Ο ορισμός της συνάρτησης h_k καθορίζεται από τον τύπο του κριτηρίου που εξετάζεται.

Σύμφωνα με τον Branset μπορούν να χρησιμοποιηθούν έξι γενικευμένες συναρτήσεις κριτηρίων. Συγκεκριμένα, ορίζονται οι εξής τύποι κριτηρίων (εικόνα 40):

- **Τύπος 1:** Κανονικό κριτήριο (usual type)
- **Τύπος 2:** Κριτήριο με κατώφλι αδιαφορίας (U-type)
- **Τύπος 3:** Κριτήριο με κατώφλι προτίμησης (V-type)
- **Τύπος 4:** Βαθμωτό κριτήριο (level type)
- **Τύπος 5:** Γραμμικό κριτήριο (linear type)
- **Τύπος 6:** Κριτήριο Gauss (Gauss type)

Από μαθηματική σκοπιά οι τύποι 1,2 και 3 μπορούν να θεωρηθούν υποπεριπτώσεις του τύπου 5. Ωστόσο, στα προβλήματα λήψης αποφάσεων κρίνεται σκόπιμο να παρουσιάζονται διαφορετικά, καθώς ο καθένας από αυτούς αντιστοιχεί σε πολύ συγκεκριμένη συμπεριφορά κατά τη σύγκριση δύο εναλλακτικών στο ίδιο κριτήριο.



Εικόνα 40: Τύποι Κριτηρίων [48]

Κατόπιν, υπολογίζονται οι ροές εισόδου κι εξόδου σύμφωνα με τις σχέσεις:

1. Ροή Εισόδου (Entering flow):

$$\varphi^{-}(x_i) = \sum_{\forall x_j \in A} \pi(x_j, x_i)$$

2. Ροή Εξόδου (leaving flow):

$$\varphi^{+}(x_i) = \sum_{\forall x_j \in A} \pi(x_i, x_j)$$

Τελικά, ορίζουμε την καθαρή ροή (net flow):

$$\varphi(x_i) = \varphi^{+}(x_i) - \varphi^{-}(x_i)$$

Στην PROMETHEE I βέλτιστη θεωρείται εκείνη που αντιστοιχεί στο μέγιστο $\varphi(x_i)$. Επιπλέον, σύμφωνα με την μέθοδο, η ενέργεια x_i είναι **προτιμητέα** έναντι της ενέργειας x_j , εάν η εξερχόμενη ροή της x_j και η εισερχόμενη ροή της x_i είναι μικρότερη από την εισερχόμενη ροή της x_j . Δηλαδή, η x_i υπερβαίνει τη x_j εάν:

$$\varphi^{+}(x_i) \geq \varphi^{+}(x_j) \text{ και}$$

$$\varphi^{-}(x_i) \leq \varphi^{-}(x_j)$$

Σε περίπτωση ισοτιμίας της φ^{+} και φ^{-} οι δύο συγκρινόμενες επιλογές είναι **αδιάφορες** μεταξύ τους. Τέλος, εάν οι εξερχόμενες ροές δείχνουν ότι η x_i είναι καλύτερη της x_j , ενώ οι εισερχόμενες ροές δείχνουν το αντίθετο, οι δυο ενέργειες θεωρούνται **ασύγκριτες**. Δηλαδή, εάν:

$$\{[\varphi^{+}(x_i) > \varphi^{+}(x_j) \text{ και } \varphi^{-}(x_i) > \varphi^{-}(x_j)] \text{ ή } [\varphi^{+}(x_i) < \varphi^{+}(x_j) \text{ και } \varphi^{-}(x_i) < \varphi^{-}(x_j)]\} \rightarrow x_i, x_j \text{ ασύγκριτες}$$

Στην PROMETHEE II η τελική κατάταξη προκύπτει από τις καθαρές ροές των εναλλακτικών. Έτσι, η εναλλακτική x_i είναι προτιμητέα έναντι της x_j αν και μόνο αν η καθαρή ροή της είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της x_j . Σε περίπτωση που οι καθαρές ροές είναι ίσες μεταξύ τους, ο αποφασίζων είναι αδιάφορος ανάμεσα στις δύο εναλλακτικές. Σε αυτή την υλοποίηση της μεθόδου η κατάταξη για τις εναλλακτικές είναι πλήρης και δε λαμβάνεται υπόψη η σχέση ασυγκριτότητας [49].

4.5 Ο συσχετισμός μετάφρασης αποβολών και επιλογής (ELECTRE)

Πρόκειται στην ουσία για μια οικογένεια μεθόδων που στηρίζονται στη σύγκριση ζευγών εναλλακτικών σχεδίων ή λύσεων. Προτάθηκε στα τέλη της δεκαετίας του '60 από τον Bernard Roy με στόχο την περιγραφή περίπλοκων προβλημάτων, όπως μια διαδικασία απόφασης με πολλά αντιφατικά στοιχεία [50]. Κυρίαρχη θεωρείται η εναλλακτική που ανταποκρίνεται καλύτερα στα κριτήρια που έχουν τεθεί. Η πιο αδύναμη εναλλακτική απορρίπτεται μέχρι να προκύψει η τελική λύση. Το κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι πως επιτρέπει αποδόσεις που δεν είναι απόλυτα ίσες, να θεωρηθούν σχεδόν ίσες. Έτσι, το

κλειδί αυτής της μεθόδου είναι η προσέγγιση. Ο αποφασίζων θέτει τα εξής κατώφλια, με τα οποία θα συγκριθούν οι εναλλακτικές:

- Κατώφλι αδιαφορίας q_j
- Κατώφλι Προτίμησης p_j
- Κατώφλι Veto v_j

Διαμορφώνονται έτσι επίπεδα συμφωνίας και ασυμφωνίας, έτσι ώστε να διασφαλίζεται πως η δράση που θα επιλεγεί τελικά έχει καλύτερες αξιολογήσεις στα περισσότερα κριτήρια και ανεκτά λιγότερο καλές αξιολογήσεις στα υπόλοιπα [51].

4.5.1 Μέθοδος ELECTRE I

Στη μέθοδο αυτή επιλέγεται ένα σύνολο εναλλακτικών το οποίο αξιολογείται με τη χρήση πινάκων συμφωνίας. Συγκεκριμένα αποτιμάται η ισχύ των διαφωνιών υπό την παραδοχή ότι η ενέργεια a υπερέρχει της b . Διαμορφώνεται, επίσης, ένας πίνακας διαφωνίας για την ισχύ των αντικρουόμενων ορισμάτων στον παραπάνω ισχυρισμό [51] κι ορίζονται οι δείκτες:

- Συντελεστές Βαρύτητας (weights) των διάφορων κριτηρίων p_1, p_2, \dots, p_n , τα οποία ικανοποιούν τη συνθήκη:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

- Κατώφλι συμφωνίας (concordance threshold s): $0.5 < s < 1$.
- Κατώφλι Veto v_1, v_2, \dots, v_n τα οποία επιτρέπουν να δίνεται απευθείας κυριαρχία σε κάποια δράση, η οποία υπερτερεί ή υπολείπεται σημαντικά συγκριτικά με κάποια άλλη.

Κατόπιν, ελέγχεται αν ικανοποιούνται οι εξής συνθήκες για κάθε ζεύγος δράσεων (a, b) :

- Έλεγχος Συμφωνίας:

$$C(a, b) \geq s,$$

όπου

$C(a, b)$: το άθροισμα των βαρών των κριτηρίων για τα οποία η δράση a προτιμάται της b
 s : το κατώφλι αδιαφορίας

- Έλεγχος Διαφωνίας:

$$g_j(b) - g_j(a) \leq v_j \forall j \in \{j / g_j(a) < g_j(b)\}$$

4.5.2 Μέθοδος ELECTRE II

Η μέθοδος αυτή μοιάζει με την προηγούμενη, αλλά εδώ λαμβάνονται επιπλέον υπόψη δύο σχέσεις υπεροχής:

- **Ισχυρή Υπεροχή S^1** : ορίζεται με βάση υψηλά κατώφλια συμφωνίας s^1 και χαμηλά κατώφλια veto
- **Ασθενής Υπεροχή S^2** : ορίζεται με βάση χαμηλά κατώφλια συμφωνίας $s^2 < s^1$ και υψηλά κατώφλια veto.

Οι σχέσεις υπεροχής θα πρέπει να ικανοποιούν τους εξής κανόνες:

$$aS^i b \leftrightarrow C(a, b) = \sum_{i \in \{i / g_j(a) \geq g_j(b)\}} p_i \geq s^i \text{ και } C(a, b) \geq C(b, a) \&$$

$$g_j(b) - g_j(a) \leq v_j^i, i = 1, 2$$

Ασαφείς Σχέσεις Διαφωνίας

Ορίζει τη διαφωνία ενός κριτηρίου g_j στην πρόταση aSb :

$$D_j(a, b) = \begin{cases} 1 \text{ εάν } & g_j(b) > g_j(a) + v_j[g_j(a)] \\ 0 \text{ εάν } & g_j(b) \leq g_j(a) + p_j[g_j(a)] \\ & \frac{g_j(b) - g_j(a) - p_j[g_j(a)]}{v_j[g_j(a)] - p_j[g_j(a)]} \end{cases}$$

Ασαφείς Σχέσεις Υπεροχής

Ο στόχος της ασαφούς σχέσης υπεροχής είναι η σύνθεση των κριτηρίων στην πρόταση aSb , σύμφωνα με τη σχέση:

$$d(a, b) = \frac{C(a, b)}{1 - C(a, b)} \prod_j [1 - D_j(a, b)], j \in \left\{ \frac{1}{D_j(a, b)} > C(a, b) \right\} \quad [49]$$

4.5.3 Μέθοδος ELECTRE III

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, κάθε εναλλακτική a συγκρίνεται με μια δράση b από τον αποφασίζοντα με σκοπό είτε να γίνει δεκτή, είτε να απορριφθεί, ή γενικότερα να αποφασιστεί εάν η εναλλακτική a υπερτερεί της b : $a S b$.

Για το σκοπό αυτό, απαιτείται μια συνάρτηση που να αποτιμά τη σχέση $S(a, b)$ με τέτοιο τρόπο ώστε να λαμβάνονται υπόψη κάποιες ποιοτικές αρχές, και ιδιαίτερα να αποκλειστεί το ενδεχόμενο πως ένα μεγάλο μειονέκτημα για ένα κριτήριο θα ακυρωθεί από ένα σύνολο μικρών πλεονεκτημάτων στα υπόλοιπα. Η συνάρτηση αυτή στηρίζεται στους δείκτες συμφωνίας και την ασυμφωνίας οι οποίοι ορίζονται ως εξής:

Concordance Index:

$$c_j(a, b) = \begin{cases} 1 & g_j(b) - g_j(a) \leq q_j \\ 0 & g_j(b) - g_j(a) \geq p_j \\ \frac{p_j + g_j(a) - g_j(b)}{p_j - q_j} & q_j \leq g_j(b) - g_j(a) \leq p_j \end{cases}$$

Discordance Index:

$$d_j(a, b) = \begin{cases} 0 & g_j(b) - g_j(a) \leq p_j \\ 1 & g_j(b) - g_j(a) \geq v_j \\ \frac{g_j(b) - g_j(a) - p_j}{v_j - p_j} & q_j \leq g_j(b) - g_j(a) \leq v_j \end{cases}$$

Τελικά:

$$C(a, b) = \frac{1}{\sum_{j=1}^r k_j} * \sum_{j=1}^r k_j c_j(a, b)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτιμάται η σχέση:

$$S(a, b) = C(a, b) * \prod_{j \in J(a, b)} \frac{1 - d_j(a, b)}{1 - C(a, b)} \quad d_j(a, b) \leq C(a, b) \quad d_j(a, b) \geq C(a, b), J(a, b): d_j(a, b) > C(a, b)$$

Η αριθμητική αποτίμηση της $S(a, b)$ ορίζει μια ασαφή σχέση υπεροχής μεταξύ δύο εναλλακτικών. Η σχέση αυτή συνοψίζει τα αποτελέσματα των συγκρίσεων όλων των πιθανών ζευγαριών εναλλακτικών. Εν γένει, $S(a, b)$ κοντά στο 0 ή στο 1 αποτυπώνει μια ξεκάθαρη σχέση μεταξύ των εναλλακτικών, ενώ τιμές κοντά στο $1/2$ υποδεικνύουν μια σχέση υπεροχής που μπορεί εύκολα να ανατραπεί.

Έχοντας ολοκληρώσει την κατασκευή του μοντέλου υπεροχής, είναι δυνατή η κατάταξη των εναλλακτικών από τον πίνακα αξιοπιστίας. Η γενική προσέγγιση αξιοπιστίας της μεθόδου περιλαμβάνει την κατασκευή 2 κατατάξεων Z_1 και Z_2 , χρησιμοποιώντας μια φθίνουσα και μια αύξουσα διαδικασία φιλτραρίσματος αντίστοιχα. Στη συνέχεια, οι δύο αυτές κατατάξεις συνδυάζονται ώστε να παραχθεί μια μερική κατάταξη $Z = Z_1 \cap Z_2$. Η φθίνουσα διαδικασία φιλτραρίσματος περιγράφεται ακολούθως.

Έστω πως $\lambda = \max_{(a, b) \in A} S(a, b) = 1$. Ορίζεται η «τιμή αξιοπιστίας» έτσι ώστε μόνο τιμές του $S(a, b)$ που είναι αρκετά κοντά στο λ λαμβάνονται υπόψη, δηλαδή $\lambda - s(\lambda)$. Για παράδειγμα όταν $\lambda = 1$ και $s(\lambda) = 0,03$.

Ορίζουμε τον πίνακα T ως εξής:

$$T(\alpha, \beta) = \begin{cases} 1, & \text{if } S(a, b) > \lambda - s(\lambda) \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Η πρώτη κατάταξη Z_1 υλοποιείται ως εξής: Για κάθε x_i ορίζεται το σύνολο O_i των εναλλακτικών έναντι των οποίων υπερέχει η x_i , $O_i = \{x_j \in A : x_i S x_j\}$. Αντίστοιχα προσδιορίζεται το σύνολο O'_i των εναλλακτικών οι οποίες υπερέχουν της x_i , $O'_i = \{x_j \in A : x_j S x_i\}$. Για κάθε εναλλακτική υπολογίζεται η διαφορά $Q_i = |O_i| - |O'_i|$, όπου $|\bullet|$ συμβολίζεται το πλήθος των εναλλακτικών σε κάθε σύνολο και ορίζεται το σύνολο με τις εναλλακτικές με την μεγαλύτερη διαφορά Q .

- Εάν $|D_1| = 1$ εξαιρούμε την εναλλακτική που εντάχθηκε στο σύνολο D_1 και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία από το βήμα 1.
- Εάν $|D_1| > 1$ τα παραπάνω βήματα επαναλαμβάνονται εντός του συνόλου D_1 και προσδιορίζουμε το υποσύνολο των εναλλακτικών του D_1 με τη μεγαλύτερη διαφορά Q (σύνολο D_2).
- Εάν $|D_2| = 1$ η διαδικασία επαναλαμβάνεται για το σύνολο $D_1 - D_2$, διαφορετικά επαναλαμβάνεται για το σύνολο D_2 . Ολόκληρο το D_1 και στη συνέχεια το σύνολο $A - D_1$ ελέγχονται με την επανάληψη αυτής της διαδικασίας.

Η δεύτερη κατάταξη Z_2 αναπτύσσεται εντελώς όμοια, με μοναδική διαφορά ότι στο βήμα 2 ελέγχονται οι εναλλακτικές με τη μικρότερη διαφορά Q .

Για την τελική κατάταξη των εναλλακτικών, η οποία προκύπτει από την τομή των δύο κατατάξεων, καθορίζονται οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} & (x_i P_1 x_i) \wedge (x_i P_2 x_i) \\ x_i P x_j & \Leftrightarrow (x_i P_1 x_i) \wedge (x_i I_2 x_i) \\ & (x_i I_1 x_i) \wedge (x_i P_2 x_i) \\ x_i I x_j & \Leftrightarrow (x_i I_1 x_i) \wedge (x_i I_2 x_i) \\ x_i R x_j & \Leftrightarrow \text{διαφορετικά} \end{aligned}$$

4.5.4 Μέθοδος ELECTRE IV

Για την υλοποίηση της μεθόδου τίθενται οι ακόλουθες παραδοχές:

- $m_p(a, b)$: ο αριθμός των κριτηρίων για τα οποία η εναλλακτική a είναι ισχυρά προτιμητέα έναντι της b
- $m_q(a, b)$: ο αριθμός των κριτηρίων για τα οποία η εναλλακτική a είναι ελαφρώς προτιμητέα έναντι της b
- $m_i(a, b)$: ο αριθμός των κριτηρίων για τα οποία η εναλλακτική a είναι αδιάφορη σε σχέση με τη b , αλλά έχει υψηλότερες αξιολογήσεις κριτηρίων έναντι της b
- $m_0(a, b) = m_0(b, a)$: ο αριθμός των ίσων τιμών των κριτηρίων των εναλλακτικών a και b .

Επιπλέον, ορίζονται οι ακόλουθες σχέσεις κατάταξης:

- Μερική Κυριαρχία S_q

$$a S_q b \leftrightarrow m_p(b, a) + m_q(a, b) = 0 \text{ και } m_i(b, a) \leq 1 + m_i(a, b) + m_p(a, b) + m_q(a, b)$$

- Κανονική Κυριαρχία S_c

$$a S_c b \leftrightarrow m_p(b, a) = 0 \text{ και } m_q(b, a) \leq m_p(a, b) \text{ και } m_q(b, a) + m_i(b, a) \leq 1 + m_i(a, b) + m_p(a, b) + m_q(a, b)$$

- Ψευδό - Κυριαρχία S_p

$$a S_p b \leftrightarrow m_p(b, a) = 0 \text{ και } m_q(b, a) \leq m_p(a, b) + m_q(a, b)$$

- Κυριαρχία Veto S_v

$$a S_v b \leftrightarrow m_p(b, a) = 0 \text{ εάν } m_p(b, a) = 1$$

Η κατάταξη κατασκευάζεται όπως και στην ELECTRE III.

4.5.5 Μέθοδος ELECTRE TRI

Η μέθοδος ELECTRE TRI στόχο έχει την ταξινόμησή των εναλλακτικών σε προκαθορισμένες κατηγορίες $C_1, C_2, C_3, \dots, C_q$. Οι κατηγορίες αυτές ορίζονται κατά διατεταγμένο τρόπο, θεωρώντας ότι η κατηγορία C_1 , περιλαμβάνει τις περισσότερο προτιμητέες εναλλακτικές δραστηριότητες (καλύτερη κατηγορία), ενώ η κατηγορία C_q , περιλαμβάνει τις λιγότερο προτιμητέες εναλλακτικές δραστηριότητες (χειρότερη κατηγορία). Σύμφωνα με τη μέθοδο, κάθε κατηγορία διαχωρίζεται από τις υπόλοιπες μέσω μιας «εικονικής» εναλλακτικής δραστηριότητας, που αποτελεί το διαχωριστικό όριο μεταξύ των κατηγοριών.

Κάθε τέτοια δραστηριότητα- όριο αποτελεί ένα πρότυπο αναφοράς r_k (reference profile), το οποίο διαχωρίζει τις κατηγορίες C_k και C_{k+1} . Ουσιαστικά το πρότυπο r_k είναι το κάτω όριο της κατηγορίας C_k και το πρότυπο r_{k-1} είναι το άνω όριο της κατηγορίας. Κάθε πρότυπο r_k μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα διάνυσμα αποτελούμενο από τις τιμές των κριτηρίων αξιολόγησης που διαχωρίζουν τις κατηγορίες C_k και C_{k+1} : $r_k = (r_{k1}, r_{k2}, \dots, r_{kn})$. Οι διαχωριστικές τιμές $r_{k1}, r_{k2}, \dots, r_{kn}$ των κριτηρίων αποτελούν τα επιμέρους πρότυπα που διαχωρίζουν τις κατηγορίες βάσει των κριτηρίων x_1, x_2, \dots, x_n . Επειδή οι κατηγορίες είναι διατεταγμένες, ο καθορισμός των προτύπων πρέπει να γίνει έτσι ώστε $r_{ki} > r_{k+1,i}$ για κάθε $k= 1, 2, \dots, q-1$ και $i= 1, 2, \dots, n$.

Η ταξινόμηση των εναλλακτικών δραστηριοτήτων στις προκαθορισμένες κατηγορίες γίνεται με βάση τη σύγκριση κάθε εναλλακτικής με τα πρότυπα αναφοράς. Η πραγματοποίηση της σύγκρισης αυτής βασίζεται στους ελέγχους συμφωνίας και ασυμφωνίας που χρησιμοποιούνται και στη μέθοδο ELECTRE III. Μια εναλλακτική x_i υπερέρχει του προτύπου r_k ($x_i S r_k$) όταν ο δείκτης αξιοπιστίας $\sigma(x_i, r_k)$ είναι μμεγαλύτερος από ένα όριο λ ($\lambda \in [0.5, 1]$), το οποίο καθορίζεται από τον αποφασίζοντα. Με βάση αυτή τη σχέση υπεροχής μπορούν να προκύψουν οι ακόλουθες σχέσεις μεταξύ μμιας εναλλακτικής x_i και του προτύπου r_k :

1. Αδιαφορία (I): $(x_i I r_k) \Leftrightarrow (x_i S r_k) \wedge (r_k S x_i)$
2. Προτίμηση (P): $(x_i P r_k) \Leftrightarrow (x_i S r_k) \wedge (r_k \not S x_i)$
3. Ασυγκριτικότητα (R): $(x_i R r_k) \Leftrightarrow (x_i \not S r_k) \wedge (r_k \not S x_i)$

Τέλος, ορίζονται δύο διαδικασιών ταξινόμησης:

- Η αισιόδοξη (optimistic) και
- Η απαισιόδοξης (pessimistic)

Οι δύο διαδικασίες ξεκινούν συγκρίνοντας κάθε εναλλακτική δραστηριότητα x_i με το πρότυπο r_{q-1} (χειρότερο πρότυπο). Εάν η δραστηριότητα προτιμάται του προτύπου ($x_i P r_{q-1}$) τότε πραγματοποιείται η σύγκριση με αμέσως καλύτερο πρότυπο r_{q-2} . Η ίδια διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να εμφανιστεί μια από τις ακόλουθες δύο περιπτώσεις:

1. $(x_i P r_k) \wedge (r_{k-1} P x_i) \vee (x_i I r_{k-1})$
2. $(x_i P r_k) \wedge (x_i R r_{k-1}) \wedge (x_i R r_{k-2}) \wedge \dots \wedge (x_i R r_{k-1}) \wedge (r_{k-1} P x_i)$

Στην πρώτη περίπτωση τόσο η αισιόδοξη, όσο και η απαισιόδοξη διαδικασία οδηγούν στην ταξινόμηση της δραστηριότητας x_i στην κατηγορία C_k . Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση η απαισιόδοξη διαδικασία θα ταξινομήσει τη δραστηριότητα στην κατηγορία C_k , ενώ η αισιόδοξη θα την ταξινομήσει στην κατηγορία C_{k-1} .

4.6 Η μέθοδος TOPSIS

Πρόκειται, στην ουσία για μια τροποποίηση της ELECTRE. Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι ο υπολογισμός της γεωμετρικής απόστασης των εναλλακτικών από προκαθορισμένα σημεία ιδανικά και αντί-ιδανικά σημεία κι η άθροιση των επιμέρους αποστάσεων, ώστε να προκύψει το τελικό αποτέλεσμα αξιολόγησης. Αρχικά, θεωρούμε τη μήτρα απόφασης A των εναλλακτικών και τη μήτρα C των κριτηρίων. Τα βήματα της μεθόδου προβλέπουν τα εξής:

- 1) Κατασκευή του πίνακα απόδοσης της μεθόδου.
- 2) Κανονικοποίηση του πίνακα σύμφωνα με μία συνάρτηση κανονικοποίησης v_j^i .
- 3) Ορίζονται ένα ιδανικά a^+ και μη-ιδανικό σημείο a^- της μεθόδου, ως συνδυασμό της μέγιστης κι ελάχιστης τιμής των $v_j(a^i)$, για όλα τα $a^i \in A$, $c^i \in C$.
- 4) Ορίζονται τα σχετικά βάρη των κριτηρίων, έτσι ώστε να εκφράζουν τη σχετική τους σημασία.
- 5) Υπολογίζονται οι αποστάσεις του a^i από τα a^+ και a^- , σύμφωνα με τους τύπους:

$$D(a^i)^+ = \left\{ \sum_{j=1}^{|c|} w_j * |v_j(a^+) - v_j(a^i)|^p \right\}^{1/p}$$

$$D(a^i)^- = \left\{ \sum_{j=1}^{|c|} w_j * |v_j(a^i) - v_j(a^-)|^p \right\}^{1/p}$$

Όπου p: προκαθορισμένη νόρμα απόστασης (συνήθως p=1 ή 2)

- 6) Τέλος, κατασκευάζεται η συνολική συνάρτηση απόστασης για το a^i , αθροίζοντας τις δύο προαναφερθείσες αποστάσεις σύμφωνα με τη σχέση:

$$D(a^i) = \frac{D(a^i)^-}{D(a^i)^+ + D(a^i)^-}$$

Τελικά, ως βέλτιστη επιλέγεται η εναλλακτική με τη μεγαλύτερη απόσταση $D(a^i)$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

5.1 Επιλογή μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης

Η χάραξη ενεργειακής πολιτικής σε εθνικό ή διεθνές επίπεδο χαρακτηρίζεται από αβεβαιότητα, μακροχρόνιο σχεδιασμό, υψηλά κόστη επενδύσεων και μια πληθώρα ετερόκλητων κριτηρίων που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την αξιολόγηση των διαθέσιμων εναλλακτικών. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει μια πληθώρα ενεργειακών μελετών, στις οποίες χρησιμοποιούνται μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης για τη σύγκριση κι αξιολόγηση διαφορετικών τεχνολογιών παραγωγής. Καθεμία από αυτές παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα [52, 53].

Στην παρούσα εργασία, για τη μελέτη της αναγκαιότητας και δυνατότητας προώθησης στην Ελλάδα της πυρηνικής ενέργειας επιλέχθηκαν τρεις διαφορετικές μέθοδοι:

- **Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία – AHP:** Η πρώτη μέθοδος που εφαρμόστηκε ήταν η AHP, η οποία είναι μια σχετικά απλή μεθοδολογία που επιτρέπει την αξιολόγηση τόσο ποσοτικών όσο και ποιοτικών κριτηρίων. Η ευκολία στην εφαρμογή και τη δοκιμή της συνέπειας των εναλλακτικών, η δυνατότητα πλήρους καταγραφής των παραμέτρων του προβλήματος και απεικόνιση του περιβάλλοντος λήψης αποφάσεων αποτελούν τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου. Άλλωστε, η AHP αποτελεί την πιο ευρέως διαδεδομένη πολυκριτηριακή μεθοδολογία σε εφαρμογές ενεργειακού χαρακτήρα [53]. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι πως γίνεται αρκετά χρονοβόρα όταν τα υπό εξέταση κριτήρια είναι πολλά [54].
- **PROMETHEE:** Η PROMETHEE στηρίζεται στη σχέση υπεροχής και χρησιμοποιείται, επίσης, συχνά σε εφαρμογές ενεργειακού σχεδιασμού. Το σημαντικότερο στοιχείο της μεθόδου είναι ότι λαμβάνει υπόψη την αμφιβολία του αποφασίζοντα όσον αφορά διαφορές μεταξύ των εναλλακτικών και των κριτηρίων. Παράλληλα, προσφέρει τη δυνατότητα ξεκάθαρης υπεροχής ενός κριτηρίου έναντι κάποιου άλλου.
- **TOPSIS:** Πρόκειται για μια ευρέως χρησιμοποιούμενη πολυκριτηριακή μέθοδο στον τομέα του ενεργειακού σχεδιασμού. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι πως επιτρέπει στον αποφασίζοντα να ορίσει ιδανικές και μη ιδανικές λύσεις και έχοντας αυτές ως αφετηρία να αξιολογήσει την απόδοση των υπό εξέταση εναλλακτικών, επιλέγοντας τη βέλτιστη.

5.2 Εξεταζόμενες Εναλλακτικές

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξετάστηκε η περίπτωση της Ελλάδας με στόχο την αξιολόγηση της δυνατότητας προώθησης της πυρηνικής ενέργειας ως μέσο ηλεκτροπαραγωγής στη χώρα. Συγκεκριμένα, αξιολογήθηκε η δημιουργία ενός νέου εργοστασίου για την κάλυψη των μελλοντικών εγχώριων ενεργειακών αναγκών. Οι εναλλακτικές που καθορίστηκαν για την υλοποίηση της πολυκριτηριακής εφαρμογής είναι:

T1	Πυρηνική Ενέργεια
T2	Φυσικό Αέριο
T3	Λιγνίτης
T4	Πετρέλαιο
T5	ΥΗΣ

Πίνακας 3: Πίνακας εναλλακτικών

Οι τεχνολογίες αυτές επιλέχθηκαν με βάση το ισχύον μίγμα ηλεκτροπαραγωγής της χώρας μας.

5.3 Επιλογή κριτηρίων

Στη συνέχεια, καθορίστηκαν τα κριτήρια στα οποία στηρίχθηκε η αξιολόγηση των παραπάνω τεχνολογιών παραγωγής. Για το σκοπό αυτό, έγινε εκτενής βιβλιογραφική έρευνα σε παρόμοιες εργασίες διεθνώς αλλά και στην Ελλάδα. Εν γένει, τα κριτήρια που επί το πλείστον χρησιμοποιούνται στη λήψη αποφάσεων στον ενεργειακό σχεδιασμό ταξινομούνται συνήθως σε τέσσερις κατηγορίες: τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά. Λαμβάνοντας υπόψη τη διεθνή βιβλιογραφία και τη σύγχρονη ελληνική πραγματικότητα ορίστηκαν τα εξής κριτήρια για τη μελέτη μας [54-63]:

Τεχνικά κριτήρια

- Αποτελεσματικότητα: Ορίζεται ως λόγος της ενέργειας που παράγεται προς την απαιτούμενη ποσότητα που χρησιμοποιείται για να παραχθεί. Αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα τεχνικά κριτήρια και είναι άμεσα συνυφασμένη με την αξιοπιστία της τεχνολογίας.
- Αξιοπιστία: Αποτελεί εξίσου σημαντικό παράγοντα με την αποτελεσματικότητα στην αξιολόγηση μιας τεχνολογίας και καθορίζεται από την ποιότητα του εξοπλισμού, το μέσο ετήσιο αριθμό βλαβών, τα διαστήματα που απαιτείται να αποσυνδεθεί το σύστημα από το δίκτυο για λόγους συντήρησης, αποκατάστασης βλαβών κτλ.
- Ασφάλεια: Είναι ένας από τους πλέον απαιτητικούς τομείς, καθώς οι προδιαγραφές που τίθενται σήμερα για την πρόληψη ατυχημάτων, την προστασία του περιβάλλοντος και την ασφάλεια των εργαζόμενων είναι ιδιαίτερα αυστηρές. Λαμβάνονται υπόψη τα στατιστικά κι ιστορικά στοιχεία ατυχημάτων που έχουν καταγραφεί, καθώς και η έκταση των επιπτώσεων στον άνθρωπο και το περιβάλλον.
- Τεχνολογική ωριμότητα: Η ωριμότητα της τεχνολογίας παραγωγής είναι ένα ακόμη μέτρο της αξιοπιστίας της. Το κριτήριο αυτό αποτιμά το κατά πόσο η τεχνολογία χρησιμοποιείται σε εθνικό ή παγκόσμιο επίπεδο.

Οικονομικά κριτήρια

- Κόστος Επένδυσης: Αναφέρεται στη δαπάνη που απαιτείται για τις αρχικές μελέτες χωροθέτησης, την αδειοδότηση και την κατασκευή του εργοστασίου, την αγορά του αρχικού εξοπλισμού, τις αμοιβές του ανθρώπινου δυναμικού και κάθε άλλο κόστος που αφορά την τοποθέτηση και εγκατάσταση του σταθμού παραγωγής.
- Κόστος Λειτουργίας και Συντήρησης: Περιλαμβάνει το σταθερό και μεταβλητό κόστος λειτουργίας του σταθμού, τις αμοιβές του προσωπικού, το κόστος καυσίμου και τις δαπάνες για τις προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης κι αναβάθμισης της εγκατάστασης ή έκτακτης αποκατάστασης βλαβών.
- Κόστος (παραγωγής) ηλεκτρισμού: Πρόκειται για το τελικό, συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού. Συνήθως αποτιμάται σε χρηματικές μονάδες/ kWh(e) και δείχνει πόσο «ακριβή» ή «φθηνή» είναι η ενέργεια που παράγει κάθε τεχνολογία.
- Διάρκεια Ζωής: Αφορά τον εκτιμώμενο χρόνο λειτουργίας της εγκατάστασης (προσδοκώμενη διάρκεια ζωής). Το διάστημα αυτό πρέπει να είναι εύλογα μεγαλύτερο από την περίοδο αποπληρωμής για να καθίσταται συμφέρουσα η επένδυση.

Περιβαλλοντικά κριτήρια

- Εκπομπή αέριων ρύπων: Κατά την καύση των ορυκτών καυσίμων απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα αέριοι ρύποι, όπως διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, οξείδια του αζώτου, διοξείδιο του θείου, μονοξείδιο του άνθρακα, στερεά σωματίδια κτλ. Τα στοιχεία αυτά συντελούν στην όξυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου κι είναι επιβλαβή για τον άνθρωπο και το περιβάλλον.
- Παραγωγή στερών ρύπων και λυμάτων: Αξιολογούνται η ποσότητα, η επικινδυνότητα και το κόστος διαχείρισης των στερεών και υγρών αποβλήτων, όπως η τέφρα που παράγεται κατά την καύση του λιγνίτη και κατακάθεται στον πυθμένα του λέβητα, οι ράβδοι εξαντλημένου καυσίμου κτλ, κάθε τεχνολογίας.
- Χρήση γης: Η εγκατάσταση ενός σταθμού παραγωγής δεσμεύει σημαντικές εκτάσεις γης για μεγάλες χρονικές περιόδους. Η γη αυτή θα μπορούσε να αξιοποιηθεί διαφορετικά (καλλιεργήσιμες εκτάσεις, κοινωφελείς σκοπούς όπως δημιουργία χώρων πολιτισμού, αθλητισμού, ψυχαγωγίας, πρασίνου κτλ). Επιπλέον, η τοποθέτηση ενός νέου εργοστασίου επηρεάζει την πανίδα και τη χλωρίδα της περιοχής. Όλοι αυτοί οι παράγοντες πρέπει να ληφθούν υπόψη στη διαδικασία σχεδιασμού ενός νέου εργοστασίου ηλεκτροπαραγωγής.
- Ηχορύπανση – Οπτική Όχληση: Η κατασκευή ενός εργοστασίου αλλοιώνει το τοπίο της περιοχής εγκατάστασης. Επίσης, η λειτουργία ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής ίσως αποτελεί πηγή θορύβου, επηρεάζοντας τη ζωή των κατοίκων και τη φυσική ισορροπία.

Κοινωνικά κριτήρια

- Κοινωνική Αποδοχή: Η άποψη της κοινής γνώμης για μια τεχνολογία παίζει σημαντικό ρόλο στον ενεργειακό προγραμματισμό, επηρεάζοντας την τελική απόφαση για την εγκατάσταση του σταθμού.
- Συνεισφορά στην απασχόληση: Η εγκατάσταση ενός νέου σταθμού ηλεκτροπαραγωγής δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας τόσο κατά την περίοδο κατασκευής όσο και κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, συμβάλλοντας σημαντικά στην οικονομική ανάπτυξη της τοπικής κοινωνίας.
- Συνεισφορά στην κοινωνική ευημερία: Πέρα από τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και την οικονομική ανάπτυξη, η κατασκευή ενός νέου εργοστασίου συμβάλλει στη γενικότερη άνοδο του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων της ευρύτερης περιοχής. Για παράδειγμα, η εγκατάσταση ενός πυρηνικού σταθμού μπορεί να αποτελέσει έναυσμα για την ενασχόληση νέων ανθρώπων με τον τομέα των πυρηνικών, τη λήψη πανεπιστημιακής μόρφωσης, την ανάπτυξη ερευνητικής δραστηριότητας κτλ [64].
- Συνεισφορά στην ενεργειακή αυτοτέλεια: Αναφέρεται στην εξάρτηση που δημιουργεί η εφαρμογή καθεμίας από τις παραπάνω τεχνολογίες παραγωγής από τρίτες χώρες ή οργανισμούς όσον αφορά την απαιτούμενη πρώτη ύλη (καύσιμο), την παροχή τεχνογνωσίας, τη συντήρηση του εξοπλισμού κτλ.

5.4 Πίνακες βαρών κι αποδόσεων

Για την κατασκευή του πίνακα βαρών χρησιμοποιήθηκε η ΑΗΡ. Σύμφωνα με τα όσα προβλέπει η μέθοδος, έπειτα από εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση σε ανάλογες ελληνικές και διεθνείς εργασίες κατασκευάστηκε ο πίνακας με τη σχετική σημασία των κριτηρίων που ορίστηκαν παραπάνω και υπολογίστηκε το αντίστοιχο ιδιοδιάνυσμα. Η διαδικασία υπολογισμού του ιδιοδιανύσματος επαναλήφθηκε 3 φορές, έτσι ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στον τελικό πίνακα. Η διαδικασία υπολογισμού υλοποιήθηκε σε Microsoft Excel. Τελικά, προέκυψε ο ακόλουθος πίνακας βαρών (πίνακας 4) για τα κριτήρια που ορίστηκαν:

ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΒΑΡΗ
1. Αποτελεσματικότητα	0,071221
2. Αξιοπιστία	0,065376
3. Ασφάλεια	0,066241
4. Τεχνολ. Ωριμότητα	0,056318
5. Κόστος Επένδυσης	0,068856
6. Κόστος λειτουργίας & συντήρησης	0,070758
7. Κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού	0,071971
8. Διάρκεια ζωής	0,052844
9. Εκπομπή αέριων ρύπων	0,052446
10. Παραγωγή στερεών λυμάτων	0,046784
11. Χρήση γης	0,057114
12. Ηχορρύπανση & Οπτική όχληση	0,034343
13. Κοινωνική Αποδοχή	0,070089
14. Συνεισφορά στην απασχόληση	0,07239
15. Συνεισφορά στην κοινωνική ευημερία	0,071396
16. Συνεισφορά στην ενεργειακή αυτοτέλεια	0,070826

Πίνακας 4: Βάρη κριτηρίων

Ο πίνακας βαρών που προέκυψε χρησιμοποιήθηκε και στις τρεις μεθόδους που εφαρμόστηκαν, έτσι ώστε τα αποτελέσματα που προέκυψαν να είναι συγκρίσιμα. Επίσης, έγινε προσπάθεια τα βάρη των κριτηρίων να μην παρουσιάζουν πολύ μεγάλες αποκλίσεις ούτως ώστε να μην υπερεκτιμηθεί (ή υποτιμηθεί κάποιο αυτά).

Μελετώντας εφαρμογές στη διεθνή και την ελληνική βιβλιογραφία καταστρώθηκαν οι πίνακες με τις σχετικές αποδόσεις των εναλλακτικών για κάθε κριτήριο και υπολογίστηκαν τα σχετικά ιδιοδιάνυσματα. Η διαδικασία υπολογισμού επαναλήφθηκε και πάλι 3 φορές για λόγους ακριβείας.

Στον πίνακα 5 παρουσιάζεται η τελική απόδοση κάθε τεχνολογίας για το αντίστοιχο κριτήριο. Ο πίνακας αποδόσεων επιλέχθηκε επίσης να είναι κοινός για όλες τις μεθόδους που εφαρμόστηκαν.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Πυρηνική Ενέργεια	0,2797	0,2514	0,22490	0,14210	0,13380	0,24510	0,23150	0,21600	0,21750	0,12790	0,17880	0,23770	0,12370	0,27810	0,23350	0,2140
Φυσικό Αέριο	0,2296	0,1658	0,18070	0,18710	0,22680	0,17670	0,16610	0,20440	0,17390	0,20340	0,20000	0,18040	0,23440	0,19960	0,19690	0,1636
Λιγνίτης	0,1997	0,1932	0,15720	0,21590	0,24850	0,18810	0,18450	0,19540	0,13160	0,15780	0,15900	0,15270	0,18770	0,23790	0,14820	0,2815
Πετρέλαιο	0,1490	0,1815	0,14220	0,24860	0,25290	0,12250	0,13850	0,18000	0,14600	0,18090	0,22800	0,14190	0,17120	0,11970	0,16200	0,1436
ΥΗΣ	0,1419	0,2081	0,29500	0,20640	0,13800	0,26760	0,27930	0,20430	0,33100	0,32990	0,23410	0,28740	0,28300	0,16470	0,25940	0,1973

Πίνακας 5: Αποδόσεις Εναλλακτικών ανά κριτήριο

Διευκρινίζεται πως για την αξιολόγηση των επιδόσεων κάθε τεχνολογίας στα επιμέρους κριτήρια που ορίστηκαν έγιναν οι εξής παραδοχές:

- Η πυρηνική ενέργεια αναφέρεται σε πυρηνικό αντιδραστήρα PWR. Η αξιολόγηση στηρίχθηκε σε στοιχεία από τη διεθνή βιβλιογραφία.
- Για την αξιολόγηση των λιγνιτικών, πετρελαϊκών, υδροηλεκτρικών και των σταθμών φυσικού αερίου χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία για τους σταθμούς που λειτουργούν ήδη στην Ελλάδα.
- Σε όσα κριτήρια ήταν απαραίτητο θεωρήθηκε πως όλες οι αναφορές αφορούν σταθμούς ίσης ισχύος (όπως για παράδειγμα για την αξιολόγηση της προσφοράς θέσεων εργασίας για κάθε τεχνολογία).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

6.1 Εφαρμογή πολυκριτηριακής μεθόδου AHP

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία της AHP, η τελική επίδοση κάθε εναλλακτικής προκύπτει πολλαπλασιάζοντας τον πίνακα αποδόσεων των εναλλακτικών με τα βάρη των κριτηρίων. Έτσι προκύπτει πίνακας 6.

Εναλλακτικές	Απόδοση
ΥΗΣ	0,234512
Πυρηνική Ενέργεια	0,210286
Φυσικό Αέριο	0,193351
Λιγνίτης	0,192958
Πετρέλαιο	0,167867

Πίνακας 6: Αποδόσεις Εναλλακτικών (AHP)

Ως βέλτιστη τεχνολογία, λοιπόν, από την εφαρμογή της AHP προκύπτουν οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μεγάλοι ΥΗΣ που εξετάστηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης εφαρμογής χαρακτηρίζονται από αυξημένη αξιοπιστία (ανάλογη με των συμβατικών μονάδων), διατηρώντας πολλά θετικά χαρακτηριστικά των ΑΠΕ. Συγκεκριμένα, συνδυάζουν χαμηλό κόστος λειτουργίας, σχεδόν μηδενικές εκπομπές ρύπων, υψηλή κοινωνική αποδοχή και συμβάλλουν στην άνοδο του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων της περιοχής όπου εγκαθίστανται. Η ίδρυση ενός υδροηλεκτρικού σταθμού, άλλωστε, απαιτεί την υλοποίηση μεγάλων έργων (π.χ. φραγμάτων), τα οποία έχουν πολλαπλά οφέλη για την τοπική και την ευρύτερη κοινωνία. Στο σημείο αυτό, πρέπει να σημειωθεί πως παρά τα πολλαπλά οφέλη που προσφέρει ένας υδροηλεκτρικός σταθμός, στην Ελλάδα τα περιθώρια περαιτέρω αξιοποίησης της εν λόγω τεχνολογίας είναι πολύ περιορισμένα. Η λειτουργία ενός υδροηλεκτρικού σταθμού απαιτεί μεγάλο όγκο νερού, ώστε να επιτευχθεί η παραγωγή ικανοποιητικής ισχύος. Στην Ελλάδα, ωστόσο, δεν υπάρχουν ανεκμετάλλευτες πηγές νερού που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για τη δημιουργία ενός νέου ΥΗΣ.

Στη δεύτερη θέση της κατάταξης βρίσκεται η πυρηνική ενέργεια κι ακολουθούν οι λιγνιτικοί σταθμοί κι οι μονάδες φυσικού αερίου, με πολύ μικρή διαφορά μεταξύ τους. Οι σταθμοί φυσικού αερίου έχουν μειωμένες εκπομπές ρύπων και καλύτερη κοινωνική αποδοχή από τους λιγνιτικούς, γεγονός που τους δίνει ένα ελαφρύ προβάδισμα στην AHP. Τη μικρότερη επίδοση έχουν οι πετρελαϊκοί σταθμοί, κυρίως εξαιτίας του υψηλού κόστους λειτουργίας.

6.2 Εφαρμογή πολυκριτηριακής μεθόδου PROMETHEE

Για την υλοποίηση της μεθόδου τα κριτήρια που λήφθηκαν υπόψη ταξινομήθηκαν ως εξής:

- **Τεχνικά κριτήρια → Κανονικά κριτήρια (usual type):** Υπάρχει αδιαφορία μεταξύ δύο εναλλακτικών αν και μόνο αν οι επιδόσεις τους στο κριτήριο είναι ίσες. Σε άλλη περίπτωση, υπάρχει σαφής προτίμηση της μίας έναντι της άλλης. Επομένως η συνάρτηση h_k ορίζεται ως εξής:

$$h_k(x_{ik} - x_{jk}) = \begin{cases} 0, & \text{αν } x_{ik} = x_{jk} \\ 1, & \text{αν } x_{ik} > x_{jk} \end{cases}$$

- **Οικονομικά κριτήρια → Βαθμωτά κριτήρια (level type):** Στην περίπτωση αυτή ορίζεται ένα κατώφλι αδιαφορίας q_k κι ένα κατώφλι προτίμησης p_k . Εάν η διαφορά $x_{ik} - x_{jk} \in [q_k, p_k]$, τότε υπάρχει μία ελαφριά προτίμηση για την εναλλακτική x_i . Εφόσον η διαφορά των επιδόσεων των εναλλακτικών είναι μικρότερη από το κατώφλια αδιαφορίας q_k , ο αποφασίζων είναι αδιάφορος μεταξύ των δύο υπό εξέταση εναλλακτικών. Τέλος, ένα η διαφορά $x_{ik} - x_{jk}$ υπερβαίνει το κατώφλι προτίμησης p_k , τότε υπάρχει σαφής προτίμηση για το x_i . Στην εφαρμογή που υλοποιήθηκε, θεωρήσαμε $q_k = 0,045$ και $p_k = 0,1$ για τα κατώφλια αδιαφορίας και προτίμησης αντίστοιχα. Τα ίδια κατώφλια χρησιμοποιήθηκαν και για τους άλλους τύπους κριτηρίων. Τελικά, για τη συνάρτηση h_k των βαθμωτών κριτηρίων έχω:

$$h_k = \begin{cases} 0, & \text{αν } x_{ik} - x_{jk} < q_k \\ 0,5, & \text{αν } x_{ik} - x_{jk} \in [q_k, p_k] \\ 1 & \text{αν } x_{ik} - x_{jk} > p_k \end{cases}$$

- **Κοινωνικά κριτήρια → Κριτήρια με κατώφλι αδιαφορίας (U- type):** Στην περίπτωση αυτή αδιαφορία υπάρχει όταν η διαφορά μεταξύ των δύο εναλλακτικών στο υπό εξέταση κριτήριο δεν υπερβαίνει ένα κατώφλι αδιαφορίας q_k . Διαφορετικά υπάρχει σαφής προτίμηση. Στην περίπτωση αυτή η συνάρτηση για το h_k δίνεται από τη σχέση:

$$h_k(x_{ik} - x_{jk}) = \begin{cases} 0, & \text{αν } x_{ik} - x_{jk} < q_k \\ 1, & \text{αν } x_{ik} - x_{jk} \geq q_k \end{cases}$$

- **Περιβαλλοντικά κριτήρια → Κριτήρια με κατώφλι προτίμησης (V-type):** Θεωρούμε πως εφόσον η διαφορά $x_{ik} - x_{jk}$ είναι μικρότερη από ένα κατώφλι προτίμησης p_k , τότε η προτίμηση για τη x_i αυξάνει γραμμικά σε συνάρτηση με τη διαφορά ($x_{ik} - x_{jk}$). Όταν αυτή η διαφορά ξεπερνάει το κατώφλι προτίμησης p_k , τότε υπάρχει σαφής προτίμηση. Επομένως η συνάρτηση h_k ορίζεται ως εξής:

$$h_k(x_{ik} - x_{jk}) = \begin{cases} 1, & \text{αν } x_{ik} - x_{jk} \geq p_k \\ \frac{x_{ik} - x_{jk}}{p_k}, & \text{αν } x_{ik} - x_{jk} < p_k \end{cases} \quad [49]$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω και χρησιμοποιώντας τα βάρη και τις επιδόσεις των πινάκων 3 και 4 αντίστοιχα, με την εφαρμογή της PROMETHEE υπολογίστηκε η καθαρή ροή (net flow) κάθε εναλλακτικής (πίνακας 7).

Εναλλακτικές	Καθαρή Ροή
ΥΗΣ	0,156985164
Πυρηνική Ενέργεια	0,040703377
Λιγνίτης	-0,02142236
Φυσικό Αέριο	-0,03323981
Πετρέλαιο	-0,14302637

Πίνακας 7: Αποδόσεις εναλλακτικών (PROMETHEE)

Διαπιστώνεται, λοιπόν, πως την υψηλότερη βαθμολογία έχουν τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται στην κατάταξη είναι η καλύτερη επίδοση των λιγνιτικών έναντι των σταθμών φυσικού αερίου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη

διαφορετική σημασία που δόθηκε στις επιμέρους ομάδες κριτηρίων με την κατάταξη τους σε διαφορετικούς τύπους. Έτσι, η ύπαρξη κοιτασμάτων λιγνίτη στην ελληνική περιφέρεια, η μεγαλύτερη τεχνολογική ωριμότητα των λιγνιτικών σταθμών σε εθνικό επίπεδο, η ενεργειακή αυτοτέλεια που προσφέρει κι η άρση της ανάγκης εισαγωγών από άλλες χώρες, είναι στοιχεία στα οποία δόθηκε μεγαλύτερη βαρύτητα κατά την υλοποίηση της PROMETHEE και βελτίωσαν την επίδοση των λιγνιτικών σταθμών.

6.3 Εφαρμογή πολυκριτηριακής μεθόδου TOPSIS

Τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής προσέγγισης με τη μέθοδο TOPSIS, παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα 8.

Εναλλακτικές	Αποδόσεις
Πυρηνική Ενέργεια	0,617144
ΥΗΣ	0,616014
Φυσικό Αέριο	0,585989
Λιγνίτης	0,554094
Πετρέλαιο	0,425494

Πίνακας 8: Αποδόσεις Εναλλακτικών

Η πυρηνική ενέργεια και τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια είναι αυτά που προσεγγίζουν περισσότερο την ιδανική λύση σύμφωνα με την TOPSIS, με την πυρηνική ενέργεια να προηγείται με ελάχιστη διαφορά. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις καλές επιδόσεις της στα τεχνολογικά κριτήρια, τις χαμηλές εκπομπές ρύπων και το χαμηλό κόστος λειτουργίας και παραγωγής ηλεκτρισμού των πυρηνικών σταθμών. Ακολουθούν με μικρή διαφορά μεταξύ τους το φυσικό αέριο, ο λιγνίτης και τέλος το πετρέλαιο. Συγκρίνοντας τις επιδόσεις των εναλλακτικών, φαίνεται πως οι αποκλίσεις μεταξύ των συμβατικών σταθμών (λιγνίτης, φυσικό αέριο, πετρέλαιο) είναι σχετικά μικρές, γεγονός που οφείλεται στην ομοιότητα των τεχνολογικών χαρακτηριστικών τους.

6.4 Σύγκριση μεθόδων – Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα των μεθόδων που εφαρμόστηκαν έδειξαν πως τα υδροηλεκτρικά είναι η τεχνολογία με τις υψηλότερες επιδόσεις στην πλειοψηφία των μεθόδων για λόγους που αναλύθηκαν εκτενώς παραπάνω. Επίσης, η κατάταξη της πυρηνικής ενέργειας σύμφωνα με τα αποτελέσματα των περισσότερων μεθόδων, δείχνει ότι η πυρηνική αποτελεί μια συγκρίσιμη κι ανταγωνιστική εναλλακτική σε σύγκριση με τις ήδη χρησιμοποιούμενες μεθόδους στην Ελλάδα. Ακολουθούν το φυσικό αέριο κι ο λιγνίτης με μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους. Τέλος, οι πετρελαϊκοί σταθμοί είχαν τη μικρότερη επίδοση εξαιτίας του υψηλού κόστους λειτουργίας τους και της ακαταλληλότητάς τους για την εξυπηρέτηση του βασικού φορτίου της χώρας.

Σε γενικές γραμμές, οι αποκλίσεις μεταξύ των μεθόδων που εφαρμόστηκαν δεν ήταν μεγάλες. Συγκεκριμένα, σε όλες τις μεθόδους τις υψηλότερες αποδόσεις έχουν οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί με τα πυρηνικά εργοστάσια να ακολουθούν με μικρές διαφορές. Στην εφαρμογή της TOPSIS, ειδικά, οι δύο μέθοδοι φαίνονται να ισοβαθούν στην προσέγγιση της ιδανικής λύσης που ορίστηκε για την εφαρμογή της μεθόδου. Επιπλέον, ενώ στην υλοποίηση της AHP και της TOPSIS, το φυσικό αέριο προηγείται του λιγνίτη, στην

εφαρμογή της PROMETHEE, οι λιγνιτικοί σταθμοί έχουν μεγαλύτερη καθαρή ροή από τους εκείνους του φυσικού αερίου, λαμβάνοντας την 3^η θέση της κατάταξης. Τέλος, οι πετρελαϊκοί σταθμοί καταλαμβάνουν την τελευταία θέση της κατάταξης και στις τρεις υλοποιήσεις.

Οι διαφορές που παρατηρήθηκαν είναι λογικές και δεν υποδεικνύουν κάποιο λάθος στον τρόπο εφαρμογής ή υλοποίησης των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν. Οι αποκλίσεις οφείλονται στη διαφορετική διαδικασία αξιολόγησης των εναλλακτικών που χρησιμοποιεί κάθε μέθοδος κι ίσως οδηγήσει στην εξαγωγή διαφορετικών αποτελεσμάτων. Γι αυτό, άλλωστε, κρίνεται απαραίτητη η χρήση περισσότερων της μίας μεθόδου προκειμένου να εξαχθούν ασφαλέστερα και πιο αξιόπιστα συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

7.1 Συμπεράσματα

Ο ενεργειακός σχεδιασμός αποτελεί αναμφίβολα ένα τομέα στρατηγικής σημασίας για κάθε σύγχρονη χώρα, καθώς χαρακτηρίζεται από μεγάλη δυναμική και στενή αλληλεπίδραση με πολλούς άλλους τομείς της καθημερινότητας, όπως η πολιτική, η οικονομία, το περιβάλλον, η κοινωνική ευημερία και το βιοτικό επίπεδο των ανθρώπων. Η αειφορία, η ασφάλεια εφοδιασμού κι η ανταγωνιστικότητα αποτελούν σημεία κλειδιά στην χάραξη ενεργειακής πολιτικής σε εθνικό και διεθνές επίπεδο. Η επιλογή, λοιπόν, του κατάλληλου μίγματος ηλεκτροπαραγωγής αποτελεί ένα πολυδιάστατο πρόβλημα που εσωκλείει πλήθος ετερόκλητων παραμέτρων κι ενέχει μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας. Για όλους αυτούς τους λόγους οι πολυκριτηριακές μέθοδοι καθίστανται ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο στη λήψη αποφάσεων που άπτονται σε θέματα ενεργειακού σχεδιασμού.

Στα πλαίσια αυτά, στην παρούσα εργασία έγινε μια αποτίμηση των αναγκών και των ευκαιριών της κοινωνικής, περιβαλλοντικής και οικονομικής βιωσιμότητας της πυρηνικής ενέργειας στη σύγχρονη ελληνική πραγματικότητα. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής που υλοποιήθηκε είναι ενδιαφέροντα καθώς φαίνεται πως η πυρηνική ενέργεια έχει αρκετά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σχέση με τις τεχνολογίες που ήδη χρησιμοποιούνται και μπορεί να θεωρηθεί ως μια ανταγωνιστική εναλλακτική στα πλαίσια της σύγχρονης ελληνικής ενεργειακής αγοράς.

Έτσι, από τη μία πλευρά είναι γεγονός πως προβλήματα, όπως ο κίνδυνος ατυχήματος, η πολυπλοκότητα και τα θέματα ασφαλείας που σχετίζονται με τη διαχείριση του εξαντλημένου καυσίμου και η αρνητική προκατάληψη της κοινής γνώμης εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικά εμπόδια στη χρήση της πυρηνικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα. Άλλωστε, υπάρχουν πολλά πρακτικά ζητήματα που πρέπει να μελετηθούν όπως η εξασφάλιση προμήθειας ουρανίου ή η δυνατότητα εξόρυξης των εγχώριων κοιτασμάτων, η θέσπιση του κατάλληλου νομοθετικού πλαισίου, η εύρεση κατάλληλης τοποθεσίας για την εγκατάσταση του σταθμού, η ανάπτυξη της απαιτούμενης τεχνογνωσίας, η εκπαίδευση εξειδικευμένου προσωπικού κ.ο.κ.

Στην άλλη όψη του νομίσματος, ωστόσο, οι πυρηνικοί σταθμοί δεν παύουν να αποτελούν μια ενδιαφέρουσα, οικονομικά ανταγωνιστική και τεχνολογικά ικανή εναλλακτική για την ανάληψη μέρους του βασικού φορτίου της χώρας. Συγκεκριμένα, η ενδεχόμενη εγκατάσταση ενός πυρηνικού σταθμού στη χώρα μας θα μπορούσε να συντελέσει:

- Στο περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και κατ' επέκταση την αποφυγή καταβολής οικονομικών ποινών, σύμφωνα με τα όσα προβλέπει το Πρωτόκολλο του Κιότο.
- Στη μείωση του κόστους της kWh.
- Μεγαλύτερη ενεργειακή αυτονομία συγκριτικά με το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή που υλοποιήθηκε είναι ενδεικτική καθώς οι αποδόσεις και τα βάρη βασίστηκαν σε μεγάλο βαθμό σε βιβλιογραφική έρευνα, υπό το πρίσμα, βέβαια των ενεργειακών χαρακτηριστικών, των αναγκών ανάπτυξης και των προοπτικών της σύγχρονης ελληνικής αγοράς. Ενδεχόμενη μεταβολή στα βάρη ή/και τις αποδόσεις των κριτηρίων μπορεί να αλλάξει τα αποτελέσματα κατάταξης των εναλλακτικών και συνεπώς να οδηγήσει σε διαφορετικές τεχνολογικές προτεραιότητες.

7.2 Προοπτικές

Σύμφωνα με πρόσφατη έκθεση του σχετικά με τον ενεργειακό σχεδιασμό της Ελλάδας [27, 65], το ενεργειακό μίγμα ηλεκτροπαραγωγής που προτείνεται ως αξιόπιστη και οικονομικά ανταγωνιστική λύση για την κάλυψη της προβλεπόμενης αυξημένης ζήτησης περιλαμβάνει:

- Τον περιορισμό της χρήσης λιγνιτικών μονάδων λόγω της μείωσης των διαθέσιμων κοιτασμάτων λιγνίτη και των αυξημένων εκπομπών CO₂.
- Τη χρήση μονάδων φυσικού αερίου στο βαθμό που θα ικανοποιούνται οι ανάγκες για πρώτη ύλη από εισαγωγές καυσίμου βάσει μακροχρόνιων συμβάσεων που πρέπει να εξασφαλιστούν.
- Μεγάλα υδροηλεκτρικά εργοστάσια σε ποσοστό που καθορίζεται από το εξαιρετικά περιορισμένο αξιοποιήσιμο υδροδυναμικό της χώρας.
- Εισαγωγή ΑΠΕ σε ποσοστό που υπαγορεύεται από τις ανάγκες ευστάθειας του συστήματος.
- Τη χρήση πετρελαϊκών υποσταθμών κυρίως για λόγους εφεδρείας στις νησιωτικές και σε περιοχές απομακρυσμένες από το διασυνδεδεμένο δίκτυο [27].

Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή, λοιπόν, δεν συμπεριλαμβάνεται στον άμεσο ενεργειακό σχεδιασμό της Ελλάδας, γεγονός που συμβάλλει εν μέρει στην ενεργειακή εξάρτηση της χώρας μας τόσο για την εισαγωγή καυσίμων από τρίτες χώρες όσο και για την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από όμορα κράτη που σχεδιάζουν ή έχουν, ήδη, εγκαταστήσει πυρηνικούς σταθμούς στην επικράτεια τους, όπως η Βουλγαρία, η Τσεχία, η Ουγγαρία, η Σλοβενία, η Ρουμανία κι η Τουρκία. Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί πως σε περίπτωση μεγάλου πυρηνικού ατυχήματος σε μία γειτονική χώρα, η πιθανότητα τυχόν επιπτώσεων και στην Ελλάδα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη.

Εν κατακλείδι, η τυχόν λήψη απόφασης για την εγκατάσταση πυρηνικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρισμού σε χώρες χωρίς «πυρηνικό» παρελθόν, όπως είναι η Ελλάδα, προϋποθέτει εκτενή κι εμπειριστατωμένη μελέτη των εγχώριων ενεργειακών αναγκών, προσεκτική αξιολόγηση των προϋποθέσεων και των πιθανών οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων του εγχειρήματος. Η ιδιαιτερότητα της συγκεκριμένης απόφασης σχετίζεται με ένα μεγάλο πλήθος παραγόντων, όπως η πολυπλοκότητα των δεσμεύσεων, ο μακροπρόθεσμος σχεδιασμός, οι αυξημένες απαιτήσεις για υψηλή τεχνογνωσία, άκρως εξειδικευμένου και άρτια καταρτισμένο ανθρώπινο δυναμικό, θέσπιση του κατάλληλου νομικού πλαισίου για την αδειοδότηση, λειτουργία και μετέπειτα παραπλισμό των πυρηνικών εγκαταστάσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γιώργος Γιαδικιάρου, (Απρίλιος, 2007), Πυρηνική ενέργεια – νέες προοπτικές, ΕΕΑΕ – ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος
- [2] U.S.Department of Commerce, International Database (IDB), Research of the Census Bureau’s International Programs Center for Demographic and Economic Studies
- [3] U.S. Energy Information Administration (EIA), (May – June 2006), Independent Statistics & Analysis: International Energy Annual 2004
- [4] Περιβάλλον & Διαχείριση Ενέργειας: Γαιάνθρακες, <http://www.allaboutenergy.gr/>
- [5] BP Statistical review of world energy, 2006
- [6] 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.
- [7] Ιωάννης Ψαρράς, (ΑΘΗΝΑ 2010), Σημειώσεις: Διαχείριση Ενέργειας και Περιβαλλοντική Πολιτική, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
- [8] Μαρία Λοιζίδου-Μαλαμή, Ενεργειακές προοπτικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, Τομέας Χημικών Επιστημών, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ
- [9] International Energy Agency –IEA, Electricity Statistics, <http://www.iea.org/statistics/topics/Electricity>
- [10] The schift project data portal (2012)
- [11] 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>]
- [12] Eurostat Commission, (November 2012), Electricity Production and supply Statistics, http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Electricity_production_and_supply_statistics#Further_Eurostat_information
- [13] International Atomic Energy Agency (IAEA), (2012), Nuclear Technology Review 2012
- [14] International Atomic Energy Agency, (2011), IAEA: Annual Report 2011
- [15] IEA Energy Technology Essentials, Nuclear Power
- [16] IEA Nuclear Technology Statistics, 2011

[17] World Nuclear Association, Nuclear Power in China, (Updated 27 November 2013), <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/China--Nuclear-Power/>

[18] ΔΗΜΟΣΙΑ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ - Δ.Ε.Η. , www.dei.gr

[19] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας- National Report 2012, http://www.rae.gr/site/categories_new/consumers/know_about/electricity/production.csp

[20] Φώτιος Ε. Καραγιάννης, (Δεκέμβριος 2012), ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ, Παρουσίαση στο ΕΜΠ, 5/12/12

[21] Κ.Βουρνάς, Β.Κ. Παπαδιάς, Κ. Ντελκής, (2011), ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ, Εκδόσεις Συμμετρία

[22] Ε. Κακαράς, Α. Κουκέλης, Δ. Γιαννακόπουλος, Α. Κουμανάκος, (2005), ΔΕΣΜΕΥΣΗ CO₂ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ ΛΙΓΝΙΤΗ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Θερμότητας, Εργαστήριο Ατμοπαραγωγών και Θερμικών Εγκαταστάσεων

[23] Ιωάννης Βούλγαρης, (Θεσσαλονίκη 2005), Πηγές ενέργειας και μετατροπή τους σε ηλεκτρική ενέργεια, Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας, ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

[24] Νικόλαος Πατρώνης, Σύγχρονη Φυσική, (2012), Πυρηνική Φυσική και Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων, Διάλεξη 3: Ενέργεια Σύνδεσης και Πυρηνικά Πρότυπα

[25] W.N. COTTINGHAM – D.A. GREENWOOD, Μετάφραση: Κ. ΣΑΡΗΓΙΑΝΝΗΣ, Επιμέλεια: Κ. Ν. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΣ, (2003), ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ, Εκδόσεις τυπωθήτω, ΓΙΩΡΓΟΣ ΔΑΡΔΑΝΟΣ

[26] Μαρία Καφεσάκη, ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ: Σημειώσεις Διαλέξεων, Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών, [<http://gate.iesl.forth.gr/~kafesaki/Modern-Physics/index.html>]

[27] Τσιούτρα Σταυρούλα, Ρόκκου Αικατερίνη, (Θεσσαλονίκη 2010), Σύγκριση Αιολικού και Πυρηνικού Σταθμού, Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας, ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

[28] Uranium Price Chart <http://www.mongabay.com/commodities/price-charts/price-of-uranium.html>

[29] Μ. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ ΝΤΟΜΗΣ , ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

[30] World Nuclear Association, Nuclear Basics: How does a nuclear reactor make electricity, <http://www.world-nuclear.org/Nuclear-Basics/How-does-a-nuclear-reactor-make-electricity/>

[31] John R. Lamarsh, Anthony J. Baratta, Introduction to Nuclear Engineering, THIRD EDITION

- [32] WIKIPEDIA: The Free Encyclopedia: Magnox Reactors, <http://en.wikipedia.org/wiki/Magnox>
- [33] WIKIPEDIA: The Free Encyclopedia: File:AGR reactor schematic.svg, http://en.wikipedia.org/wiki/File:AGR_reactor_schematic.svg
- [34] WIKIPEDIA: The Free Encyclopedia: File:Very High Temperature Reactor.svg, http://en.wikipedia.org/wiki/File:Very_High_Temperature_Reactor.svg
- [35] L.S. Tong, Core cooling in a hypothetical loss of coolant accident. Estimate of heat transfer in core meltdown, Westinghouse Electric Corporation, Atomic Power Divisions, Pittsburgh, Pennsylvania, USA
- [36] Μάριος Βερέττας, (Ρόδος 2011), ΤΑ ΠΥΡΗΝΙΚΑ: Παγκόσμια Ιστορία των πυρηνικών εξοπλισμών, των πυρηνικών εργοστασίων και των πυρηνικών ατυχημάτων, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΒΕΡΕΤΤΑ
- [37] Shinji Fushiki, (2012), Radiation hazards in children – Lessons from Chernobyl, Three Mile Island and Fukushima, Department of Pathology and Applied Neurobiology, Kyoto Prefectural University of Medicine, Graduate School of Medical Science
- [38] David W. Fischert, Planning for large-scale accidents: Learning from the Three Mile Island accident, Institute of Industrial Economics
- [39] E. Cardis, (2011), The Chernobyl Accident — An Epidemiological Perspective, Centre for Research in Environmental Epidemiology (CREAL), Hospital del Mar Research Institute (IMIM), CIBER Epidemiologia y Salud Pública (CIBERESP), Barcelona, Spain, Radiation Epidemiology Branch, Division of Cancer Epidemiology and Genetics, National Cancer Institute, USA
- [40] Georg Steinhauser, Alexander Brandl, Thomas E. Johnson, (2013), Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts, Department of Environmental and Radiological Health Sciences, Colorado State University
- [41] Φίλοι Τεχνικού Μουσείου Θεσσαλονίκης, Πυρηνική ενέργεια - Πυρηνικοί Αντιδραστήρες, <http://www.tmth.gr/sciencerelated/59-applications/361-pyriniki-energeia>
- [42] Westinghouse - Simplified plant arrangement, https://www.ukap1000application.com/modularization_and_construction.aspx
- [43] Ελευθέριος Χ. Τσουκαλάς, (2009), ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ: Μύθοι, αξιολογήσεις και προοπτικές στο νέο τοπίο της ενέργειας και του περιβάλλοντος, School of Nuclear Engineering, Purdue University
- [44] World Nuclear Association, The Nuclear Debate, <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/The-Nuclear-Debate/>
- [45] Hyunggu Jung, A Game-Theoretic Analysis of Information Security Games in General Cases: Risk-aversion User Agents, Advisor: Prof. Urs Hengartner

[46] Δημήτριος Γ. Γεωργίου, (2012), Αξιολόγηση Σχεδίων ΑΠΕ με τη Χρήση Πολυκριτηριακών εφαρμογών, ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ, ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

[47] Ασημακόπουλος, Αραμπατζής, (2002), Τεχνικές Ανάλυσης Δεδομένων & Λήψης Αποφάσεων"

[48] Λιοτατής Ευάγγελος, (ΑΘΗΝΑ 2012), Συνδυασμός Πολυκριτηριακής Ανάλυσης και Πολυκριτηριακού Προγραμματισμού στην επιλογή χαρτοφυλακίου επενδυτικών σχεδίων. Εφαρμογή σε πρόβλημα διαχείρισης υδάτινων πόρων., ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, Τομέας II: Ανάλυσης, Σχεδιασμού και Ανάπτυξης Διεργασιών και Συστημάτων, Εργαστήριο Βιομηχανικής & Ενεργειακής Οικονομίας

[49] Σταμάτης Κ. Σπανός , (ΑΘΗΝΑ 2004), Αναλυτική μελέτη πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων

[50] Jose Ramon San Cristobal (Jan 5, 2012), Multi Criteria Analysis in the Renewable Energy Industry (Green Energy and Technology)

[51] Siskos Y. (2008), Athens, Decision Models, New Technologies Publications

[52] N. Munier, Springer, (2011), A Strategy for Using Multicriteria Analysis in Decision-making: A Guide for Simple and Complex Environmental Projects

[53] Pohekar, Ramachandran, (2004), Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning

[54] Loken E. (2007), Use of multicriteria Decision Analysis methods for energy planning problems

[55] Haralambopoulos D. A., Polatidis H. (2003), Renewable Energy Projects: structuring a multicriteria group decision making framework

[56] Naim H. Afgan, Maria G. Carvalho, Nikolai V. Hovanov, (August, 1999), Energy system assessment with sustainability indicators, Sustainable Energy Management, Instituto Superior Tecnico, Pavilhao de Maquinas

[57] M. Beccali, M. Cellura, M. Mistretta, (2003), Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology, Dipartimento di Ricerche Energetiche e Ambientali, Università degli Studi di Palermo

[58] Fajik Begića, (2011), Sustainability assessment tool for the decision making in selection of energy system—Bosnian case, JP Elektroprivreda BiH, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina Naim H. Afganb, Instituto Superior Tecnico, Lisbon, Portugal

- [59] Berna Haktanirlar Ulutaş, (2004), Determination of the appropriate energy policy for Turkey, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Osmangazi University
- [60] J. Terrados, G. Almonacid, P. Pérez-Higueras, (2009), Proposal for a combined methodology for renewable energy planning. Application to a Spanish region, Research Group IDEA, Polytechnics School, University of Jaén, 23071 Jaén, Spain
- [61] D. Diakoulaki, F. Karangelis, (2005), Multi-criteria decision analysis and cost–benefit analysis of alternative scenarios for the power generation sector in Greece, Department of Chemical Engineering, Laboratory of Industrial and Energy Economics, National Technical University of Athens
- [62] Charikleia Karakosta, Charalampos Pappas, Vangelis Marinakis, John Psarras, (2013), Renewable energy and nuclear power towards sustainable development: Characteristics and prospects, National Technical University of Athens, School of Electrical and Computer Engineering, Decision Support Systems Laboratory (EPU-NTUA)
- [63] Jurate Sliogerienea, Zenonas Turskisb, Dalia Streimikienea, (2012), Analysis and Choice of Energy Generation Technologies: The Multiple Criteria Assessment on the Case Study of Lithuania
- [64] Wang J. J., Jing Y. Y., Zhao J. H. (2009), Review on multi- criteria decision analysis aid in sustainable energy decision- making
- [65] Λεκατσάς Ε. (2009), Η Αγορά Ηλεκτρισμού στην Ελλάδα - Ρυθμιστικό Πλαίσιο, Ανταγωνισμός και Ασφάλεια Εφοδιασμού, ημερίδα με θέμα: Η σημερινή θέση και το μέλλον της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, Αθήνα.