



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΑΣ & ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

Η ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΩΣ ΜΕΣΟ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΑΜΙΑΝΙΔΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΚΑΛΛΙΩΡΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Καθώς ο κόσμος προσπαθεί να μεταφέρει τα ενεργειακά του συστήματα μακριά από ορυκτά καύσιμα σε πηγές ενέργειας χαμηλών εκπομπών άνθρακα και να παρέχει ενέργεια και σε μέρη όπου επικρατεί ενεργειακή φτώχεια, έχουμε μια σειρά ενεργειακών επιλογών: τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως υδροηλεκτρική ενέργεια, αιολική και ηλιακή, αλλά και την πυρηνική ενέργεια. Η παρούσα διπλωματική εξετάζει την πυρηνική ενέργεια ως μέσω ηλεκτροπαραγωγής, ειδικότερα για την περίπτωση της Ελλάδος, στην οποία υπάρχει χαμηλότερη εκπομπή CO₂ ανά μονάδα παραγωγής ενέργειας, και είναι επίσης πολύ καλύτερη από τα ορυκτά καύσιμα σε περιορισμένα επίπεδα τοπικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Ωστόσο, ενώ ορισμένες χώρες επενδύουν σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση του εφοδιασμού των πυρηνικών εγκαταστάσεων, άλλες περνούν τις εγκαταστάσεις τους εκτός δικτύου και άλλες δεν έχουν καθόλου πυρηνικές εγκαταστάσεις όπως συμβαίνει και στην περίπτωση της Ελλάδας. Ο ρόλος, επομένως, που διαδραματίζει η πυρηνική ενέργεια στο ενεργειακό σύστημα είναι πολύ συγκεκριμένος για κάθε χώρα ξεχωριστά.

Πόση από την ενέργειά προέρχεται από πυρηνικά; Πώς αλλάζει ο ρόλος της πυρηνικής ενέργειας με την πάροδο του χρόνου; Ερωτήματα όπως αυτά θα απαντηθούν στην παρούσα διπλωματική όπου θα εξετάσουμε τα επίπεδα και τις αλλαγές στην παραγωγή πυρηνικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο, και την ασφάλεια της σε σύγκριση με άλλες πηγές ενέργειας.

ABSTRACT

As the world try to move their energy systems away from fossil fuels to low-carbon energy sources and provide energy to places where energy is prevalent, we have a number of energy choices: renewable energy technologies such as hydropower, wind and wind energy. but also nuclear energy. This diploma examines nuclear energy as a means of generating electricity, especially in the case of Greece, which has a lower CO₂ emission per unit of energy production, and is also much better than fossil fuels at limited levels of local air pollution.

However, while some countries invest heavily in increasing the supply of nuclear facilities, others move their facilities off-grid and others have no nuclear facilities at all, as in the case of Greece. The role that nuclear energy plays in the energy system is therefore very specific to each country.

How much energy comes from nuclear? How does the role of nuclear energy change over time? Questions like these will be answered in this dissertation where we will look at the levels and changes in nuclear power generation around the world, and its safety compared to other energy sources.

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΟΠΙΟ	6
1.1 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας.....	6
1.2 Μακροχρόνιες ενεργειακές μεταβολές	9
1.3 Ενεργειακή ένταση των οικονομιών.....	12
1.4 Αποκαρβονισμός	13
1.5 Παγκόσμιο ενεργειακό εμπόριο.....	16
1.6 Η χρήση ενέργειας συνδέεται στενά με την οικονομική ανάπτυξη και την εξάλειψη της φτώχειας.....	24
1.7 Σχετικό κόστος πηγών ενέργειας	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ	31
2.1 Η ενεργειακή κρίση της Αρχαίας Ρώμης	31
2.2 Η εξέλιξη των κοινωνιών.....	32
2.3 Ενεργειακό Πρόβλημα	35
2.3.1 Τα δίδυμα προβλήματα της παγκόσμιας ενέργειας	37
2.3.1.1 Το πρώτο ενεργειακό πρόβλημα: αυτοί που έχουν χαμηλές εκπομπές άνθρακα δεν έχουν πρόσβαση στην ενέργεια	37
2.3.1.2 Το δεύτερο ενεργειακό πρόβλημα: εκείνοι που έχουν πρόσβαση στην ενέργεια παράγουν πολύ υψηλές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου	38
2.4 Η ενεργειακή πρόκληση: να βρεθούν εναλλακτικές λύσεις μεγάλης κλίμακας για τα ορυκτά καύσιμα που να είναι προσιτά, ασφαλή και βιώσιμα.....	40
2.5 Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και αερίων του θερμοκηπίου	42
2.5.1 Σε ορισμένες περιοχές, η αύξηση της θερμοκρασίας είναι πολύ μεγαλύτερη από τον παγκόσμιο μέσο όρο	44
2.5.2 Πώς αλλάζουν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και οι συγκεντρώσεις	45
2.5.3 Οι παγκόσμιες εκπομπές δεν έχουν ακόμη κορυφωθεί.....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	49
3.1 Παραγωγή πυρηνική ενέργειας	49
3.2 Μείγμα πυρηνικής και ηλεκτρικής ενέργειας.....	51
3.2.1 Μερίδιο ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από πυρηνικά	52
3.3 Η πιο ασφαλή πηγής ενέργειας	53
3.3.1 Η πυρηνική ενέργεια και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι πολύ πιο ασφαλείς από τα ορυκτά καύσιμα.....	55
3.3.2 Οι σύγχρονες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η πυρηνική ενέργεια δεν είναι μόνο ασφαλέστερες αλλά και καθαρότερες από τα ορυκτά καύσιμα	59

3.3.3. Η πυρηνική ενέργεια σώζει ζωές.....	61
3.4 Θάνατοι από το Chernobyl και Fukushima	62
Κεφάλαιο 4: Πυρηνική Τεχνολογία	65
4.1 Βασικά στοιχεία πυρηνικής φυσικής.....	65
4.1.1 Άτομο και πυρήνας	65
4.1.2 Πυρηνικές αντιδράσεις	66
4.2 Εισαγωγή στις πυρηνικές τεχνολογίες.....	67
4.2.1 Αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης.....	67
4.2.2 Βασική δομή και λειτουργία αντιδραστήρα	68
4.2.3 Το ουράνιο ως πρώτη ύλη	74
4.3 Θεσμικό Πλαίσιο για την πυρηνική ενέργεια	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	96
5.1 Η πυρηνική ενέργεια ως μέρος της ενεργειακής λύσης.....	96
5.2 Μία σύντομη ανασκόπηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των επιπτώσεων στην υγεία από τα ατυχήματα στα πυρηνικά εργοστάσια	97
5.2.1 Το ατύχημα στο Three Mile Island.....	98
5.2.2. Το ατύχημα στο Chernobyl.....	99
5.2.3 Το ατύχημα στην Fukushima.....	102
5.3 Διαχείριση πυρηνικών αποβλήτων	103
5.3.1 Μέτρα για την ασφαλή αποθήκευση των πυρηνικών αποβλήτων.....	104
5.3.2 Φυσικές ιδιότητες πυρηνικών αποβλήτων	105
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	106
6.1 Η πυρηνική ενέργεια σε αριθμούς.....	106
6.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της πυρηνικής ενέργειας.....	106
6.3 Τελικά συμπεράσματα.....	110
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	111

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πρόσβαση στην ενέργεια αποτελεί βασικό πυλώνα για την ανθρώπινη ευημερία, την οικονομική ανάπτυξη και την μείωση της φτώχειας. Η εξασφάλιση επαρκούς πρόσβασης σε όλους είναι μια συνεχής και πιεστική πρόκληση για την παγκόσμια ανάπτυξη. Ωστόσο, τα ενεργειακά μας συστήματα έχουν επίσης σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τα ιστορικά και τρέχοντα ενεργειακά συστήματα είναι σε μεγάλο ποσοστό από ορυκτά καύσιμα (άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο) που παράγουν διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και άλλα αέρια που ενισχύουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, που είναι βασικός παράγοντας για την παγκόσμια κλιματική αλλαγή. Εάν θέλουμε να επιτύχουμε τους παγκόσμιους ενεργειακούς στόχους για το κλίμα και να αποφύγουμε την επικίνδυνη κλιματική αλλαγή, ο κόσμος χρειάζεται μια σημαντική και συντονισμένη μετάβαση στις πηγές ενέργειας.

Η εξισορρόπηση της πρόκλησης μεταξύ ανάπτυξης και περιβάλλοντος μας παρέχει έναν τελικό στόχο, να διασφαλίσουμε ότι ο καθένας έχει πρόσβαση σε αρκετή βιώσιμη ενέργεια για να διατηρήσει ένα υψηλό βιοτικό επίπεδο.

Ένα μέρος αυτής της διπλωματική επιδιώκει να καλύψει τους θεμελιώδεις πυλώνες που πρέπει να γίνουν κατανοητή στα παγκόσμια και περιφερειακά ενεργειακά συστήματα: την εξέλιξη τους μέσω του χρόνου από την άποψη της κατανάλωσης, των σχετικών πηγών και του εμπορίου. Την πρόοδο στην παγκόσμια πρόσβαση στην ενέργεια και τη μετάβασή μας προς πηγές χαμηλών εκπομπών άνθρακα και τους κρίσιμους παράγοντες ανάπτυξης, οικονομίας και υγείας πίσω από τις ενεργειακές επιλογές που κάνουμε. Στόχος της, είναι να παρέχει ένα θεμελιώδες υπόβαθρο στις μακροοικονομικές τάσεις στα ιστορικά και τρέχοντα ενεργειακά μας συστήματα, με βασικές γνώσεις για το πώς μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτήν την κατανόηση για να διαμορφώσουμε ένα μονοπάτι προς ένα βιώσιμο μέλλον.

Στην συνέχεια γίνεται ανάλυση της πυρηνικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη, όχι μόνο το ενεργειακό τοπίο σήμερα αλλά και το ευρύτερο θεσμικό, οικονομικό και τεχνολογικό πλαίσιο που την περικλείει. Σκοπός αυτής της ανάλυσης, είναι η αντικειμενική εκτίμηση και η εξέταση της δυνατότητας προώθησης της πυρηνικής ενέργειας ως μέσο ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα.

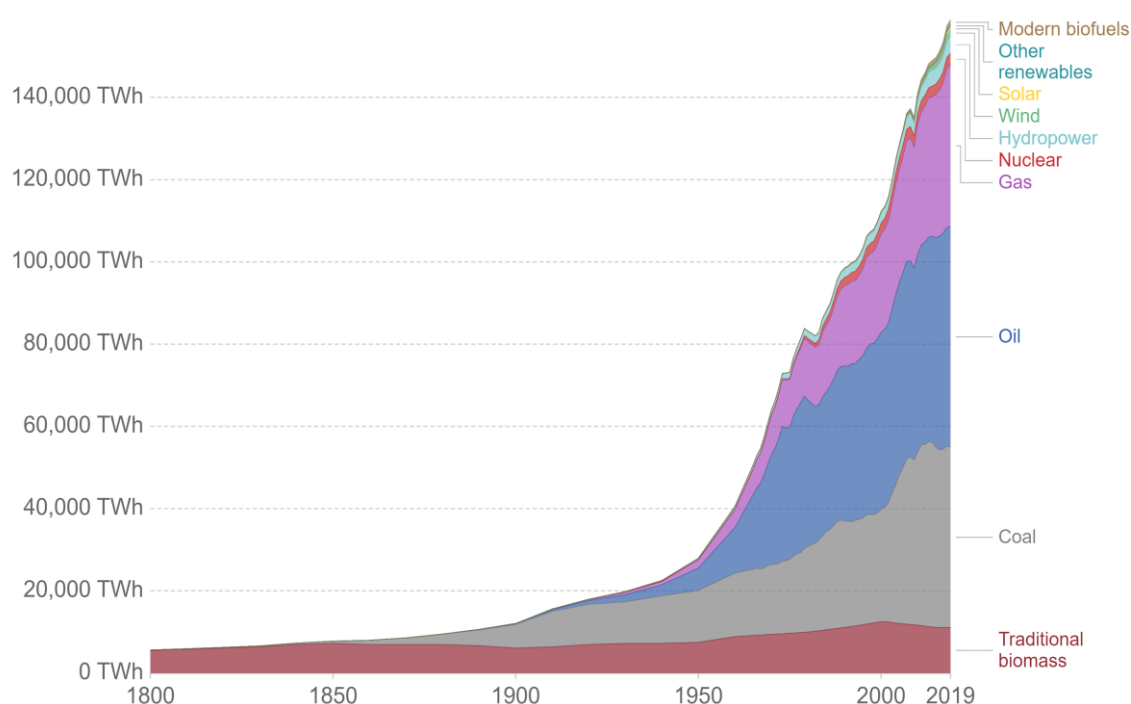
Αναλυτικότερα, για τον σκοπό αυτό, γίνεται μία πλήρης ανάλυση για την λειτουργία των αντιδραστήρων καθώς και την παραγωγή ενέργειας από πυρηνικά, με παραδείγματα χωρών που επενδύουν στις πυρηνικές τεχνολογίες. Γίνεται μία πλήρης ποσοτική ανάλυσης των τριών βασικών ατυχημάτων σε πυρηνικές εγκαταστάσεις και γίνεται σύγκριση με τις υπόλοιπες πηγές ενέργειας ως αναφορά την ασφάλεια, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τις επιπτώσεις στην υγεία. Επιπλέον γίνεται, οικονομική σύγκριση μεταξύ των πηγών ενέργειας για να δούμε πως μεταβάλλονται οι τιμές και το κόστος ανά πηγή ενέργειας για να κατανοήσουμε πως η ενεργειακή ένταση των οικονομιών διαδραματίζει σημαντική παράμετρο για την οικονομική ανάπτυξη και ευημερία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΟΠΙΟ

1.1 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας

Η παγκόσμια παραγωγή ενέργειας - τόσο από άποψη ποσότητας όσο και από τις πηγές τις οποίες προέρχεται –έχει αλλάξει μακροπρόθεσμα. Στο παρακάτω γράφημα παρατηρούμε την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας από το 1800 έως το 2019.

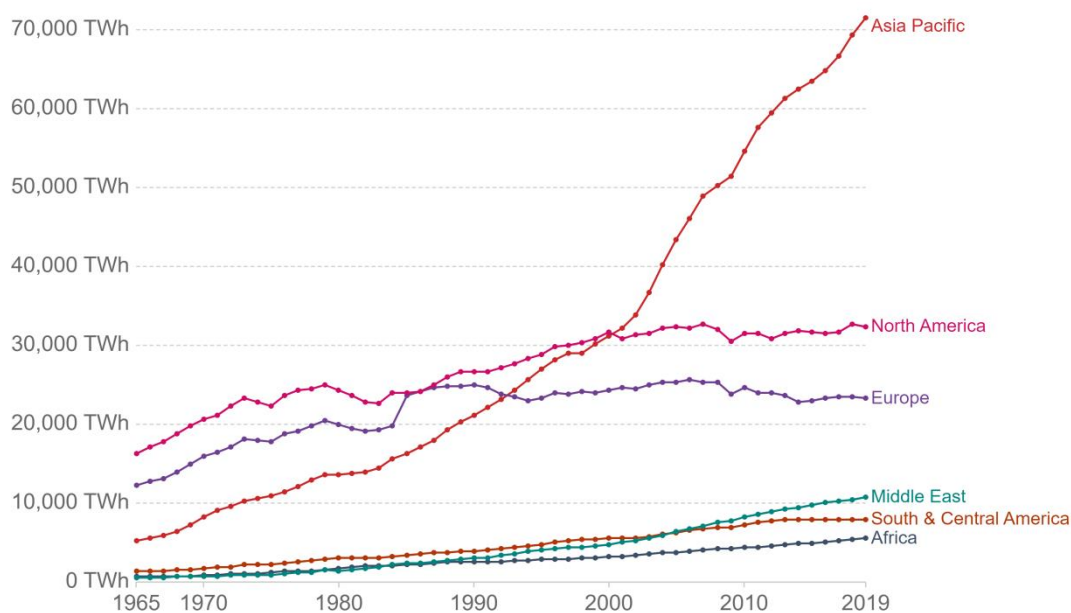
Γράφημα 1 : Παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας



Πηγή : Vaclav Smil (2017) and BP Statistical Review of World Energy

Πώς κατανέμονται τα συνολικά επίπεδα κατανάλωσης στις περιοχές του κόσμου; Στο παρακάτω γράφημα , βλέπουμε την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας από το 1965-2019 να συγκεντρώνεται ανά ήπειρο. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό το σύνολο δεδομένων περιλαμβάνει μόνο καύσιμα που διατίθενται στο εμπόριο (άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο), πυρηνικά και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι η παραδοσιακή βιομάζα δεν περιλαμβάνεται. Ως αποτέλεσμα, τα στοιχεία είναι πιθανό να έχουν μία μικρή απόκλιση για τις περιοχές ,κυρίως της Αφρικής και της αναπτυσσόμενης Ασίας , όπου οι πληθυσμοί εξακολουθούν να βασίζονται έντονα στην βιομάζα ως κύρια πηγή καυσίμου.

Γράφημα 2 : Πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας ανά Ήπειρο



Πηγή : BP Statistical Review of World Energy (2019)

Το 1965 το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής ενέργειας καταναλώθηκε από την Βόρεια Αμερική, Ευρώπη και Ευρασία - συνολικά, αντιπροσώπευε περισσότερο από το 80% της παγκόσμιας καταναλωθείσας ενέργειας. Αν και η κατανάλωση ενέργειας έχει αυξηθεί σε αυτές τις περιοχές από τη δεκαετία του 1960, το σχετικό μερίδιό της στο σύνολο έχει μειωθεί σημαντικά. Η κατανάλωση σε όλο τον υπόλοιπο κόσμο έχει αυξηθεί, και πιο δραματικά στην Ασία του Ειρηνικού όπου η συνολική κατανάλωση αυξήθηκε περισσότερο από 12 φορές κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου.

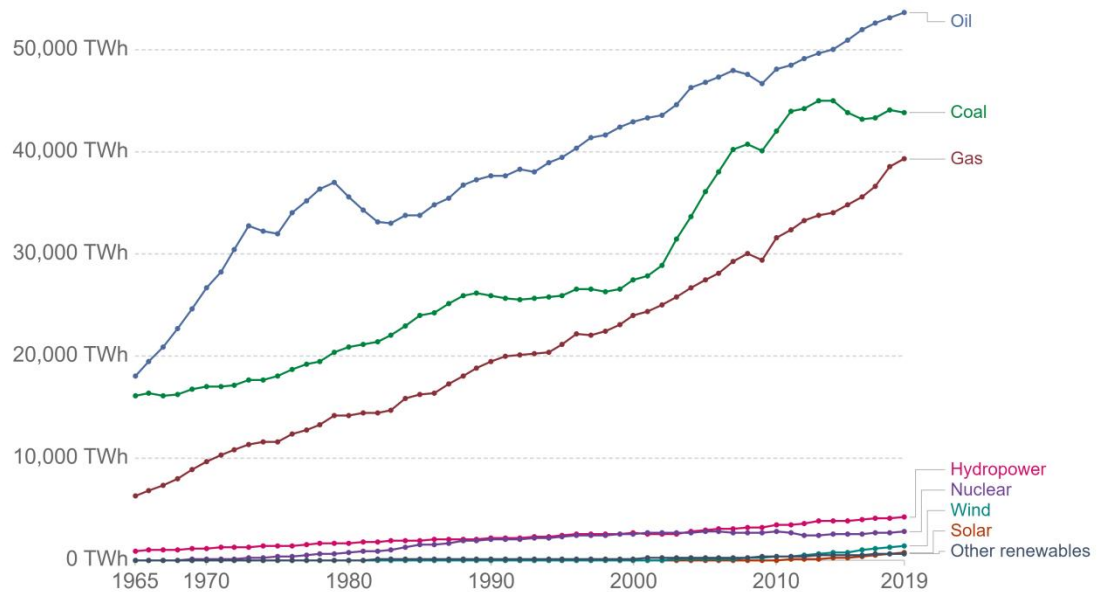
Ως αποτέλεσμα, το 2015 η Ασία-Ειρηνικού ήταν μακράν ο μεγαλύτερος περιφερειακός καταναλωτής με 42% - περίπου το ίδιο με τη Βόρεια Αμερική, την Ευρώπη και την Ευρασία (43%). Η Μέση Ανατολή, η Λατινική Αμερική και η Αφρική αντιπροσωπεύουν περίπου το 7%, 5% και 3%, αντίστοιχα.

Στα παρακάτω γραφήματα (3,4) γίνεται σύγκριση της κατανάλωσης ενέργειας ανά πηγή.

Αυτό θα γίνει με δύο τρόπους, ως “πρωτογενής” κατανάλωση ενέργειας και ως ενεργειακή κατανάλωση “διορθωμένη” για ανεπαρκείς ορυκτών καυσίμων μετατροπές. Όμως, αυτή η προσέγγιση δεν λαμβάνει υπόψη τις ανεπάρκειες που προκύπτουν από τα ορυκτά καύσιμα όταν μετατρέπονται σε τελική ενέργεια. Δείχνουμε επομένως τιμές που διορθώνονται με αυτό που ονομάζεται «μέθοδος υποκατάστασης». Αυτό δίνει μια καλύτερη προσέγγιση της τελικής κατανάλωσης της ενέργειας και θεωρείται συχνά ως ο πιο κατάλληλος τρόπος σύγκρισης των μεριδίων, διαφορετικών πηγών ενέργειας.

Γράφημα 3 : Πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας ανά πηγή , Παγκοσμίως

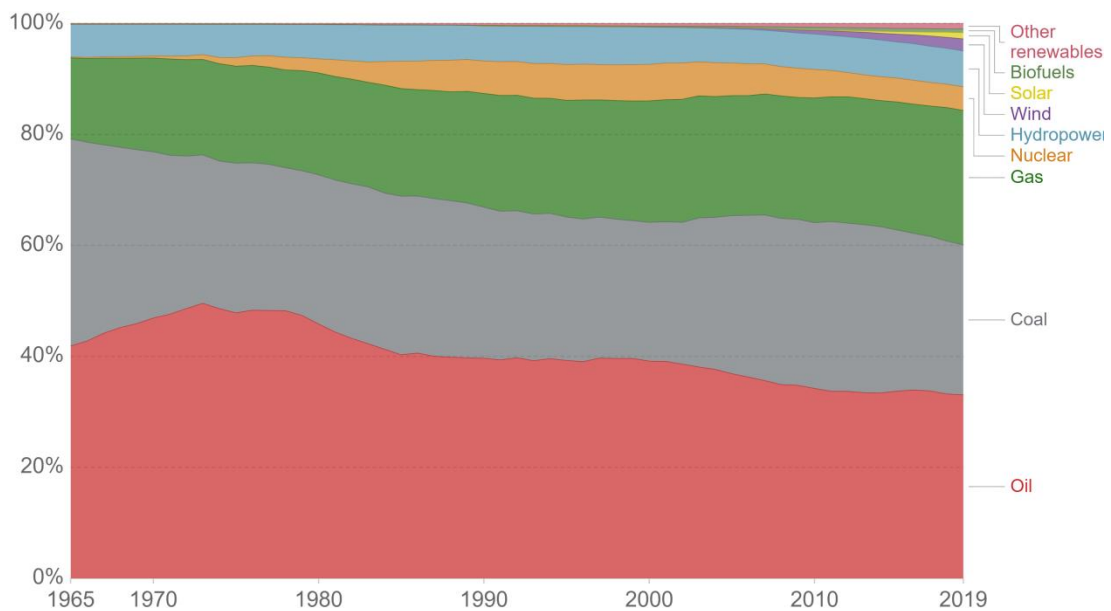
Η κατανάλωση ενέργειας εμφανίζεται ως άμεση πρωτογενής ενέργεια. Αυτό σημαίνει, ότι δεν διορθώνει τις ανεπάρκειες των ορυκτών καυσίμων στη μετατροπή τους σε χρήσιμη ενέργεια.



Πηγή : BP Statistical Review of Global Energy

Γράφημα 4 : Ενεργειακή κατανάλωση ανά πηγή, Παγκοσμίως

Η πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας μετράται σε terawatt-ώρες (TWh). Εδώ έχει εφαρμοστεί η μέθοδος της «ποκατάστασης» για τα ορυκτά καύσιμα, πράγμα που σημαίνει ότι τα μερίδια από κάθε πηγή ενέργειας είναι διορθωμένα και δίνουν μια καλύτερη προσέγγιση της τελικής κατανάλωσης ενέργειας.

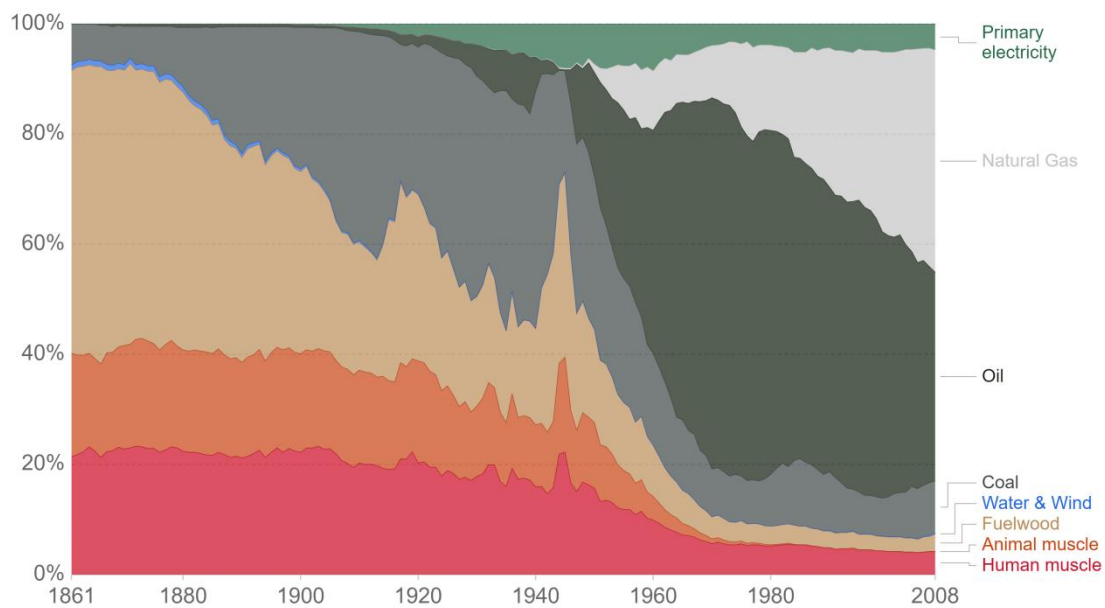


Πηγή : BP Statistical Review of World Energy

1.2 Μακροχρόνιες ενεργειακές μεταβολές

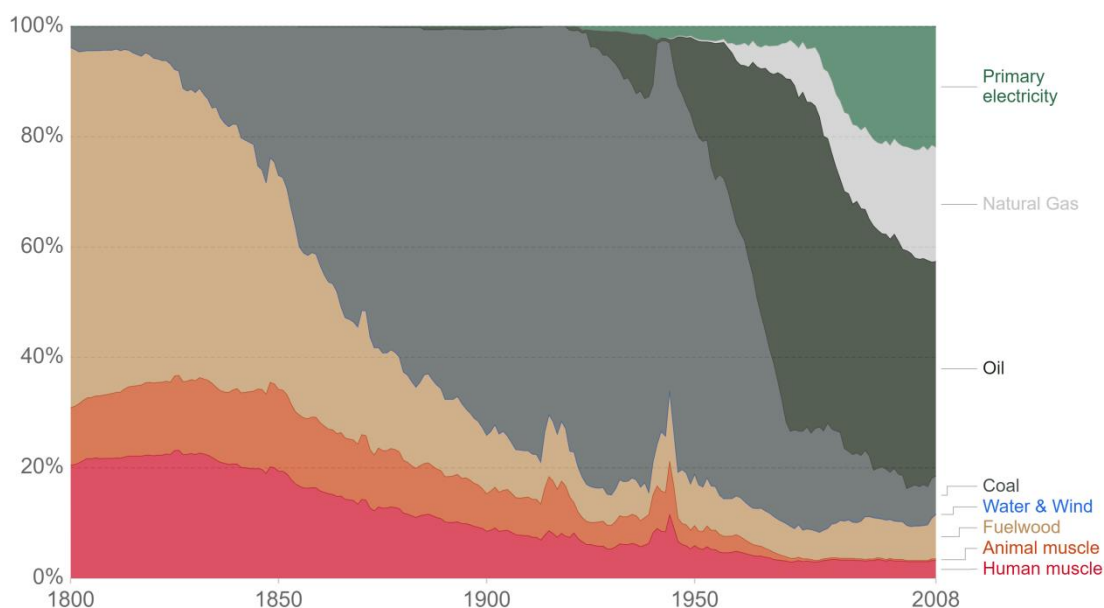
Ενώ οι περισσότεροι άνθρωποι συνδέουν την παραγωγή ενέργειας με τη χρήση γαιανθράκων, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε πως έχουν αντικαταστήσει τα σύγχρονα καύσιμα τις παλαιότερες πηγές ενέργειας, λαμβάνοντας μια μακροπρόθεσμη οπτική για την εξέλιξη των ανθρώπινων ενεργειακών συστημάτων. Στο γράφημα βλέπουμε μακροπρόθεσμες τάσεις στις ενεργειακές μεταβάσεις στην Ιταλία και την Γαλλία.^[1]

Γράφημα 5 : Μακροπρόθεσμες ενεργειακές μεταβολές στην Ιταλία



Πηγή : Joint Center for History and Economic, Harvard University and University of Cambridge. Energy History

Γράφημα 6 : Μακροπρόθεσμες ενεργειακές μεταβολές στην Γαλλία



Πηγή : Joint Center for History and Economic, Harvard University and University of Cambridge. Energy History

Στα παρακάτω γραφήματα 7 και στο χάρτη 1, παρατηρούμε τις τάσεις στην κατά κεφαλήν χρήση ενέργειας από το 1960-2019. Αυτό περιλαμβάνει όλες τις διαστάσεις της ενέργειας (ηλεκτρική ενέργεια συν μεταφορά και θέρμανση), και όχι μόνο αποκλειστικά την ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν πολλά σημαντικά σημεία που πρέπει να σημειωθούν. Πρώτον, η παγκόσμια μέση κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται σταθερά μεταξύ 1970-2014, κατά περίπου 45%

Ωστόσο, αυτή η αύξηση της κατά κεφαλήν κατανάλωσης ενέργειας ποικίλλει σημαντικά μεταξύ χωρών και περιοχών. Το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης των τελευταίων δεκαετιών οφείλεται στην αύξηση της κατανάλωσης των χωρών του μεσαίου εισοδήματος (και σε μικρότερο βαθμό, των χωρών με χαμηλό εισόδημα). Στο γράφημα βλέπουμε μια σημαντική αύξηση της κατανάλωσης κατά τη μετάβαση των οικονομιών BRICS¹ (συγκεκριμένα της Κίνας, Ινδίας και της Βραζιλίας). Η κατά κεφαλήν χρήση της Κίνας έχει αυξηθεί κατά σχεδόν 250% από το 2000. Της Ινδίας κατά περισσότερο από 50% και της Βραζιλίας κατά 38%

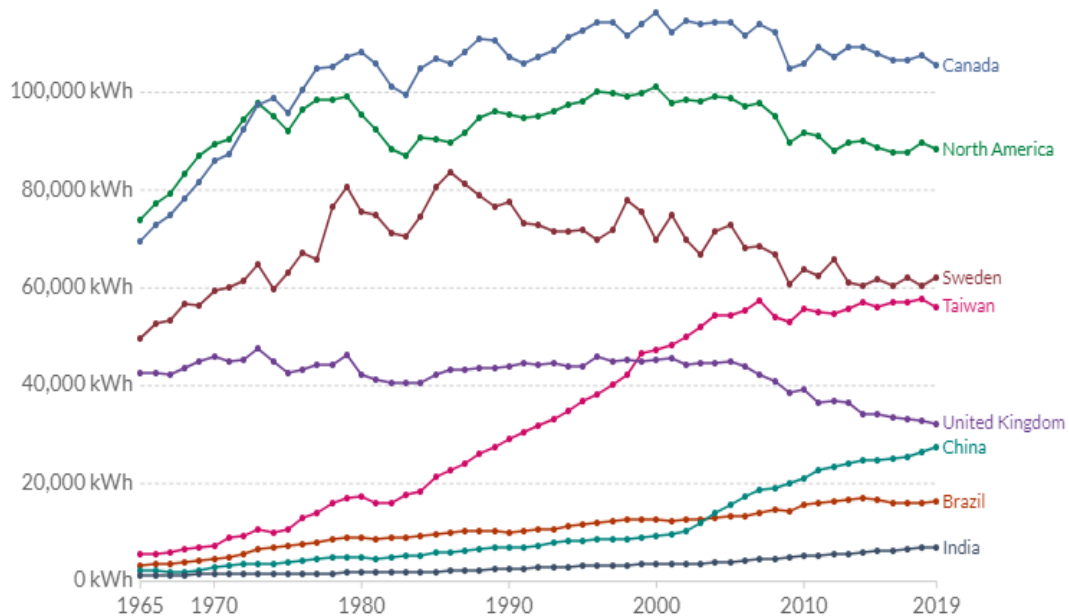
Ενώ η παγκόσμια αύξηση της ενέργειας αυξάνεται από τις αναπτυσσόμενες οικονομίες, η τάση για πολλές χώρες υψηλού εισοδήματος υπέστη μία αξιοσημείωτη πτώση. Όπως παρατηρούμε στο Ηνωμένο Βασίλειο και τις ΗΠΑ, η ανάπτυξη για πολλά έθνη υψηλού εισοδήματος έληξε κατά την περίοδο 1970-80. Τόσο οι ΗΠΑ όσο και το Ηνωμένο Βασίλειο η κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας κορυφώθηκε στη δεκαετία του 1970, όπου για αρκετές δεκαετίες έως τις αρχές της δεκαετίας του 2000 ήταν από τις πρωτοπόρες. Από τότε, παρατηρείται μείωση της κατανάλωσης, της τάξης 20-25%.

Παρά αυτή τη μείωση στις χώρες με υψηλό εισόδημα, εξακολουθούν να υπάρχουν μεγάλες παγκόσμιες ανισότητες. Ο μέσος πολίτης των ΗΠΑ εξακολουθεί να καταναλώνει

¹ BRIC: είναι ένας διεθνής πολιτικός οργανισμός των κορυφαίων αναδυόμενων αγορών, που αποτελείται από πέντε χώρες, Βραζιλία, Ρωσία, Ινδία, Κίνα και Νότια Αφρική.

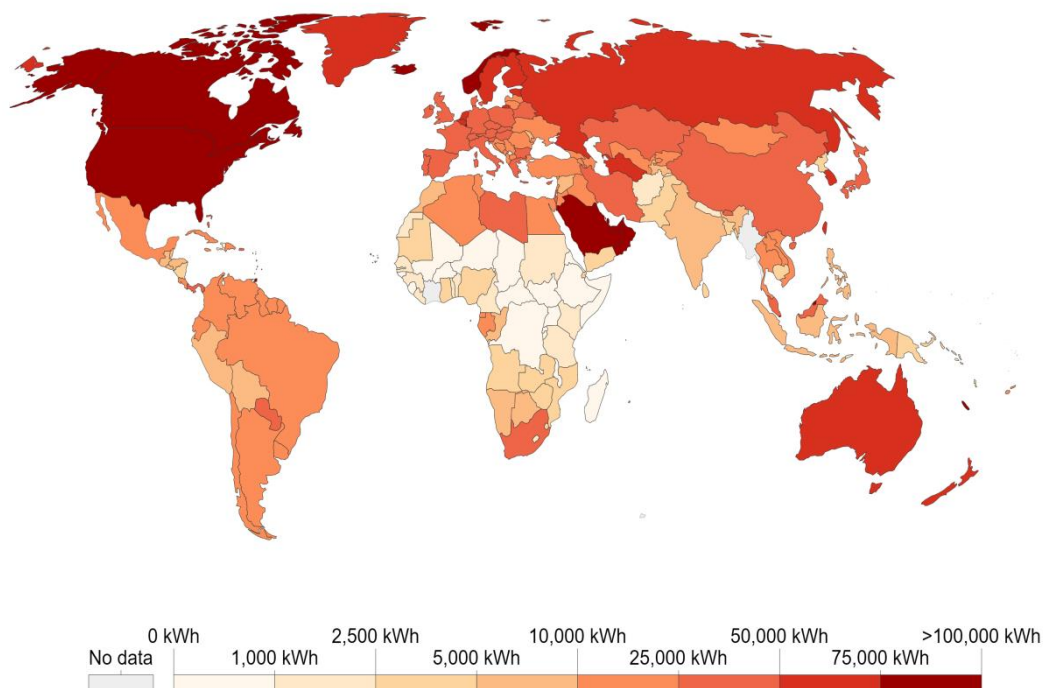
περισσότερο από δέκα φορές της ενέργειας ενός μέσου Ινδού, 4-5 φορές ενός Βραζιλιάνου και τρεις φορές περισσότερο ενός Κινέζου. Το χάσμα μεταξύ αυτών των χωρών και των χωρών με χαμηλό εισόδημα είναι ακόμη μεγαλύτερο.

Γράφημα 7 : Κατά κεφαλήν ενεργειακή κατανάλωση



Πηγή : Our World in Data based on BP & Shift Data Portal

Χάρτης 1 : Κατά κεφαλή ενεργειακή κατανάλωση, 2019



Πηγή : Our World in Data based on BP & Shift Data Portal

1.3 Ενεργειακή ένταση των οικονομιών

Εάν θέλουμε να αναπτυχθεί η οικονομία, να αυξηθεί το επίπεδο ευημερίας και να εξαλειφτεί η φτώχεια, με την σωστή και αποτελεσματική διαχείριση των ενεργειακών πόρων (και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου), η «ένταση της ενέργειας» γίνεται μια σημαντική παράμετρος για την επίτευξη αυτής της προόδου.

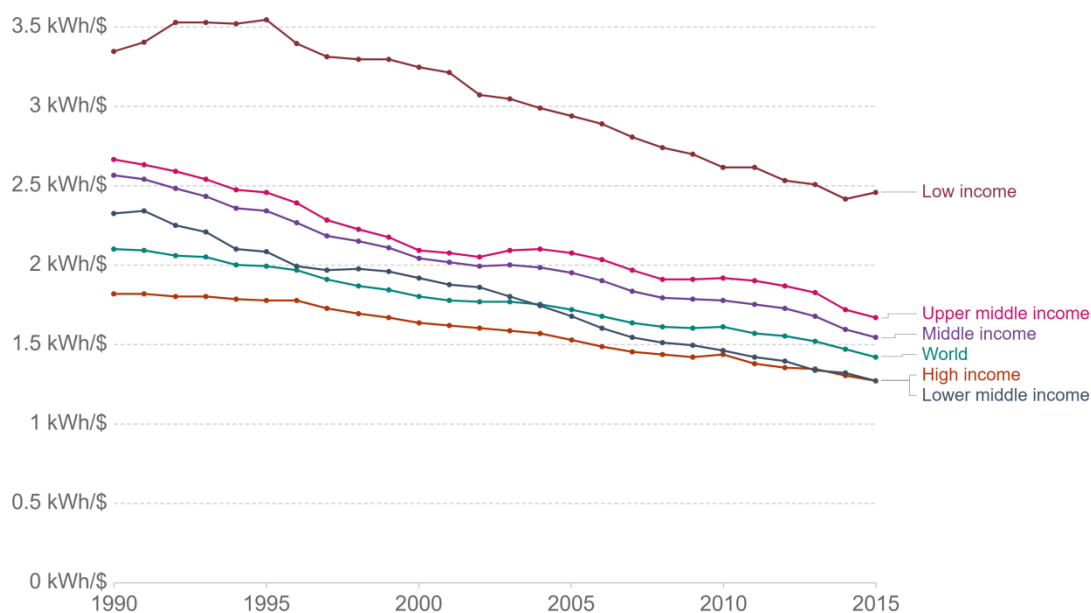
Η ενεργειακή ένταση μετρά την ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή μίας μονάδας ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος (ΑΕΠ). Συνήθως μετράται σε κιλοβατώρες ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή ενός δολαρίου (kWh ανά δολάριο). Είναι ουσιαστικά ένα μέτρο της ενεργειακής απόδοσης των οικονομιών: στόχος είναι να επιτυγχάνουμε οικονομική ανάπτυξη με όσο το δυνατόν χαμηλότερη εισροή ενέργειας.

Στο παρακάτω γράφημα (8), παρατηρούμε πως η ενεργειακή ένταση των οικονομιών έχει αλλάξει από το 1990. Παρατηρούμε μία πτωτική τάση σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς και σε όλα τα επίπεδα εισοδήματος.

Το 1990, ως παγκόσμιος μέσος όρος, χρειαζόταν 2,1 kWh ενέργειας για την παραγωγή ενός δολαρίου, το 2014 μειώθηκε στις 1,5kWh. Αυτό αντιπροσωπεύει μείωση 30%. Τα κέρδη της απόδοσης έχουν παρατηρηθεί σε όλα τα επίπεδα εισοδήματος. Οι οικονομίες υψηλού εισοδήματος έχουν συνήθως την χαμηλότερη ενεργειακή ένταση (δηλαδή είναι ενεργειακά πιο αποδοτικές ανά μονάδα προϊόντος) και υπάρχει μεγάλο κενό απόδοσης μεταξύ των χωρών με χαμηλότερο εισόδημα και του υπόλοιπου κόσμου.

Γράφημα 8 : Ενεργειακή ένταση των οικονομιών

Το επίπεδο έντασης ενέργειας της πρωτογενούς ενέργειας είναι ο λόγος μεταξύ του ενεργειακού εφοδιασμού και του ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος που μετράται στην ισοτιμία αγοραστικής δύναμης. Η ένταση της ενέργειας είναι μια ένδειξη για το πόση ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή μιας μονάδας προϊόντος. Η χαμηλότερη αναλογία δείχνει ότι χρησιμοποιείται λιγότερη ενέργεια για την παραγωγή μιας μονάδας προϊόντος.



Πηγή : World Bank, Sustainable Energy for All

1.4 Αποκαρβονισμός

Για να καταφέρουμε να μειώσουμε τις παγκόσμιες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, ο κόσμος πρέπει να μεταβεί από ένα ενεργειακό σύστημα που κυριαρχείται από ορυκτά καύσιμα σε ένα με χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (οι περισσότερες χώρες έχουν θέσει μακροπρόθεσμους στόχους προς επίτευξη, στο πλαίσιο της συμφωνίας του Παρισιού για το κλίμα) ^[2]

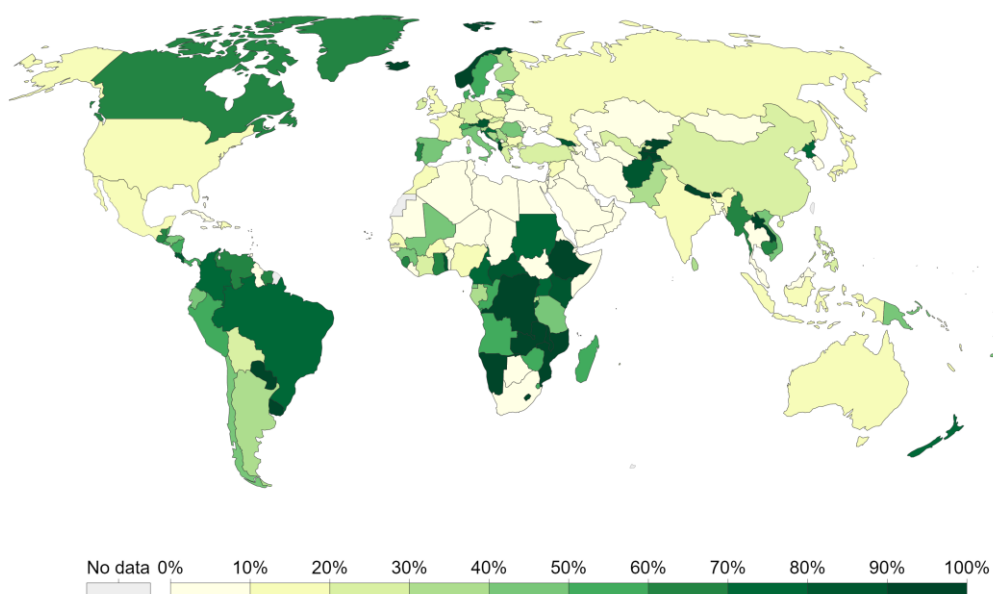
Με εξαίρεση την γεωλογική αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα, που είναι ένα βασικό τμήμα της τεχνολογίας της δέσμευσης και αποθήκευσης του άνθρακα (Carbon Capture and Storage, CCS) (που περιγράφεται αργότερα), έχουμε δύο επιλογές για να το επιτύχουμε: ανανεώσιμες τεχνολογίες (συμπεριλαμβανομένης της βιοενέργειας, της υδροηλεκτρικής ενέργειας, της ηλιακής, της αιολικής, της γεωθερμικής και της θαλάσσιας ενέργειας) και της πυρηνικής ενέργειας. Και οι δύο αυτές επιλογές παράγουν πολύ χαμηλές εκπομπές CO₂ ανά μονάδα ενέργειας σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα.

Η πρόοδος μας την τελευταία δεκαετία παρουσιάζει μια ενδιαφέρουσα ιστορία η οποία καλύπτεται παρακάτω. Στα παρακάτω τρία γραφήματα (9, 10,11) και στον χάρτη 2 φαίνονται τα μερίδια των ανανεώσιμων πηγών, πυρηνικών και ορυκτών καυσίμων στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Την τελευταία δεκαετία (2005-2015) το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε κατά περίπου 5-6 % . Ωστόσο, κατά την ίδια περίοδο, το μερίδιο από την πυρηνική παραγωγή μειώθηκε κατά σχεδόν το ίδιο ποσοστό (5-6 %). Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι το συνολικό μερίδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα είναι σχεδόν το ίδιο με μια δεκαετία πριν (όπως φαίνεται και στο διάγραμμα). Στην πραγματικότητα, αν συγκρίνουμε το μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από πηγές χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (ανανεώσιμες πηγές και πυρηνικά) του 2015 με αυτό του 1990, βλέπουμε ότι έχει μειωθεί κατά περίπου 3 τοις εκατό. Η πρόοδος στον τομέα της απελευθέρωσης του άνθρακα έχει σταματήσει την τελευταία δεκαετία ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης αποστροφής στην πυρηνική ενέργεια.

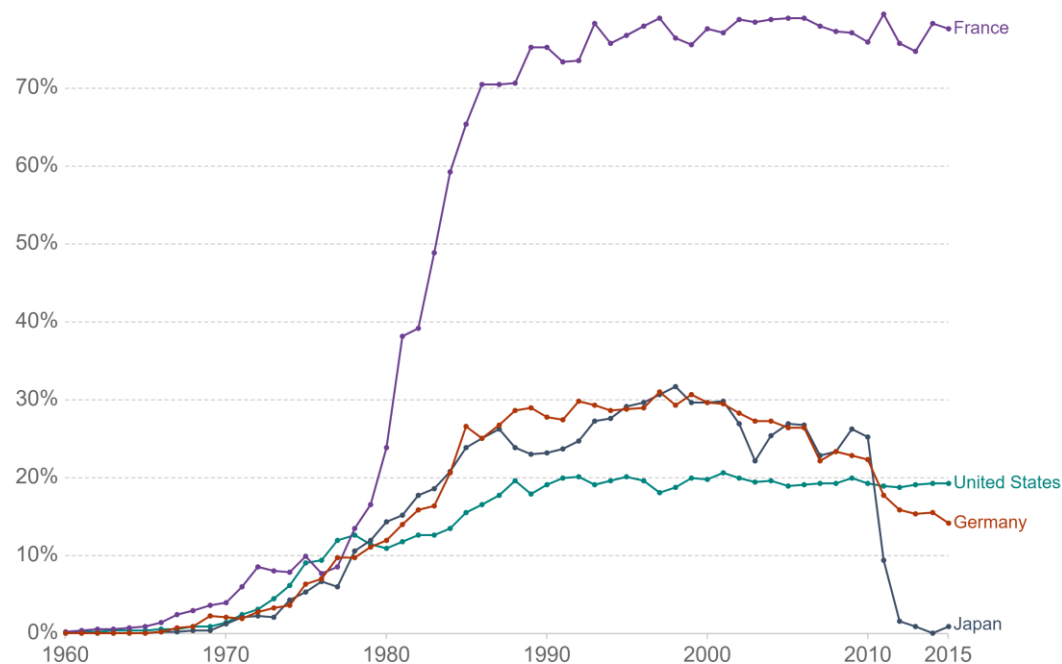
Το τελικό διάγραμμα 11 παρέχει μια ανάλυση των πηγών ορυκτών καυσίμων στο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας μας. Από το 2005, το φυσικό αέριο και ο άνθρακας έχουν αυξήσει το μερίδιό τους κατά ένα και δύο τοις εκατό, αντίστοιχα, ενώ η συμβολή του πετρελαίου έχει μειωθεί κατά δύο τοις εκατό. Ωστόσο, συνολικά, ο σχετικός συνδυασμός πηγών ηλεκτρικής ενέργειας έχει αλλάξει πολύ λίγο τις τελευταίες δεκαετίες.

Χάρης 2: Ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας , 2014



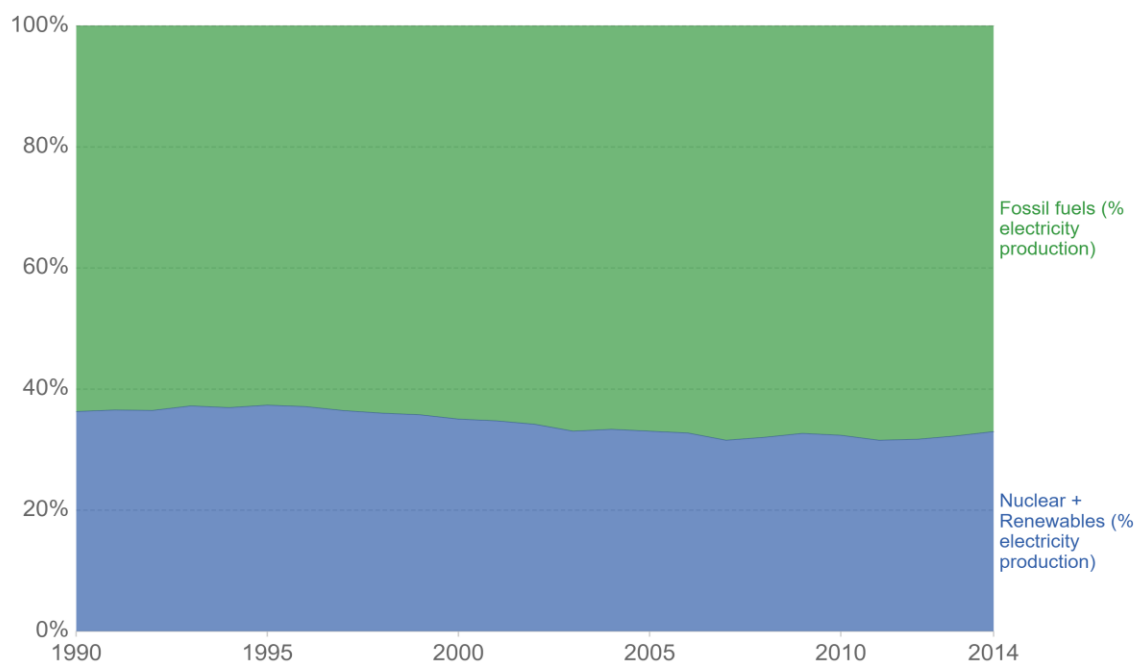
Πηγή : World Bank, Sustainable Energy for All

Γράφημα 9 : Ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνική ενέργεια



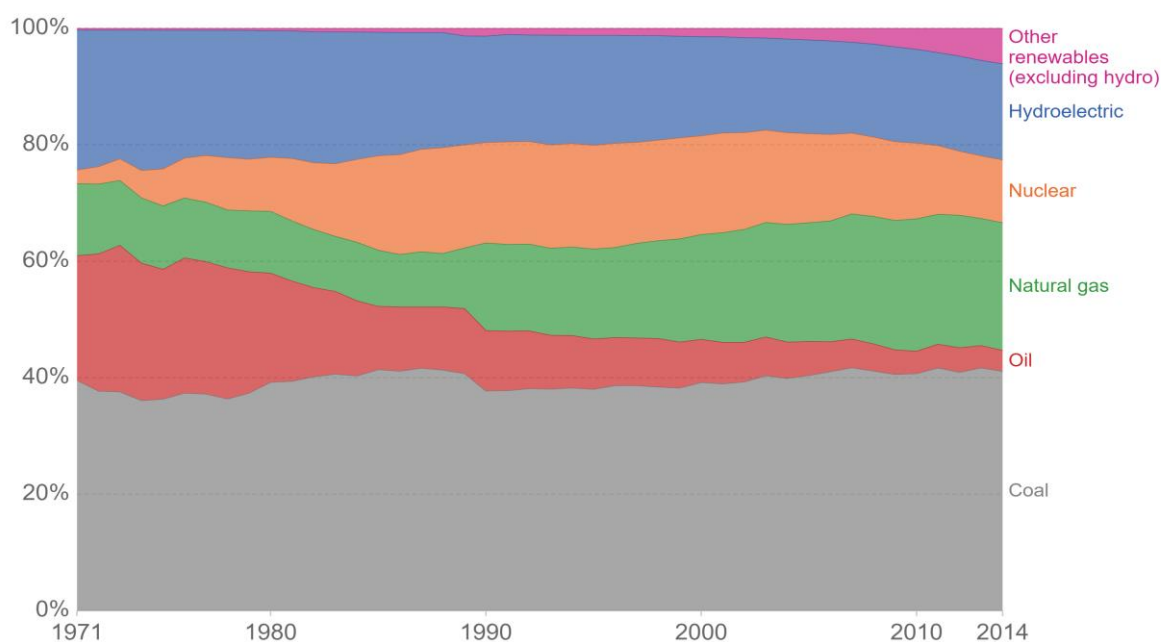
Πηγή : International Energy Agency (IEA) via The World Bank

Γράφημα 10 : Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά πηγή



Πηγή : International Energy Agency (IEA) via The World Bank

Γράφημα 11 : Ποσοστό ηλεκτρική ενέργειας ανά πηγή καυσίμου



Πηγή : International Energy Agency (IEA) via The World Bank

1.5 Παγκόσμιο ενεργειακό εμπόριο

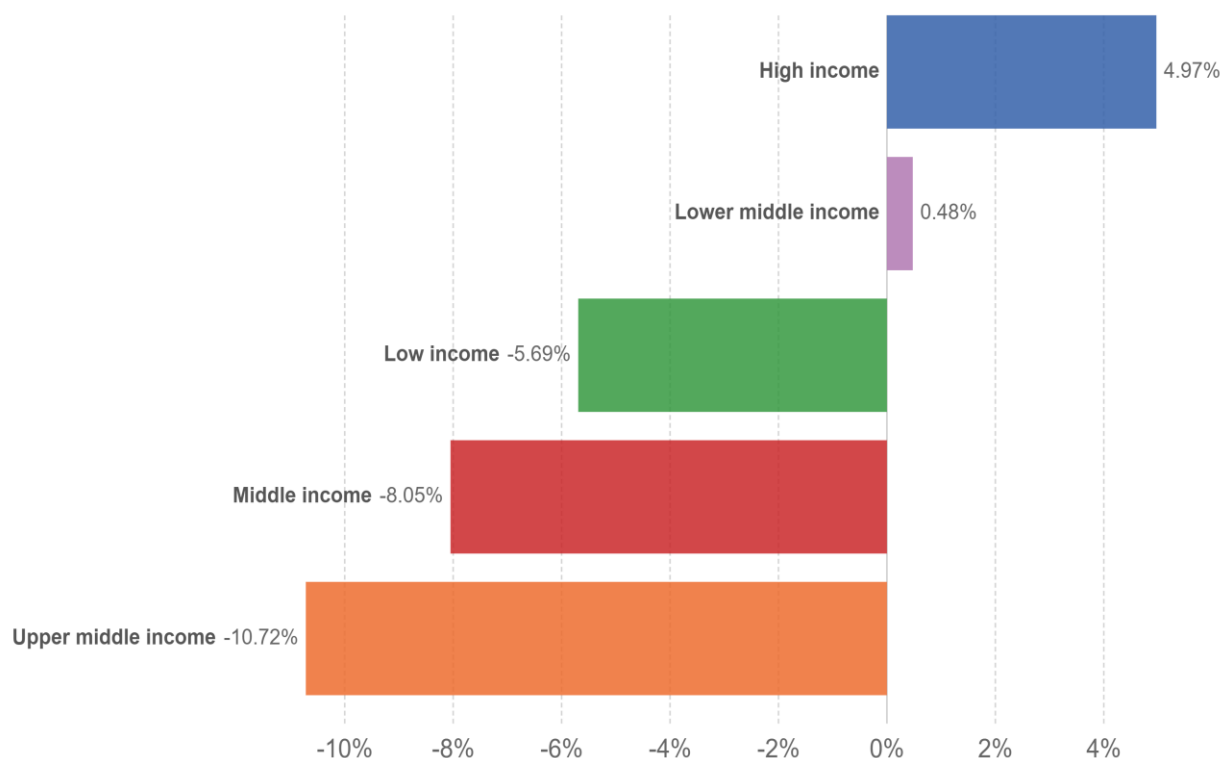
Η κατανομή των ενεργειακών πόρων μπορεί να έχει μεγάλη επίπτωση στο εμπόριο ενέργειας σε όλο τον κόσμο. Ένας σημαντικός παράγοντας στο εμπόριο ενέργειας είναι τα εγχώρια επίπεδα κατανάλωσης. Εάν μια χώρα πλούσια σε πόρους, έχει υψηλά εγχώρια επίπεδα κατανάλωσης, μπορεί να έχει λίγη ενέργεια για εξαγωγή. Ομοίως, εάν μια χώρα έχει χαμηλά επίπεδα κατανάλωσης, μπορεί να είναι μεγάλος εξαγωγέας ενέργειας παρά τα σχετικά χαμηλά επίπεδα φυσικών πόρων. Άλλες επιρροές που μπορεί να επηρεάζουν το εμπόριο ενέργειας μπορεί να είναι γεωπολιτικές: για παράδειγμα, ορισμένες χώρες μπορεί να θέλουν να προμηθεύονται πόρους καυσίμων για να διατηρήσουν τα επίπεδα ενεργειακής ασφάλειας και στο μέλλον.

Στο παρακάτω γράφημα έχουν καταγραφεί οι εισαγωγές και οι εξαγωγές ενέργειας, ανά επίπεδο εισοδήματος και ανά χώρα. Εδώ μετριοούνται οι εισαγωγές και οι εξαγωγές ενέργειας ως ποσοστό της εγχώριας χρήσης ενέργειας, όπου ένα θετικό ποσοστό δείχνει ότι μια χώρα ή περιοχή είναι καθαρός εισαγωγέας ενέργειας, ενώ το αρνητικό ποσοστό δείχνει ότι είναι καθαρός εξαγωγέας. Για παράδειγμα, οι χώρες με υψηλό εισόδημα το 2014 εισήγαγαν σχεδόν το 5% της καταναλωθείσας ενέργειας.

Όσον αφορά το επίπεδο εισοδήματος, βλέπουμε ότι υπάρχει μια ξεχωριστή ροή ενεργειακών πόρων από χαμηλό, μεσαίο και ανώτερο μεσαίο εισόδημα προς χώρες με υψηλό εισόδημα (με εξαίρεση το χαμηλότερο μεσαίο εισόδημα). Σε ηπειρωτική βάση, βλέπουμε την κυριαρχία των εξαγωγών ενέργειας από τη Μέση Ανατολή και τη Βόρεια Αφρική (ως καθαρός

εξαγωγέας του 127% των επιπέδων κατανάλωσης). Είναι ενδιαφέρον ότι η Υποσαχάρια Αφρική είναι επίσης καθαρός εξαγωγέας ενέργειας (παρά το ότι έχει χαμηλά επίπεδα αποθεμάτων και μόνο μέτρια επίπεδα πετρελαίου και φυσικού αερίου) - αυτό είναι πιθανότατα αποτέλεσμα των χαμηλών επιπέδων εγχώριας κατανάλωσης. Η Βόρεια Αμερική και η Ευρώπη και η Κεντρική Ασία φτάνουν περίπου την ενεργειακή ισοτιμία (εξισορροπώντας αποτελεσματικά την κατανάλωση με το εμπόριο). Η Νότια Ασία είναι καθαρός εισαγωγέας ενέργειας, εισάγοντας περίπου το ένα τρίτο της κατανάλωσης ενέργειας.

Γράφημα 12 : Εισαγωγές και εξαγωγές ενέργειας, 2014



Πηγή : International Energy Agency (IEA) via The World Bank

Πίνακας 1 Εισαγωγές και εξαγωγές ανα χώρα

Albania	13.80%
Algeria	-177.12%
Angola	-541.00%
Australia	-192.02%
Austria	62.42%
Azerbaijan	-310.38%
Bahrain	-61.58%
Bangladesh	16.84%
Belarus	86.78%
Belgium	76.26%
Benin	46.59%
Bolivia	-177.99%
Bosnia and Herzegovina	22.73%
Botswana	44.50%
Brazil	11.87%
Brunei	-357.39%
Bulgaria	36.55%
Cambodia	33.12%
Cameroon	-28.32%
Canada	-67.93%
Chile	64.20%

China	15.02%
Colombia	-274.13%
Congo	-496.60%
Costa Rica	49.83%
Cote d'Ivoire	7.08%
Croatia	45.86%
Cuba	49.78%
Curacao	99.86%
Cyprus	94.03%
Czechia	28.99%
Democratic Republic of Congo	1.96%
Denmark	0.94%
Dominican Republic	86.72%
East Asia & Pacific	17.36%
Ecuador	-114.71%
Egypt	-7.39%
El Salvador	49.24%
Eritrea	22.27%
Estonia	3.40%
Ethiopia	5.93%
Europe & Central Asia	0.59%
Finland	46.20%

France	43.49%
Gabon	-213.40%
Georgia	68.75%
Germany	60.88%
Ghana	-8.19%
Gibraltar	100.00%
Greece	61.97%
Guatemala	32.84%
Haiti	22.02%
High income	4.97%
Honduras	53.00%
Hong Kong	98.68%
Hungary	55.61%
Iceland	10.96%
India	34.31%
Indonesia	-103.09%
Iran	-33.40%
Iraq	-229.39%
Ireland	84.26%
Israel	67.05%
Italy	75.00%
Jamaica	82.04%

Japan	93.98%
Jordan	96.81%
Kazakhstan	-116.89%
Kenya	17.17%
Kosovo	27.39%
Kuwait	-391.06%
Kyrgyzstan	49.54%
Latin America & Caribbean	-8.09%
Latvia	45.16%
Lebanon	97.87%
Libya	-102.96%
Lithuania	75.04%
Low income	-5.69%
Lower middle income	0.48%
Luxembourg	96.00%
Malaysia	-5.51%
Malta	98.38%
Mauritius	84.54%
Mexico	-10.79%
Middle East & North Africa	-126.97%
Middle income	-8.05%
Moldova	90.01%

Mongolia	-168.09%
Montenegro	27.57%
Morocco	90.72%
Mozambique	-54.60%
Myanmar	-32.97%
Namibia	74.44%
Nepal	16.68%
Netherlands	19.77%
New Zealand	17.08%
Nicaragua	40.86%
Niger	-5.81%
Nigeria	-93.03%
North America	0.56%
North Korea	-74.75%
North Macedonia	51.77%
Norway	-582.90%
Oman	-206.19%
Pakistan	24.12%
Panama	80.90%
Paraguay	-36.94%
Peru	-14.90%
Philippines	45.77%

Poland	28.39%
Portugal	71.67%
Qatar	-398.99%
Romania	16.78%
Russia	-83.67%
Saudi Arabia	-191.52%
Senegal	52.69%
Serbia	28.78%
Singapore	97.68%
South Africa	-14.48%
South Asia	32.69%
South Korea	81.70%
South Sudan	-1,058.12%
Spain	69.36%
Sri Lanka	50.27%
Sub-Saharan Africa	-48.80%
Sudan	-8.99%
Suriname	-43.76%
Sweden	28.27%
Switzerland	47.05%
Syria	47.83%
Tajikistan	36.25%

Tanzania	10.73%
Thailand	41.57%
Togo	19.97%
Trinidad and Tobago	-102.66%
Tunisia	36.20%
Turkey	74.21%
Turkmenistan	-191.51%
Ukraine	27.21%
United Arab Emirates	-183.84%
United Kingdom	39.67%
United States	9.21%
Upper middle income	-10.72%
Uruguay	44.43%

1.6 Η χρήση ενέργειας συνδέεται στενά με την οικονομική ανάπτυξη και την εξάλειψη της φτώχειας

Η ενέργεια μπορεί να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο σε ένα παγκόσμιο αναπτυξιακό πλαίσιο. Το δυναμικό της ενέργειας για τη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου έγκειται, είτε μέσω της απελευθέρωσης του χρόνου από τις οικιακές δουλειές, (για παράδειγμα, πλύσιμο ρούχων ή μαγείρεμα) είτε στην αυξημένη παραγωγικότητα και τις βελτιωμένες υπηρεσίες υγειονομικής περίθαλψης και εκπαίδευσης, ή ψηφιακές συνδέσεις με τοπικά, περιφερειακά και παγκόσμια δίκτυα.

Η σχέση μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της οικονομικής ανάπτυξης υπήρξε θέμα ευρείας συζήτησης. Ένας μεγάλος αριθμός μελετών προσπάθησαν να αντλήσουν την αιτιώδη σχέση μεταξύ της κατανάλωσης ενέργειας και της οικονομικής ανάπτυξης, ωστόσο δεν προέκυψε σαφής σύνδεση^[3]

Αυτό μπορεί εν μέρει να αποδοθεί στο γεγονός ότι η σχέση μεταξύ ενέργειας και ευημερίας δεν είναι πάντα μονόδρομοι. Η απόκτηση πρόσβασης στην ηλεκτρική ενέργεια και σε άλλες πηγές ενέργειας μπορεί να προσφέρει μια αρχική αύξηση του ΑΕΠ, αλλά η αύξηση του ΑΕΠ μπορεί με τη σειρά της να οδηγήσει σε υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, η πρόοδος στα αποτελέσματα ανάπτυξης μπορεί να είναι περίπλοκη: ορισμένες παράμετροι μπορεί να βελτιώνονται ταυτόχρονα. Εάν, για παράδειγμα, η πρόσβαση και η κατανάλωση ενέργειας, η διατροφή, η εκπαίδευση, η υγεία και η υγιεινή βελτιώνονται ταυτόχρονα (και έχουν πολύπλοκες σχέσεις μεταξύ τους), μπορεί να είναι δύσκολο να αποδοθεί άμεσα η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου πίσω σε μία μόνο παράμετρο.

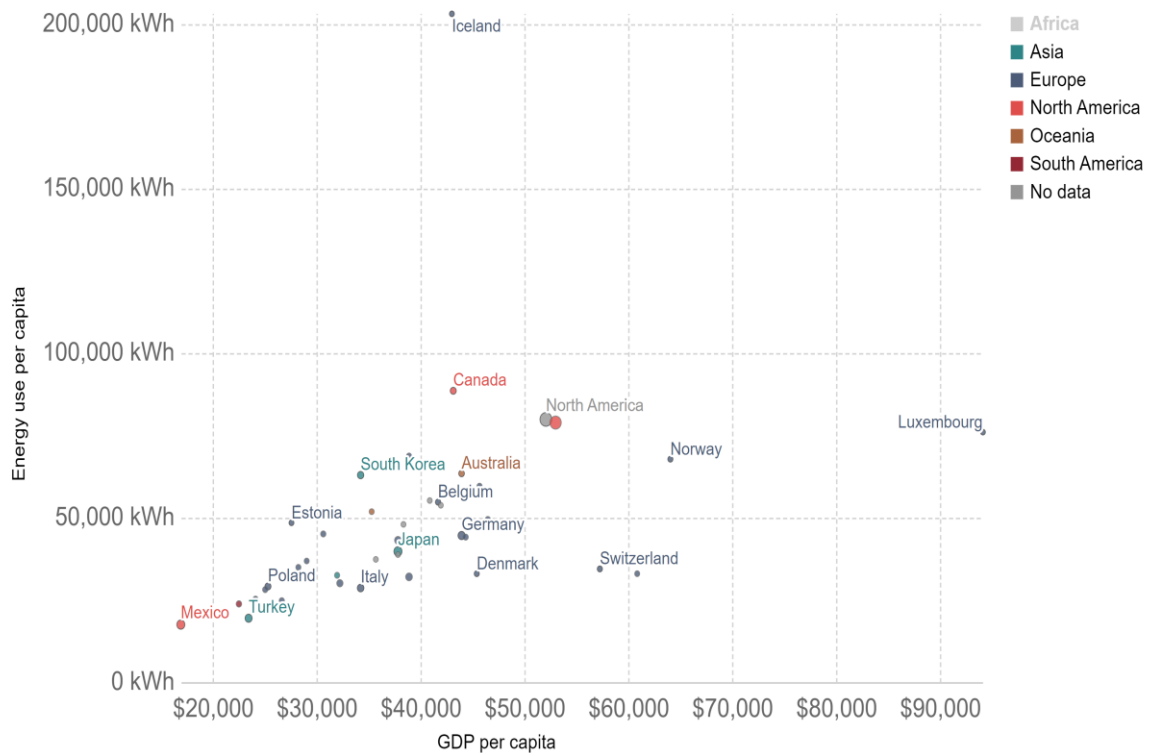
Στην βιβλιογραφία αναφέρονται δύο μελετητές, ο Chontanawat et al. (2008) και ο Akinlo (2008) οι οποίοι διεξήγαγαν μια μελέτη σε 100 χώρες για να προσπαθήσουν να επιτύχουν μια κοινή συσχέτιση μεταξύ ενέργειας και ΑΕΠ.^{[4][5]}

Κανένας τους δεν βρήκε αιτιώδη σχέση που να ισχύει σε όλα τα επίπεδα. Για ορισμένες χώρες, η σχέση ήταν μονόδρομη (η κατανάλωση ενέργειας ήταν άμεση και μακροπρόθεσμη κινητήρια δύναμη της οικονομικής ανάπτυξης), ενώ σε άλλες ήταν αμφίδρομη. Μερικές συνενώνονται με άλλους παράγοντες και για ορισμένες δεν υπήρχε σαφής σχέση μεταξύ των δύο. Ωστόσο, για τις περισσότερες χώρες, υπάρχει μια σημαντική σχέση μεταξύ ενέργειας και ευημερίας. Ωστόσο, η ακριβής δυναμική είναι περίπλοκη και εξαρτάται από το περιβάλλον.

Στο παρακάτω πρώτο διάγραμμα έχουν σχεδιαστεί η κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας (στον άξονα y) έναντι του κατά κεφαλήν ΑΕΠ (προσαρμοσμένο σε αγοραστική δύναμη) (στον άξονα x) για το έτος 2015. Πράγματι, βλέπουμε μια ισχυρή τάση: συνήθως όσο υψηλότερο είναι το εισόδημα μία χώρας, τόσο περισσότερη ενέργεια καταναλώνει. Στο δεύτερο διάγραμμα παρουσιάζουμε το ποσοστό του πληθυσμού με πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια (άξονας y) έναντι του κατά κεφαλήν ΑΕΠ (άξονας x). Πάλι βλέπουμε μια παρόμοια τάση: τόσο η πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια όσο και η ευημερία αυξάνονται για τις περισσότερες χώρες με την πάροδο του χρόνου. Ωστόσο, και στις δύο αυτές απεικονίσεις, είναι δύσκολο να διαφοροποιήσουμε πόση από αυτή την τάση μπορεί να εξηγηθεί από την ανάπτυξη που βασίζεται στην ενέργεια και πόσο είναι το αποτέλεσμα της κατανάλωσης ενέργειας που καθοδηγείται από την ανάπτυξη.

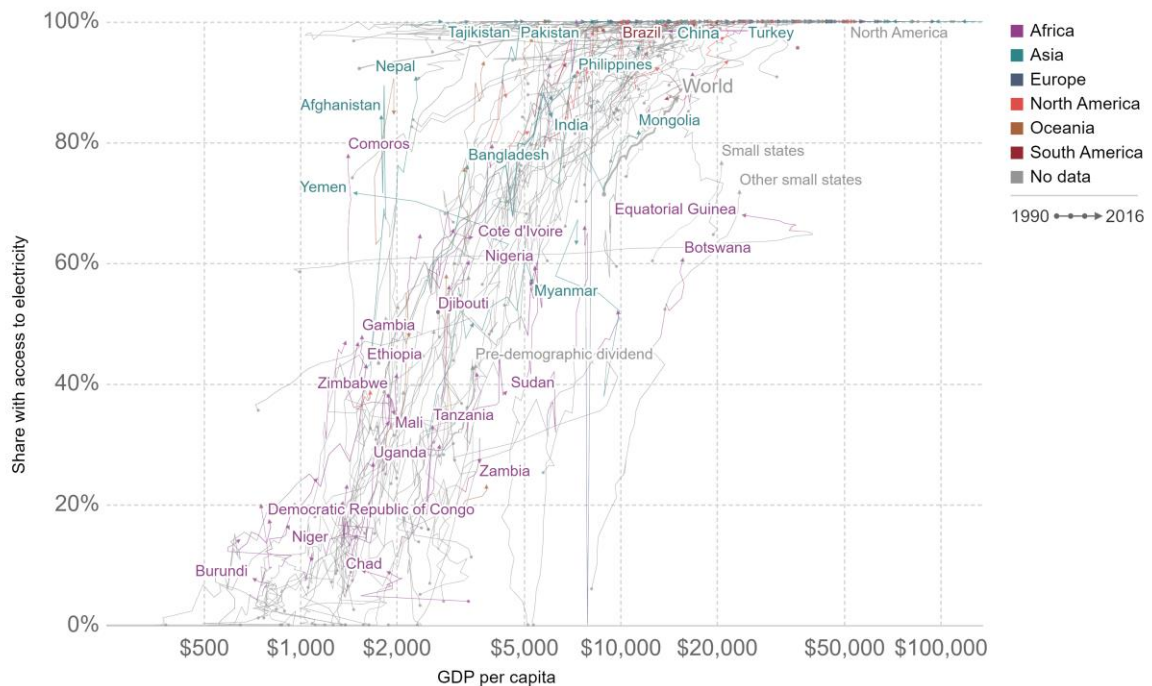
Στο τελικό μας γράφημα (13) σχεδιαστική η σχέση μεταξύ της κατά κεφαλήν κατανάλωσης ενέργειας (άξονας y) και του μεριδίου του πληθυσμού σε ακραία φτώχεια (άξονας x). Γενικά, βλέπουμε μια τάση μείωσης της φτώχειας με υψηλότερα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει απαραίτητα ως άμεση σχέση για όλες τις χώρες.

Διάγραμμα 1 : Κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας έναντι κατά κεφαλήν ΑΕΠ , 2015



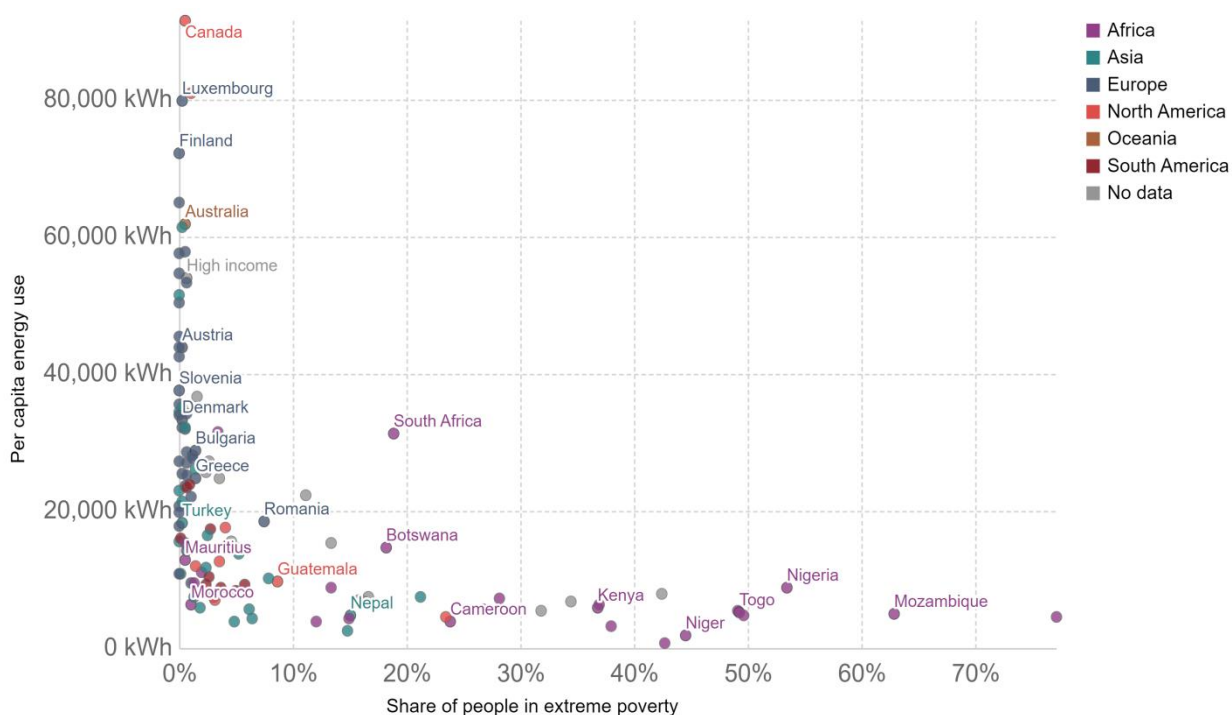
Πηγή : International Energy Agency (IEA) via The World Bank

Διάγραμμα 2 : Πρόσβαση σε ηλεκτρικό ρεύμα έναντι κατά κεφαλήν ΑΕΠ, 1990-2016



Πηγή : The World Bank – World Development Indicators (WDI)

Γράφημα 13 : Κατά κεφαλήν χρήση ενέργειας έναντι μεριδίου του πληθυσμού σε ακραία φτώχεια



Πηγή : International Energy Agency (IEA) via The World Bank

1.7 Σχετικό κόστος πηγών ενέργειας

Οι τιμές μπορούν να επηρεάσουν έντονα την επιλογή των πηγών ενέργειας μίας χώρας. Από αυτήν την άποψη, είναι σημαντικό το σχετικό κόστος μεταξύ πηγών. Αυτό ισχύει στις χώρες με υψηλότερο εισόδημα, αλλά είναι όλο και πιο σημαντικός παράγοντας στις οικονομίες χαμηλού και μεσαίου εισοδήματος. Για πολλές χώρες, η αύξηση του μεριδίου του πληθυσμού με πρόσβαση σε ηλεκτρικό ρεύμα αποτελεί βασική προτεραιότητα και για να γίνει αυτό είναι απαραίτητο η ενέργεια να είναι χαμηλού κόστους.

Η σύγκριση σχετικού κόστους ενέργειας γίνεται με τον εξής τρόπο. Η κυρίαρχη πηγή ενέργειας στον τομέα των μεταφορών είναι τα υγρά καύσιμα (ντίζελ και βενζίνη) για τα οποία το σχετικό κόστος είναι λιγότερο σημαντικό και εμφανίζει μικρές μεταβολές τιμών με την πάροδο του χρόνου. Έτσι θα επικεντρωθούμε στο σχετικό κόστος των πηγών ενέργειας στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας.

Για να γίνει αυτό, συγκρίνουμε το κόστος με βάση αυτό που αποκαλούμε «ασοπεδωμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας» (LCOE). Το LCOE προσπαθεί να παρέχει μια ολοκληρωμένη σύγκριση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των πηγών, λαμβάνοντας υπόψη το πλήρες κόστος του κύκλου ζωής. Υπολογίζεται διαιρώντας το μέσο συνολικό κόστος

κατασκευής και λειτουργίας του εργοστασίου (δηλαδή τόσο το κεφάλαιο όσο και το λειτουργικό κόστος) με τη συνολική ενεργειακή απόδοση κατά τη διάρκεια της ζωής του. Αυτό μας δίνει ένα μέτρο του μέσου συνολικού κόστους ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η μέτρηση των πηγών σε αυτή τη σταθερή βάση επιχειρεί να εξηγήσει το γεγονός ότι οι πόροι διαφέρουν ως προς το κεφάλαιο και το λειτουργικό τους κόστος (για παράδειγμα, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να έχει υψηλότερο κόστος κεφαλαίου, αλλά χαμηλότερο λειτουργικό κόστος σε σχέση με τον άνθρακα με την πάροδο του χρόνου). Σημαντική λεπτομέρεια είναι, ότι αυτό το κόστος παραγωγής ενέργειας έχει προφανή επίπτωση στις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας για τον καταναλωτή: το LCOE αντιπροσωπεύει το ελάχιστο κόστος που οι παραγωγοί θα έπρεπε να χρεώσουν στους καταναλωτές για να φτάσουν το νεκρό σημείο του ενεργειακού έργου.^{[6][7]}

$$LCOE = \frac{\text{Άθροισμα του συνολικού κόστους καθ' όλη την διάρκεια ζωής}}{\text{Άθροισμα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας καθ' όλη την διάρκεια ζωής}}$$

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

I_t = επενδυτικές δαπάνες κατά το έτος t

M_t = δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης κατά το έτος t

F_t = δαπάνες καυσίμων κατά το έτος t

E_t = ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται το έτος t

r = επιτόκιο

n = αναμενόμενος χρόνος ζωής του έργου

Για να είναι πραγματικά ανταγωνιστικές, οι ανανεώσιμες πηγές θα πρέπει να είναι ανταγωνιστικές ως προς το κόστος με τις πηγές ορυκτών καυσίμων. Στο γράφημα, που ακολουθεί από την τελευταία έκθεση της IRENA (Energy Rethinking Energy), βλέπουμε το LCOE (μετρούμενο το 2016 USD ανά μεγαβάτ-ώρας ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται) σε όλο το εύρος των ανανεώσιμων τεχνολογιών το 2010 και το 2016.^[8]

Είναι σημαντικό να αναγνωρίσετε ότι το σχετικό κόστος της ενέργειας εξαρτάται από το περιβάλλον και ποικίλλει σε ολόκληρο τον κόσμο. Για παράδειγμα, το σχετικό κόστος της ηλιακής ενέργειας είναι πιθανό να είναι χαμηλότερο στις χώρες με μικρότερο γεωγραφικό πλάτος από ό, τι σε υψηλό γεωγραφικό πλάτος, επειδή θα παράγει περισσότερη ενέργεια

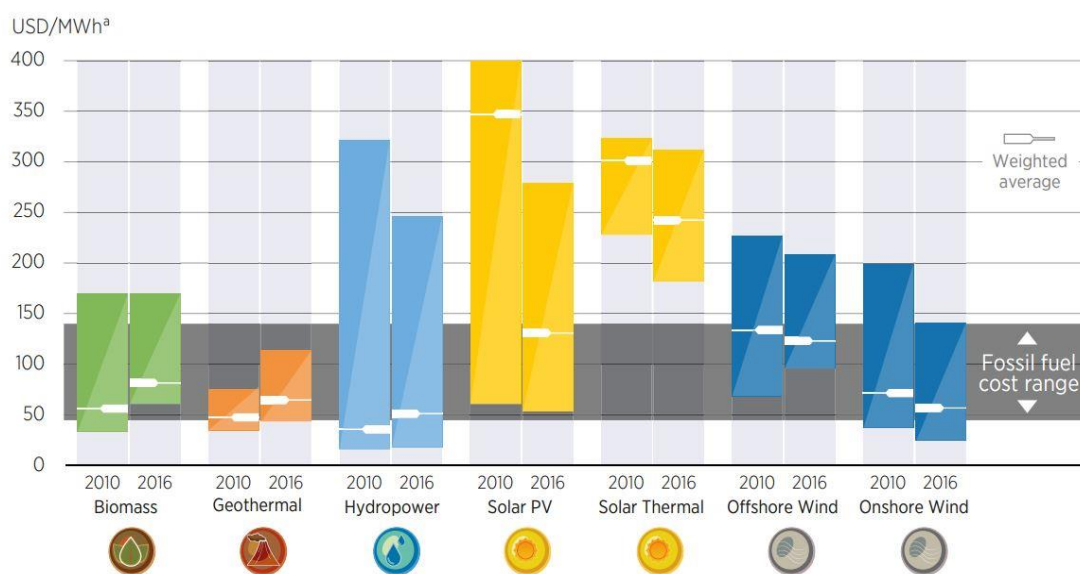
κατά την διάρκεια της ζωής τους. Αυτό ενδέχεται να επηρεάζει πολύ, τους διαφορετικούς αριθμούς του LCOE ανά περιοχή (και πράγματι τα διαγράμματα LCOE για συγκεκριμένες χώρες μπορεί να διαφέρουν σημαντικά). Για το παγκόσμιο γράφημα, αυτό το εύρος κόστους αντιπροσωπεύεται ως κάθετες ράβδοι για κάθε πηγή. Η λευκή γραμμή σε κάθε ράβδο αντιπροσωπεύει το παγκόσμιο σταθμισμένο μέσο κόστος ανά τεχνολογία.

Ομοίως, το κόστος των ορυκτών καυσίμων μπορεί να εξαρτάται πολύ από την ποιότητα των καυσίμων, την ευκολία εξαγωγής και τους περιφερειακούς πόρους. Το μέσο εύρος του κόστους των ορυκτών καυσίμων εμφανίζεται ως το γκρι οριζόντιο μπλοκ.

Αυτό που βλέπουμε είναι ότι, όσον αφορά το σταθμισμένο μέσο κόστος του 2016, οι περισσότερες ανανεώσιμες τεχνολογίες βρίσκονται σε μια ανταγωνιστική εμβέλεια σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα. Η βασική εξαίρεση σε αυτό είναι η ηλιακή θερμική ενέργεια που παραμένει περίπου διπλάσια ακριβότερη (αν και πέφτει). Η υδροηλεκτρική ενέργεια, με εξαίρεση την παραδοσιακή βιομάζα, είναι η παλαιότερη και καθιερωμένη ανανεώσιμη πηγή μας: αυτό αντικατοπτρίζεται στη χαμηλή τιμή του (η οποία μπορεί να μειώσει ακόμη και τις φθηνότερες πηγές ορυκτών καυσίμων). Σημειώστε, ωστόσο, ότι αν και ο σταθμισμένος μέσος όρος των περισσότερων πηγών είναι ανταγωνιστικός με το μέσο κόστος των ορυκτών καυσίμων, το ευρύ φάσμα του δυνητικού κόστους σημαίνει ότι αυτό δεν ισχύει για όλες τις χώρες. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η επιλογή συγκεκριμένων τεχνολογιών πρέπει να εξεταστεί σε τοπική και συγκεκριμένη βάση.

Εάν σκεφτούμε πώς άλλαξε το μέσο κόστος των τεχνολογιών από το 2010-16, βλέπουμε ότι τόσο η φωτοβολταϊκή (όσο και σε μικρότερο βαθμό, η ηλιακή θερμική) μειώθηκε σημαντικά. Αυτή η μείωση κόστους στα φωτοβολταϊκά ήταν δραματική τις τελευταίες δεκαετίες, όπως φαίνεται στο διάγραμμα. Η τιμή των ηλιακών φωτοβολταϊκών μονάδων έχει μειωθεί πάνω από 100 φορές από το 1976. Κατά μέσο όρο, η τεχνολογία είχε ρυθμό μείωσης 22%. Αυτό σημαίνει ότι το κόστος μειώνεται κατά 22% για κάθε διπλασιασμό της ηλιακής φωτοβολταϊκής ικανότητας (αν και η πρόοδος δεν ήταν απαραίτητα σταθερή κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου).

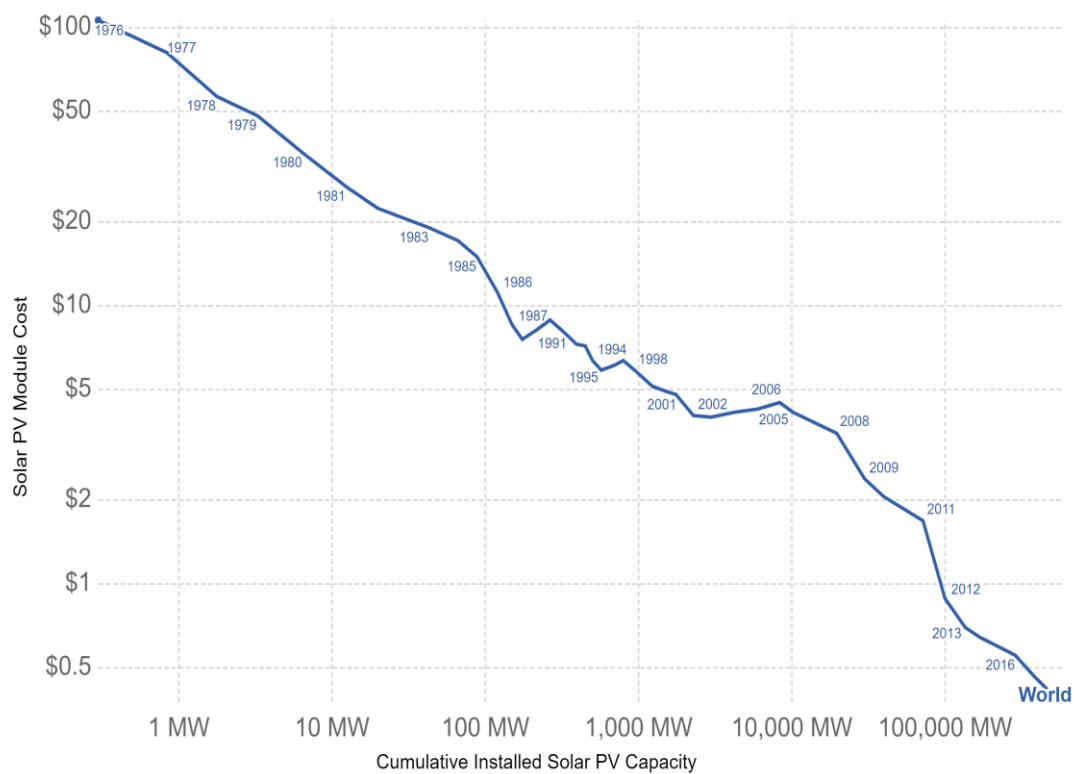
Εικόνα 1 : LCOE 2010 και 2016 ^[9]



Note: a) MWh: megawatt-hour

b) All costs are in 2016 USD. Weighted Average Cost of Capital is 7.5% for OECD and China and 10% for Rest of World

Γράφημα 14 : Τιμές ηλιακής φωτοβολταϊκής μονάδας έναντι σωρευτικής ικανότητας



Πηγή : Lafond et al. (2017), IRENA Dat

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ

2.1 Η ενεργειακή κρίση της Αρχαίας Ρώμης

Η παρακμή και η πτώση της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας είναι ένα από τα πιο πολυσυζητημένα ιστορικά φαινόμενα και μας φανερώνει ένα μοτίβο που ακολούθησαν όλες οι μεγάλες αυτοκρατορίες κατά την αρχαιότητα. Στην ακμή της, η Ρώμη, είχε πάνω από πενήντα εκατομμύρια κατοίκους και εκτίνονταν από την Βρετανία μέχρι τον Περσικό κόλπο, είχε κτίρια από μπετό, διεθνές οδικό δίκτυο και πολιτικούς θεσμούς που υιοθετούνται ακόμα και σήμερα. Όμως από το 2^ο αιώνα μ.Χ. και έπειτα, μία σειρά από κακές πολιτικές αποφάσεις αποσταθεροποίησαν την Ρώμη με αποτέλεσμα το 476 μ.Χ. η αυτοκρατορία να καταρρεύσει. Υπάρχουν αρκετοί λόγοι που οδήγησαν σε αυτό το γεγονός, μεταξύ άλλων οι πολιτικές δολοπλοκίες και οι εξεγέρσεις σκλάβων, που αποτελούν τους άμεσους μηχανισμούς που οδήγησαν στην κατάρρευση, οι εγγύς λόγοι. Όμως υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που οδήγησαν σε αυτό το γεγονός, κάποιοι παράγοντες που επιδρούσαν σαν κρυφός μηχανισμός, οι οποίοι αποδυναμώσανε την Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία και την κάνανε ευάλωτη σε πολιτικές δολοπλοκίες και εισβολές βαρβάρων.

Η έλλειψη ενέργειας αποτέλεσε αυτόν το κρυφό μηχανισμό. Βλέποντας μακροσκοπικά την έννοια της ενέργειας, όλες οι πράξεις μίας κοινωνίας από την κατασκευή ενός ουρανοξύστη στη Νέα Υόρκη, μέχρι την εκπαίδευση ενός γραφέα στην αρχαία Αίγυπτο μετακινούν και καταναλώνουν ενέργεια. Στις μέρες μας υπάρχουν πόλοι τρόποι παραγωγής ενέργειας, όμως εκείνη την εποχή ήταν σαφώς πολύ λιγότεροι. Με εξαίρεση το ξύλο σαν καύσιμο για θέρμανση και τον άνεμο που μετακινούσε τα πλοία, η συντριπτική πλειοψηφία εκείνη την εποχή ήταν θερμίδες από φαγητό που μετατρέπονται σε μυϊκή δύναμη, και μυϊκή δύναμη στην Αρχαία Ρώμη σήμαινε με απλά λόγια μεγάλος αριθμός σκλάβων.

Πέρα από το προφανές, ότι αυτό το φαινόμενο ήταν απάνθρωπο και ανήθικο, οι σκλάβοι συγκρινόμενοι με άλλους πόρους είναι πολύ “φτωχή” πηγή ενέργειας, μη αποδοτική. Για να “ωφεληθείς” από ένα σκλάβο πρέπει συνέχεια να σπαταλάς ενέργεια για να τον μεγαλώνεις και να τον εκτρέφεις. Επομένως το βασικό “καύσιμο” που έχει στην διάθεση της η Ρώμη είναι φτωχό σε ενέργεια. Επιπλέον η περιπλοκότητα του συστήματος με τις πολλές κουλτούρες που την απαρτίζουν και που αλληλεπιδρούν σε ένα χαοτικό δίκτυο εμπορίου, εχθροπραξιών και γραφειοκρατίας καθιστά την Αυτοκρατορία ευάλωτη. Όπως έχει γίνει αντιληπτό και σαφώς αποδεκτό, τα πολύπλοκα συστήματα αργά ή γρήγορα τείνουν να φθείρονται, να αποσυντίθενται με την πάροδο των χρόνων και να καταλήγουν σε χαμηλότερα επίπεδα χωρικής οργάνωσης, να πηγαίνουν από καταστάσεις οργάνωσης και τάξης σε καταστάσεις όπου κυριαρχούν ο θόρυβος και η τυχαιότητα. Ο μόνος τρόπος να αποφευχθεί αυτή η διαδικασία, είναι να τροφοδοτείται συνεχώς το σύστημα με ενέργεια.

Όσο, λοιπόν, η Αυτοκρατορία μεγαλώνει σε μέγεθος και πολυπλοκότητα, η ενέργεια που απαιτείτε για να στηριχτεί όλο αυτό το οικοδόμημα μεγαλώνει και αυτή. Η Ρώμη αναγκάζεται να κατακτά όλο και περισσότερα εδάφη για να εντάσσει τους ντόπιους κατοίκους στην υπηρεσία της δημιουργώντας έτσι μια σταθερή ροή σκλάβων από τις επαρχίες προς το κέντρο. Όσο όμως απομακρυνόμαστε από το κέντρο (πρωτεύουσα) τόσο πιο δύσκολο γίνεται να κατακτήσεις μία νέα επαρχία και να καρπωθείς τα οφέλη της. Επιπλέον

οι στρατιώτες , οι πληροφορίες και τα υλικά , διανύουν μεγαλύτερη απόσταση από και προς την Ρώμη. Ως εκ τούτου, υπάρχει μία μέγιστη απόσταση από το κέντρο, που αν την υπερβείς , η ενέργεια που θα ξοδεύεται για να αποκτηθούν νέοι σκλάβοι , είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που θα προσφέρουν αυτοί οι σκλάβοι. Το σενάριο να μην υπερβείς αυτήν την απόσταση δεν είναι εφικτό, καθώς η Ρώμη είναι όπως αναφέραμε ένα σύστημα και θα χρειάζεται πάντα ενέργεια. Επομένως είναι αναγκαία και μη αναστρέψιμη αυτή η σταθερή ροή σκλάβων προς και από το κέντρο και έτσι αναπόφευκτες και οι κατακτήσεις.

Εν κατακλείδι , η ενέργεια συντήρησης ενός πολύπλοκου συστήματος αργά ή γρήγορα θα υπερβεί την διαθέσιμη ενέργεια και τίποτα δεν μπορεί να σταματήσει αυτή τη διαδικασία. Ο μόνος τρόπος για να μην καταρρεύσει το σύστημα είναι να βρεθούν νέοι τρόποι να εισάγεται επιπλέον ενέργεια στο σύστημα ώστε να διατηρηθεί η δομή και η οργάνωση του.^[10]

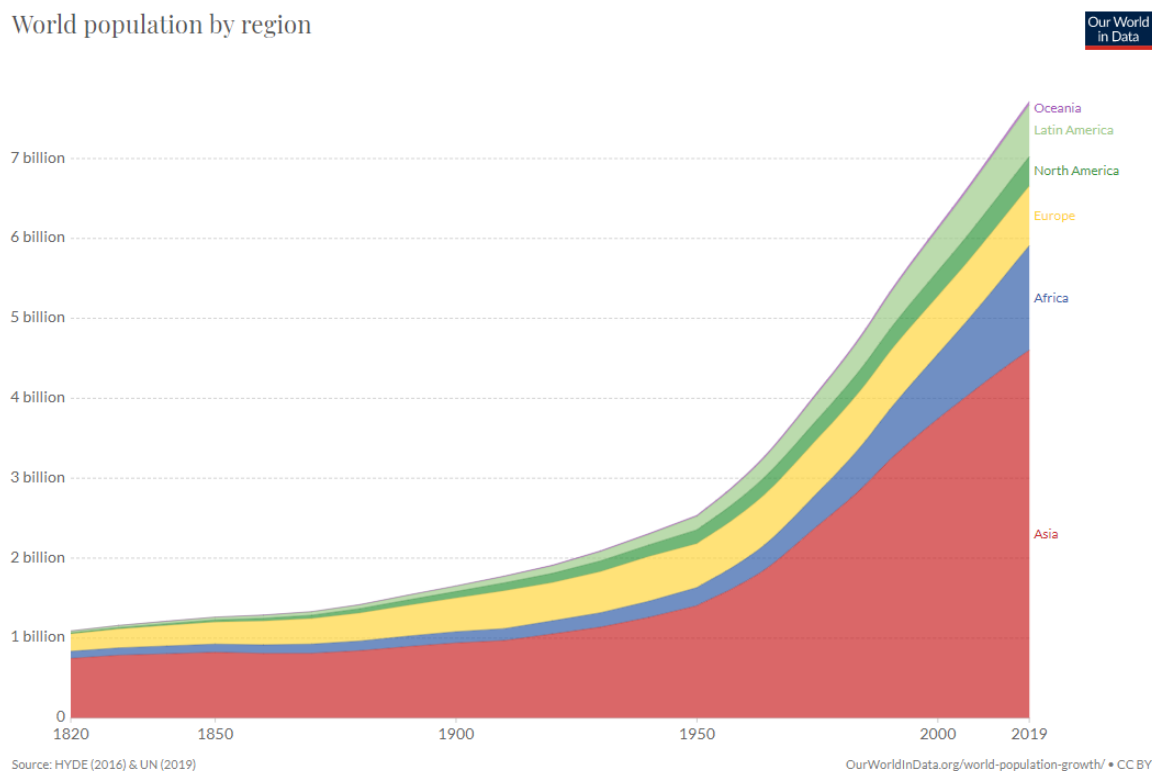
2.2 Η εξέλιξη των κοινωνιών

Η εξέλιξη των ανθρώπινων κοινωνιών, όπως μας αποκάλυψε και το παράδειγμα της Ρωμαϊκής αυτοκρατορίας, 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 18ου 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 στο παρακάτω γράφημα , ο πληθυσμός αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς τα τελευταία χρόνια και αναμένεται να ξεπεράσει τα δέκα δισεκατομμύρια πριν το 2100. Η μεταβολή αυτή είναι ασύμμετρη και σημειώνεται κυρίως σε αναπτυσσόμενες περιοχές, οξύνοντας τις ήδη υπάρχουσες αντιθέσεις στην ανισοκατανομή του πλούτου και την κατανάλωση ενέργειας^[11]

Γράφημα 15: Παγκόσμιο πληθυσμός

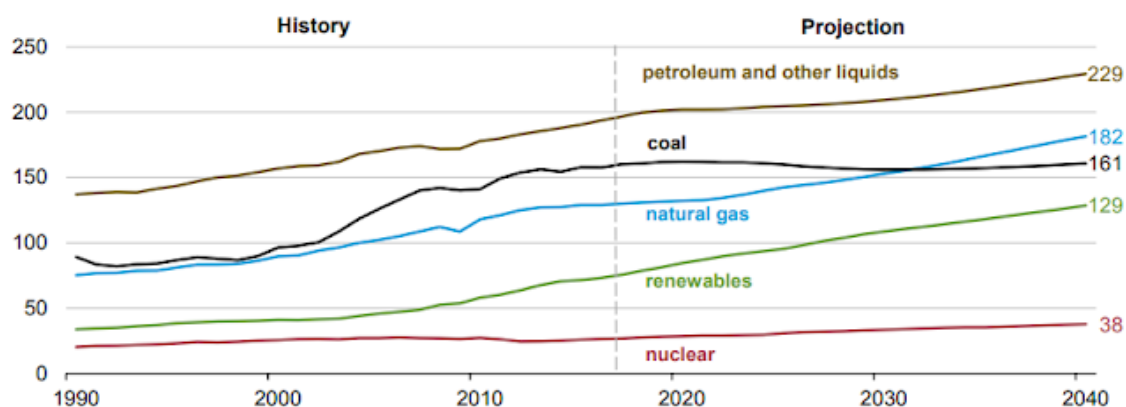
World population by region



Πηγή : <https://ourworldindata.org/grapher/world-population-by-world-regions-post-1820>

Εντυπωσιακά είναι τα στατιστικά στοιχεία για την διαχρονική μεταβολή της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας διεθνώς. Όπως φαίνεται και στα παρακάτω γραφήματα 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 περεταίρω αύξηση.

Γράφημα 16 : Ενεργειακή κατανάλωση ανά πηγή ενέργειας

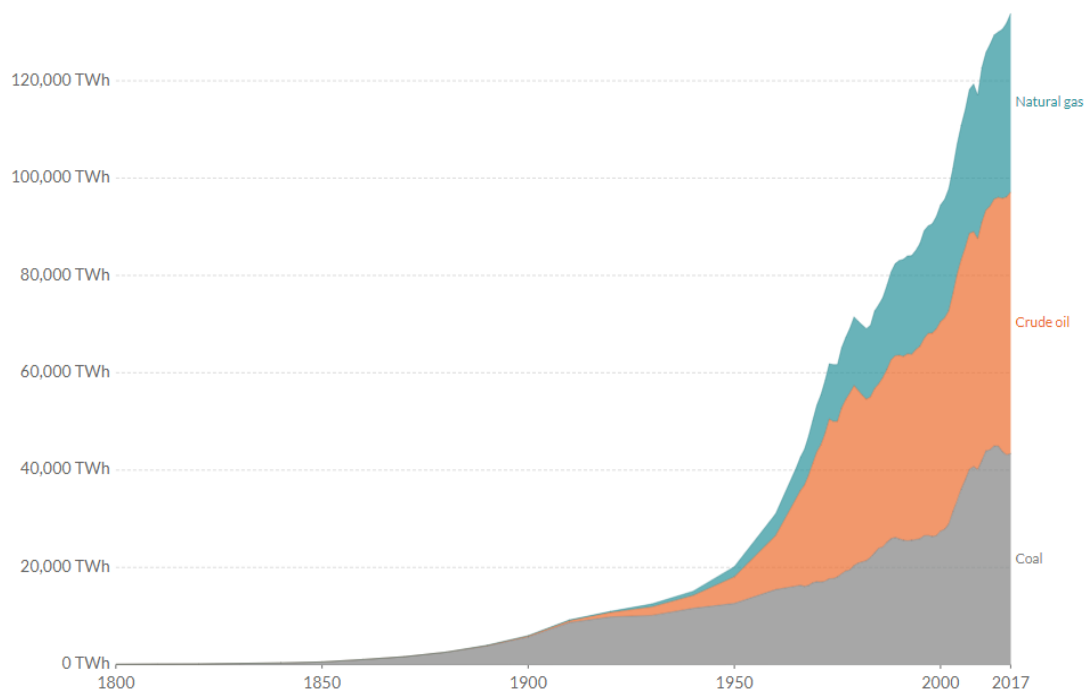


Source: EIA, International Energy Outlook 2018

Πηγή : <https://cei.org/file/eia-international-energy-outlook-2018-world-energy-consumption-source-figure-2>

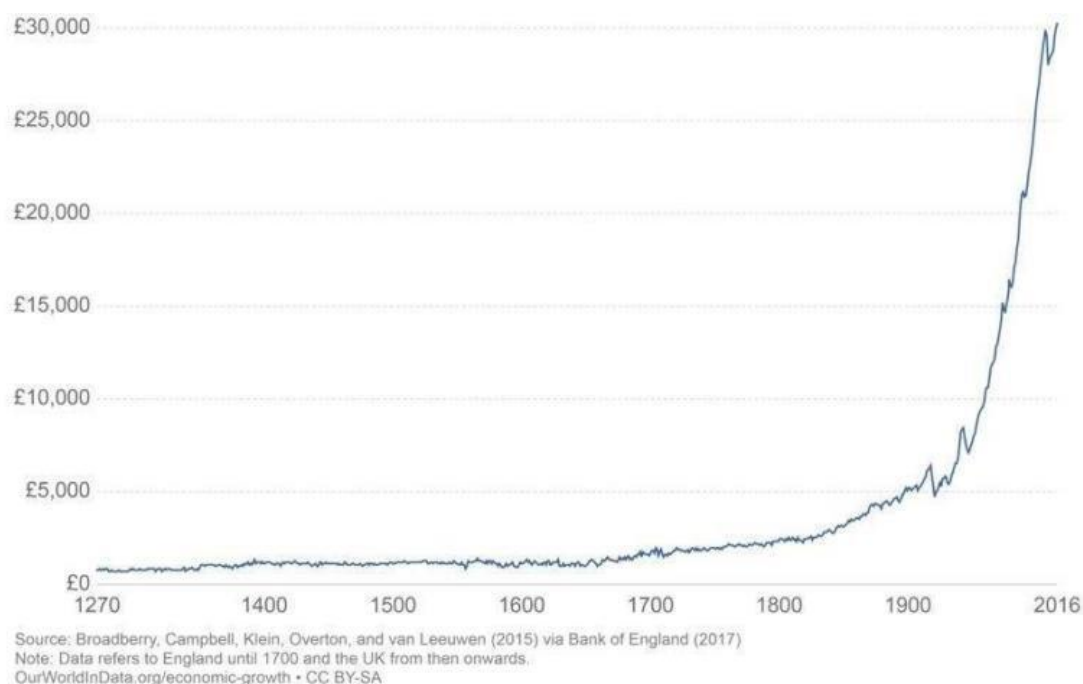
Ένα εντυπωσιακό συμπέρασμα που προκύπτει συγκρίνοντας τις εικόνες 3 και 4, είναι ότι χάρης τα ορυκτά καύσιμα και την συμπυκνωμένη ενέργεια που παρέχουν, ο ρυθμός αύξησης του κατά κεφαλήν εισοδήματος εκτοξεύτηκε. Σήμερα, ο μέσος άνθρωπος καταναλώνει περίπου 2.500 W ημερησίως (το 85% των οποίων προέρχεται από πετρέλαιο, κάρβουνο και φυσικό αέριο.)

Γράφημα 17 : Παγκόσμια Κατανάλωση από Υδρογονάνθρακες



Πηγή : Global Carbon Project

Γράφημα 18 : Κατά κεφαλήν εισόδημα στην Αγγλία 1270-2016



Πηγή : <https://www.nuevarevista.net/justicia-social/capitalismo-y-reluivon-historia-mundial-y-justicia-social-la-explicacion-historica/>

2.3 Ενεργειακό Πρόβλημα

Ο κόσμος δεν διαθέτει ασφαλείς, χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και φτηνές εναλλακτικές λύσεις ενέργειας, μεγάλης κλίμακας πέρα από τα ορυκτά καύσιμα. Μέχρι να βρεθούν αυτές οι εναλλακτικές λύσεις, ο κόσμος θα συνεχίσει να αντιμετωπίζει τα δύο ενεργειακά προβλήματα του σήμερα. Το ενεργειακό πρόβλημα που λαμβάνει την περισσότερη προσοχή είναι η σχέση μεταξύ της ενεργειακής πρόσβασης και των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Αλλά ο κόσμος έχει και ένα άλλο παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα που είναι εξίσου μεγάλο: εκατοντάδες εκατομμύρια άνθρωποι δεν έχουν πλήρη πρόσβαση σε επαρκή ενέργεια, με τρομερές συνέπειες για τον εαυτό τους και το περιβάλλον.

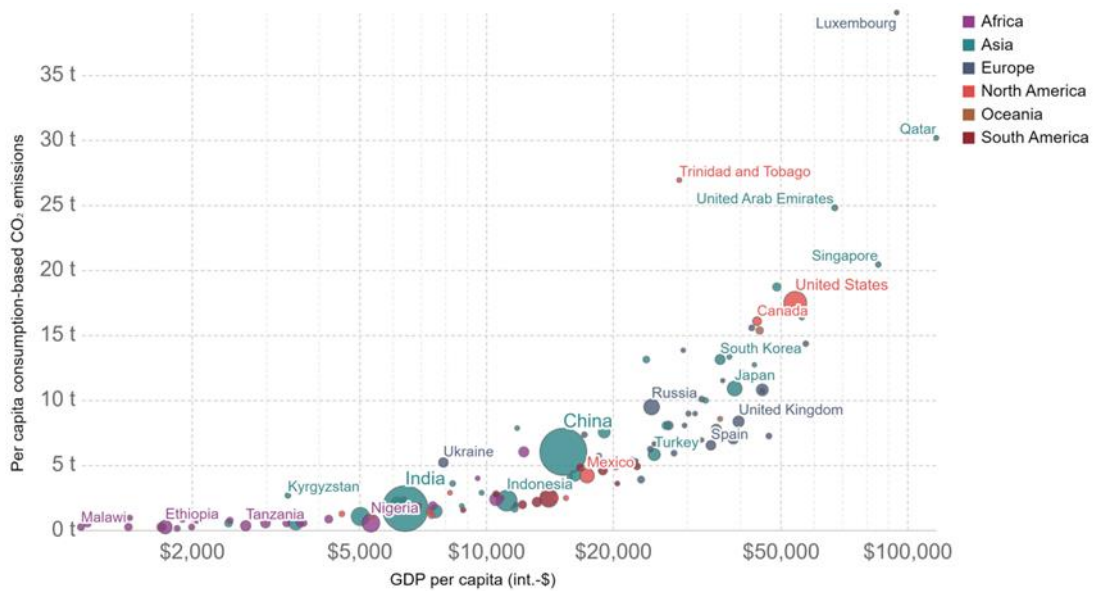
Το πρόβλημα που κυριαρχεί στη δημόσια συζήτηση για την ενέργεια είναι η κλιματική αλλαγή. Μια κλιματική κρίση θέτει σε κίνδυνο το φυσικό περιβάλλον γύρω μας, την ευημερία μας σήμερα και την ευημερία των γενεών που ακολουθούν. Η παραγωγή ενέργειας είναι υπεύθυνη για το 87% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και όπως δείχνει το παρακάτω διάγραμμα, οι άνθρωποι στις πλουσιότερες χώρες έχουν τις υψηλότερες εκπομπές ρύπων. Το διάγραμμα παρακάτω δείχνει τις κατά κεφαλήν εκπομπές CO₂ στον κάθετο άξονα έναντι του μέσου εισοδήματος στον οριζόντιο άξονα.

Σε χώρες όπου οι άνθρωποι έχουν μέσο εισόδημα μεταξύ 15.000 \$ και 20.000 \$, οι κατά κεφαλήν εκπομπές CO₂ πλησιάζουν τον παγκόσμιο μέσο όρο (4,8 τόνοι CO₂ ετησίως). Σε κάθε χώρα όπου το μέσο εισόδημα των ανθρώπων υπερβαίνει τα 25.000 \$, οι μέσες κατά κεφαλή εκπομπές είναι υψηλότερες από τον παγκόσμιο μέσο όρο.

Οι εκπομπές CO₂ στον κόσμο έχουν αυξηθεί γρήγορα και έφτασαν τους 36,6 δισεκατομμύρια τόνους το 2018. Όσο εκπέμπουμε αέρια θερμοκηπίου, η συγκέντρωσή τους στην ατμόσφαιρα αυξάνεται. Για να τερματιστεί η κλιματική αλλαγή, η συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα πρέπει να σταθεροποιηθεί και για να επιτευχθεί αυτό οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στον κόσμο πρέπει να μειωθούν προς το μηδέν.

Η μείωση των εκπομπών στο καθαρό μηδέν θα είναι μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στον κόσμο τα επόμενα χρόνια. Αλλά το ενεργειακό πρόβλημα του κόσμου είναι στην πραγματικότητα ακόμη μεγαλύτερο από αυτό, επειδή ο κόσμος δεν έχει ένα, αλλά δύο ενεργειακά προβλήματα.

Γράφημα 19 : Εκπομπές αερίων CO₂ έναντι κατά κεφαλήν ΑΕΠ



Πηγή : OWID based on Global Carbon Project & UN Population

2.3.1 Τα δίδυμα προβλήματα της παγκόσμιας ενέργειας

2.3.1.1 Το πρώτο ενεργειακό πρόβλημα: αυτοί που έχουν χαμηλές εκπομπές άνθρακα δεν έχουν πρόσβαση στην ενέργεια

Το πρώτο παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα σχετίζεται με την αριστερή πλευρά του παραπάνω διαγράμματος. Οι άνθρωποι σε πολύ φτωχές χώρες έχουν πολύ χαμηλές εκπομπές. Κατά μέσο όρο, οι άνθρωποι στις ΗΠΑ εκπέμπουν περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα σε 4 ημέρες από ό, τι οι άνθρωποι σε φτωχές χώρες -όπως η Αιθιοπία, η Ουγκάντα ή το Μαλάουι- σε ένα ολόκληρο έτος.²

Ο λόγος που οι εκπομπές των φτωχών είναι χαμηλές είναι ότι δεν έχουν πρόσβαση στη σύγχρονη ενέργεια και τεχνολογία. Το ενεργειακό πρόβλημα του φτωχότερου μισού κόσμου είναι η ενεργειακή φτώχεια. Τα δύο παρακάτω διαγράμματα δείχνουν ότι μεγάλα μερίδια ατόμων σε χώρες με κατά κεφαλήν ΑΕΠ κάτω των 25.000 \$ δεν έχουν πρόσβαση σε ηλεκτρικό ρεύμα.

Η έλλειψη πρόσβασης σε αυτές τις τεχνολογίες προκαλεί μερικά από τα χειρότερα παγκόσμια προβλήματα της εποχής μας. Όταν οι άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση σε σύγχρονες πηγές ενέργειας για μαγείρεμα και θέρμανση, βασίζονται σε πηγές στερεών καυσίμων - κυρίως καυσόξυλα, αλλά και απόβλητα καλλιεργειών και κοπριάς. Αυτό συνεπάγεται τεράστιο κόστος για την υγεία των ατόμων λόγω της ενεργειακής φτώχειας: η ατμοσφαιρική ρύπανση σε εσωτερικούς χώρους, την οποία ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας αποκαλεί «τον μεγαλύτερο ενιαίο κίνδυνο για την υγεία του περιβάλλοντος στον κόσμο».^[12] Για τους φτωχότερους ανθρώπους στον κόσμο είναι ο μεγαλύτερος παράγοντας κινδύνου για πρόωρο θάνατο και η παγκόσμια έρευνα για την υγεία δείχνει ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση των εσωτερικών χώρων ευθύνεται για 1,6 εκατομμύρια θανάτους κάθε χρόνο, διπλάσιο από τον αριθμό των θανάτων λόγω κακής υγιεινής.

Η χρήση του ξύλου ως πηγή ενέργειας έχει επίσης αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η εξάρτηση από το καύσιμο αυτό είναι ο λόγος για τον οποίο η φτώχεια συνδέεται με την αποψίλωση των δασών. Ο Διεθνής Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας αναφέρει ότι στην Αφρικανική ήπειρο η εξάρτηση από το ξύλο ως καύσιμο είναι ο πιο σημαντικός μοχλός υποβάθμισης των δασών.^[13] Σε όλη την Ανατολική, Κεντρική και Δυτική Αφρική τα ξύλα ως καύσιμα παρέχουν περισσότερο από το μισό της συνολικής ενέργειας.^[14]

Τέλος, η έλλειψη πρόσβασης στην ενέργεια υποβάλλει τους ανθρώπους σε μια ζωή σε φτώχεια. Χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα σημαίνει ότι δεν υπάρχει ψύξη τροφίμων, πλυντήριο ρούχων ή πλυντήριο πιάτων και κανένα φως τη νύχτα. Ίσως έχετε δει τις φωτογραφίες των παιδιών που κάθονταν κάτω από μια λάμπα του δρόμου τη νύχτα για να κάνουν την εργασία τους.^[15] Το πρώτο ενεργειακό πρόβλημα του κόσμου είναι το πρόβλημα της ενεργειακής

² Όπως βλέπουμε στο γράφημα 25 : $17.49t / 0.2t = 87.45$. And $365 \text{ days} / 87.45 = 4.17 \text{ days}$

φτώχειας - όσοι δεν έχουν επαρκή πρόσβαση σε σύγχρονες πηγές ενέργειας υποφέρουν από κακές συνθήκες διαβίωσης.

2.3.1.2 Το δεύτερο ενεργειακό πρόβλημα: εκείνοι που έχουν πρόσβαση στην ενέργεια παράγουν πολύ υψηλές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου

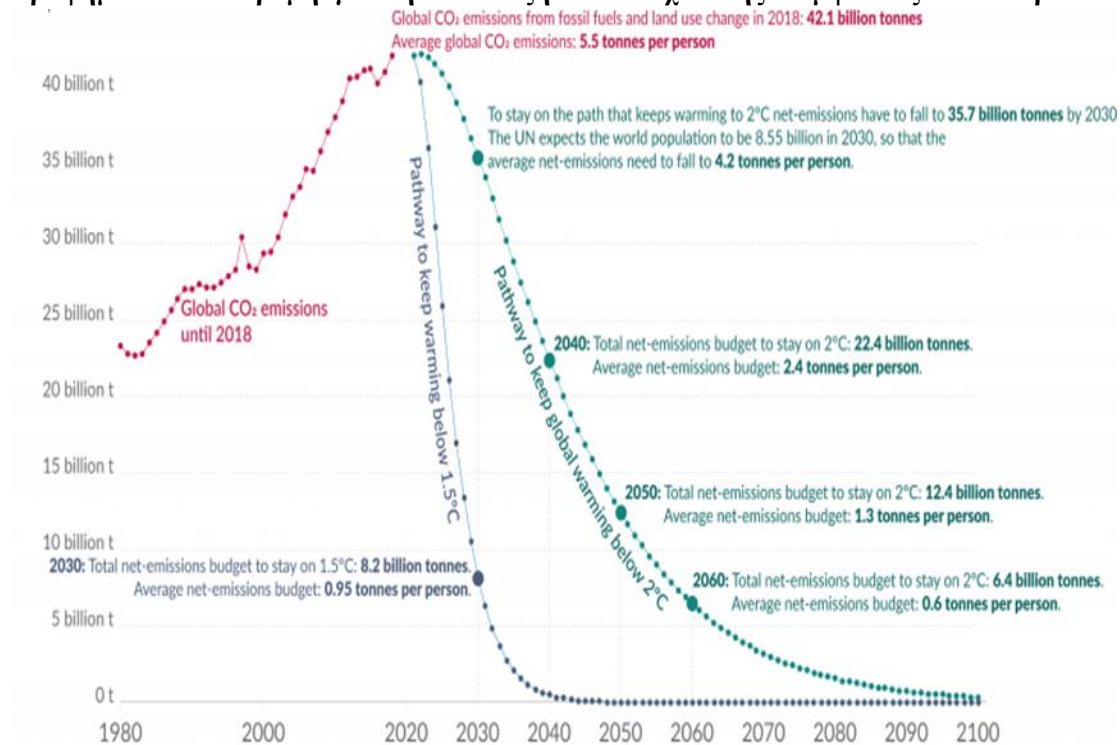
Το δεύτερο ενεργειακό πρόβλημα είναι αυτό που είναι πιο γνωστό και σχετίζεται με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, οι οποίες είναι πολύ υψηλές. Εκείνοι που πρέπει να μειώσουν περισσότερο τις εκπομπές είναι οι εξαιρετικά πλούσιοι. Η Diana Ivanova και ο Richard Wood (2020) έδειξαν ότι το πλουσιότερο 1% στην ΕΕ εκπέμπει κατά μέσο όρο 43 τόνους CO₂ ετησίως - 9 φορές περισσότερο από τον παγκόσμιο μέσο όρο των 4,8 τόνων.^[16]

Το να εστιάσεις εκεί, ωστόσο, μπορεί να δώσει την εντύπωση ότι είναι μόνο το πρόβλημα των εκπομπών των εξαιρετικά πλούσιων. Αυτό δεν ισχύει, επιπλέον δεν είναι αρκετά σαφές στη δημόσια συζήτηση, ότι για να είναι βιώσιμος ο παγκόσμιος ενεργειακός εφοδιασμός, οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου της πλειονότητας του παγκόσμιου πληθυσμού πρέπει να μειωθούν, και είναι επί του παρόντος πολύ υψηλές. Απλά το πρόβλημα είναι μεγαλύτερο για τους εξαιρετικά πλούσιους, αλλά δεν περιορίζεται εκεί.

Ο στόχος στην Συμφωνία των Παρισίων είναι να διατηρηθεί η παγκόσμια μέση θερμοκρασία σε επίπεδα κάτω από τους 2 ° C πάνω από τα επίπεδα πριν από την Βιομηχανική Επανάσταση και «να συνεχίσει τις προσπάθειες για τον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας στους 1,5 ° C »^[17]

Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, οι εκπομπές πρέπει να μειωθούν στο καθαρό μηδέν μέσα στις επόμενες δεκαετίες

Γραφημα 20: Διαδρομή για την επίτευξη του στόχου της Συμφωνίας των Παρισίων



Πηγή : https://folk.universitetetioslo.no/roberan/t/global_mitigation_curves.shtml

Οι μόνες χώρες που έχουν σχεδόν μηδενικές εκπομπές είναι εκείνες όπου η πλειοψηφία τους πάσχει από ενεργειακή φτώχεια. Οι πλησιέστερες χώρες είναι οι πολύ φτωχές χώρες της Αφρικής: Μαλάουι, Μπουρούντι και Λαϊκή Δημοκρατία του Κονγκό. Αυτό όμως έχει μεγάλο κόστος για τον εαυτό τους. Σε καμία φτωχή χώρα οι άνθρωποι δεν έχουν βιοτικό επίπεδο που είναι συγκρίσιμο με αυτό των ανθρώπων στις πλουσιότερες χώρες. Και δεδομένου ότι οι συνθήκες διαβίωσης είναι καλύτερες όπου το κατά κεφαλήν ΑΕΠ είναι υψηλότερο, σημαίνει επίσης ότι και οι εκπομπές CO₂ είναι υψηλότερες και άρα οι συνθήκες διαβίωσης είναι καλύτερες. Επίσης οι εκπομπές είναι υψηλές όπου η παιδική θνησιμότητα είναι χαμηλότερη, όπου τα παιδιά έχουν καλή πρόσβαση στην εκπαίδευση και όπου λίγα από αυτά υποφέρουν από πείνα.

Οι άνθρωποι χρειάζονται πρόσβαση στην ενέργεια για μια καλή ζωή. Αλλά σε έναν κόσμο όπου τα ορυκτά καύσιμα είναι η κυρίαρχη πηγή ενέργειας, η πρόσβαση στη ενέργεια σημαίνει ότι οι εκπομπές άνθρακα θα είναι πολύ υψηλές.

Επομένως, η ακριβέστερη περιγραφή του δεύτερου παγκόσμιου ενεργειακού προβλήματος, σε μία πρόταση, είναι: η πλειονότητα του παγκόσμιου πληθυσμού - όλοι όσοι δεν είναι πολύ φτωχοί - έχουν εκπομπές αερίων θερμοκηπίου που είναι πολύ υψηλές για να είναι βιώσιμες μακροπρόθεσμα.

2.4 Η ενεργειακή πρόκληση: να βρεθούν εναλλακτικές λύσεις μεγάλης κλίμακας για τα ορυκτά καύσιμα που να είναι προσιτά, ασφαλή και βιώσιμα.

Το καθήκον για τη γενιά μας είναι συνεπώς διττό: δεδομένου ότι η πλειονότητα του κόσμου ζει ακόμα σε κακές συνθήκες, πρέπει να συνεχίσουμε να σημειώνουμε πρόοδο στον αγώνα μας ενάντια στην ενεργειακή φτώχεια. Όμως η επιτυχία σε αυτόν τον αγώνα θα μετατραπεί σε καλές συνθήκες διαβίωσης για τη σημερινή νέα γενιά, μόνο όταν μπορέσουμε να μειώσουμε ταυτόχρονα και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Το κλειδί για την πρόοδο και στα δύο αυτά μέτωπα είναι η πηγή ενέργειας και η τιμή της. Όσοι ζουν στην ενεργειακή φτώχεια δεν μπορούν να αντέξουν τις τιμές για επαρκή ενέργεια και εκείνοι που άφησαν τη φτώχεια πίσω τους, στηρίζονται σε ορυκτά καύσιμα για να καλύψουν τις ενεργειακές τους ανάγκες.

Μόλις το δούμε με αυτόν τον τρόπο γίνεται σαφές ότι τα δίδυμα προβλήματα ενέργειας είναι πραγματικά οι δύο πλευρές ενός νομίσματος. Δεν έχουμε εναλλακτικές λύσεις ενέργειας μεγάλης κλίμακας σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα που είναι φθηνά, ασφαλή και βιώσιμα.

Στα παρακάτω γραφήματα, φαίνεται τι θα σήμαινε να έχουμε τέτοιες πηγές ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Θα επέτρεπε στον κόσμο να μην αφήσει τις βιώσιμες τρέχουσες εναλλακτικές λύσεις και να κάνει τη μετάβαση στην κάτω δεξιά γωνία του γραφήματος: την περιοχή που σημειώνεται με το πράσινο ορθογώνιο όπου οι εκπομπές είναι καθαρά μηδενικές και όλοι έχουν αφήσει πίσω την ενεργειακή φτώχεια. Χωρίς αυτές τις τεχνολογίες, έχουμε παγιδευτεί σε έναν κόσμο μόνο με κακές εναλλακτικές λύσεις: χώρες χαμηλού εισοδήματος που δεν ανταποκρίνονται στις ανάγκες της σημερινής γενιάς, χώρες υψηλού εισοδήματος που θέτουν σε κίνδυνο την ικανότητα των μελλοντικών γενεών να ικανοποιούν τις ανάγκες τους και χώρες μεσαίου εισοδήματος που αποτυγχάνουν και στα δύο.

Δεδομένου ότι δεν έχουμε αναπτύξει όλες τις τεχνολογίες που απαιτούνται για να καταστεί πιθανή αυτή η μετάβαση, δηλαδή μεγάλης κλίμακας καινοτομίες ώστε ο κόσμος αυτή να στραφεί σε πηγές χαμηλότερων εκπομπών CO₂. Αυτό ισχύει για τους περισσότερους τομείς που προκαλούν εκπομπές άνθρακα, ιδίως στους τομείς των μεταφορών (ναυτιλία, αεροπορικές μεταφορές, οδικές μεταφορές) και θέρμανσης, αλλά και στην παραγωγή τσιμέντου και τη γεωργία.

Ένας τομέας στον οποίο έχουμε αναπτύξει πολλές εναλλακτικές λύσεις έναντι των ορυκτών καυσίμων είναι η ηλεκτρική ενέργεια. Η πυρηνική ενέργεια και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εκπέμπουν πολύ λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα, και είναι πολύ πιο ασφαλείς από τα ορυκτά καύσιμα. Ωστόσο, όπως δείχνει το τελευταίο διάγραμμα, το μερίδιό τους στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μειώθηκε από 36% σε 35% τις τελευταίες τρεις δεκαετίες.

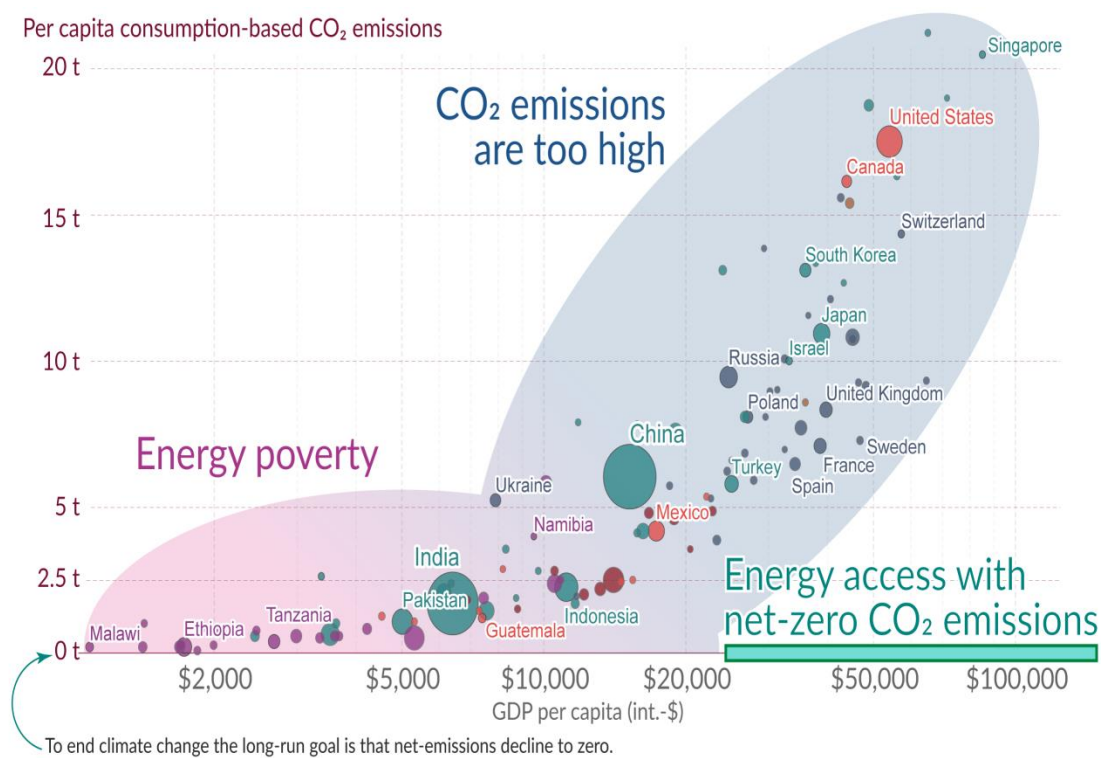
Αλλά είναι δυνατόν να κάνουμε καλύτερες επιλογές. Ορισμένες χώρες έχουν αυξήσει την πυρηνική ενέργεια και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε σχέση με τον παγκόσμιο μέσο όρο. Για παράδειγμα αυτό φαίνεται στο γράφημα για τη Γαλλία και τη Σουηδία - στη Γαλλία το 92% της ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από πηγές χαμηλών εκπομπών άνθρακα, στη

Σουηδία το 99%. Η συνέπεια των επιλογών των χωρών αυτών είναι ότι βρίσκονται πιο κοντά στον αιεφόρο ενεργειακό κόσμο του μέλλοντος. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα διασποράς.

Αλλά για τον παγκόσμιο ενεργειακό εφοδιασμό - ειδικά εκτός του τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας - ο κόσμος απέχει πολύ ακόμη από μια λύση στο παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα.

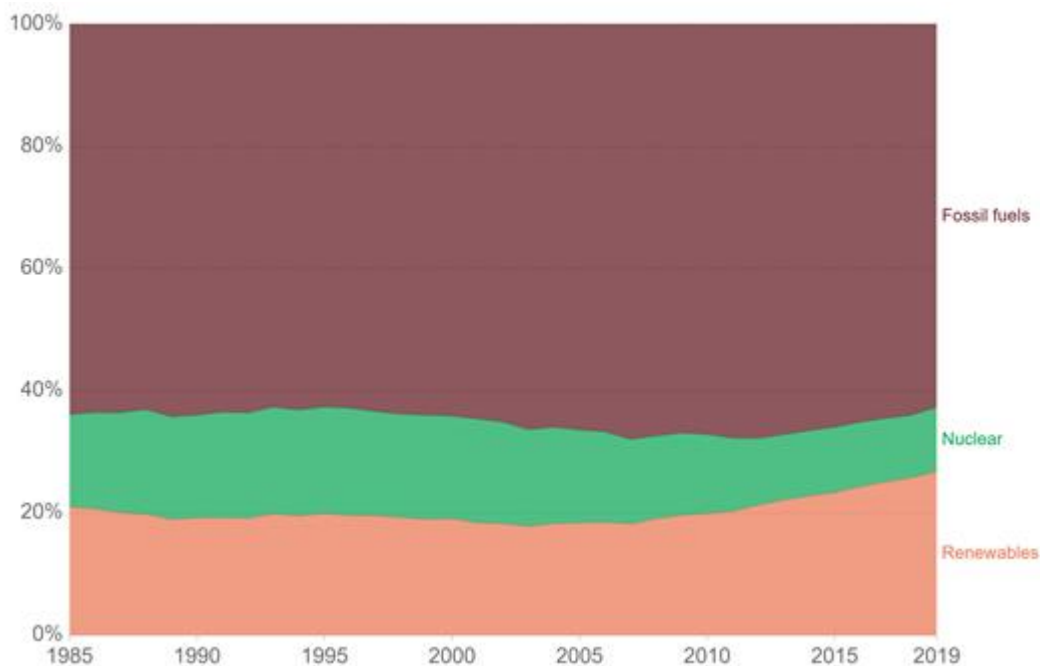
Κάθε χώρα απέχει πολύ από την παροχή καθαρής, ασφαλούς και προσιτής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα και αν δεν σημειώσουμε ταχεία πρόοδο στην ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών, θα παραμείνουμε κολλημένοι στις δύο μη βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις του σήμερα: ενεργειακή φτώχεια ή εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Γράφημα 21 : Κατά κεφαλήν ενεργειακή κατανάλωση βασισμένη σε εκπομπές CO2 έναντι κατά κεφαλήν ΑΕΠ



Πηγή : Global Carbon Project and World Bank

Γράφημα 22 : Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ορυκτών καυσίμων, ανανεώσιμων πηγών και πυρηνικών , παγκοσμίως



Πηγή : Bp Statistical Review of World Energy & Emeber (2021)

2.5 Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και αερίων του θερμοκηπίου

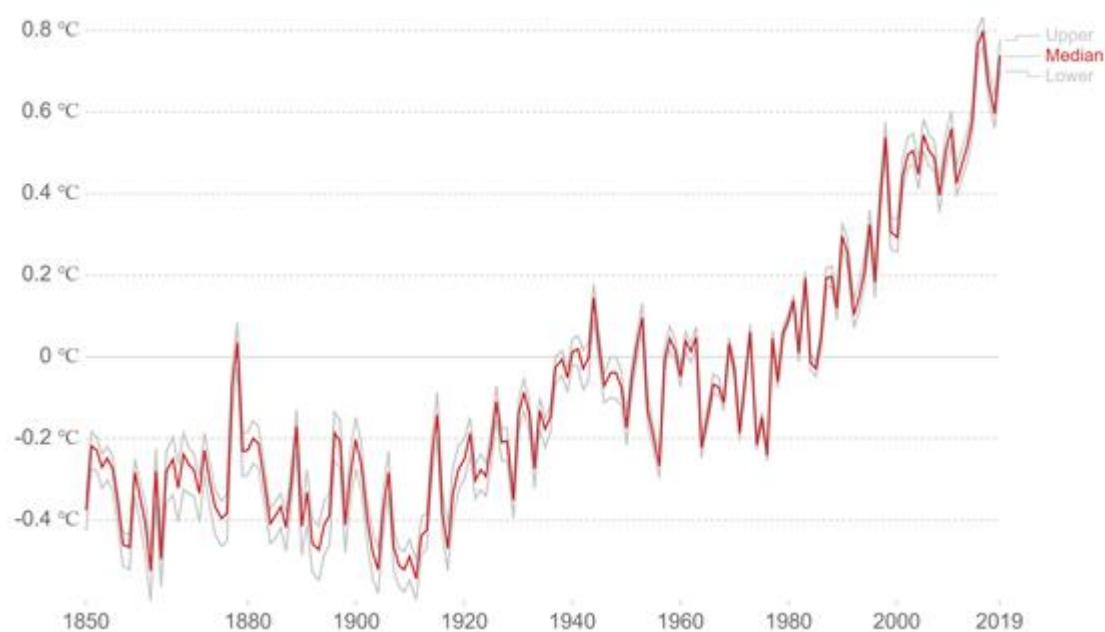
Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τον άνθρωπο και άλλων αερίων του θερμοκηπίου είναι ο πρωταρχικός μοχλός της κλιματικής αλλαγής και παρουσιάζουν μία από τις πιο πειστικές προκλήσεις του κόσμου.^[18] Αυτή η σύνδεση μεταξύ των παγκόσμιων θερμοκρασιών και των συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου - ειδικά του CO₂ - παίζει καθοριστικό ρόλο στην ιστορία της Γης.^[19]

Στο γράφημα βλέπουμε την παγκόσμια μέση θερμοκρασία σε σχέση με τον μέσο όρο της περιόδου μεταξύ 1961 και 1990. Η κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύει τη μέση ετήσια τάση θερμοκρασίας μέσα στο χρόνο, με ανώτερα και χαμηλότερα διαστήματα εμπιστοσύνης να

εμφανίζονται σε ανοιχτό γκρι. Βλέπουμε ότι τις τελευταίες δεκαετίες, οι παγκόσμιες θερμοκρασίες έχουν αυξηθεί απότομα - περίπου 0,7 °C υψηλότερες από την αρχική μας τιμή 1961-1990. Το 1850, βλέπουμε ότι οι θερμοκρασίες τότε ήταν 0,4 °C πιο κρύες από αυτές που ήταν στη βασική μας γραμμή. Συνολικά, αυτό θα ισοδυναμούσε με μέση αύξηση θερμοκρασίας 1,1 °C.

Επειδή, όμως, υπάρχουν μικρές διακυμάνσεις θερμοκρασίας από έτος σε έτος, η συγκεκριμένη αύξηση της θερμοκρασίας εξαρτάται από το έτος που υποτίθεται ότι είναι «προ-βιομηχανικό» και από το τέλος του έτους από το οποίο μετράμε. Άρα συνολικά, αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας κυμαίνεται από 1 έως 1,2 °C .[20]

Γραφημα 23 : Μέση θερμοκρασία



Πηγή : Hadley Center

Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από ανθρώπινες δραστηριότητες είναι ο κύριος παράγοντας αυτής της αύξησης της θερμοκρασίας. Πόσο από την αύξηση της θερμοκρασίας από το 1850 μπορεί να αποδοθεί στις εκπομπές από τον άνθρωπο; Σχεδόν όλη. Αυτό τουλάχιστον δηλώνει η Διακυβερνητική Ομάδα για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) στην πιο πρόσφατη έκθεση αξιολόγησης (AR5) ^[21]

“Οι ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου έχουν αυξηθεί από την προβιομηχανική εποχή, λόγω της οικονομικής αύξησης και της αύξησης του πληθυσμού, και τώρα είναι υψηλότερες από ποτέ. Αυτό έχει οδηγήσει σε ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα, μεθανίου και οξειδίου του αζώτου που είναι άνευ προηγουμένου τουλάχιστον τα τελευταία 800.000 χρόνια. Τα αποτελέσματά τους, μαζί με εκείνα άλλων

ανθρωπογενών παραγόντων, έχουν εντοπιστεί σε όλο το κλιματικό σύστημα και είναι πολύ πιθανό να ήταν η κυρίαρχη αιτία της παρατηρούμενης θέρμανσης από τα μέσα του 20ού αιώνα”

Ένα μεταβαλλόμενο κλίμα έχει μια σειρά πιθανών οικολογικών, φυσικών και υγειονομικών επιπτώσεων, συμπεριλαμβανομένων ακραίων καιρικών φαινομένων (όπως πλημμύρες, ξηρασίες, καταιγίδες και καύσωνες). Αύξηση της στάθμης της θάλασσας, αλλοιωμένη ανάπτυξη των καλλιιεργειών και επιπτώσεις/διακοπές στα συστήματα νερού. Η πιο εκτεταμένη πηγή ανάλυσης σχετικά με τις πιθανές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής βρίσκεται στην 5η έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC).

2.5.1 Σε ορισμένες περιοχές, η αύξηση της θερμοκρασίας είναι πολύ μεγαλύτερη από τον παγκόσμιο μέσο όρο

Όταν σκεφτόμαστε το πρόβλημα της υπερθέρμανσης του πλανήτη, η αύξηση της θερμοκρασίας 1 °C μπορεί να φαίνεται μικρή και ασήμαντη. Αλλά όχι μόνο είναι αλήθεια ότι το 1 °C της ταχείας θέρμανσης μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στο κλίμα και τα φυσικά συστήματα, αλλά και ότι αυτό καλύπτει τις μεγάλες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας σε όλο τον κόσμο.

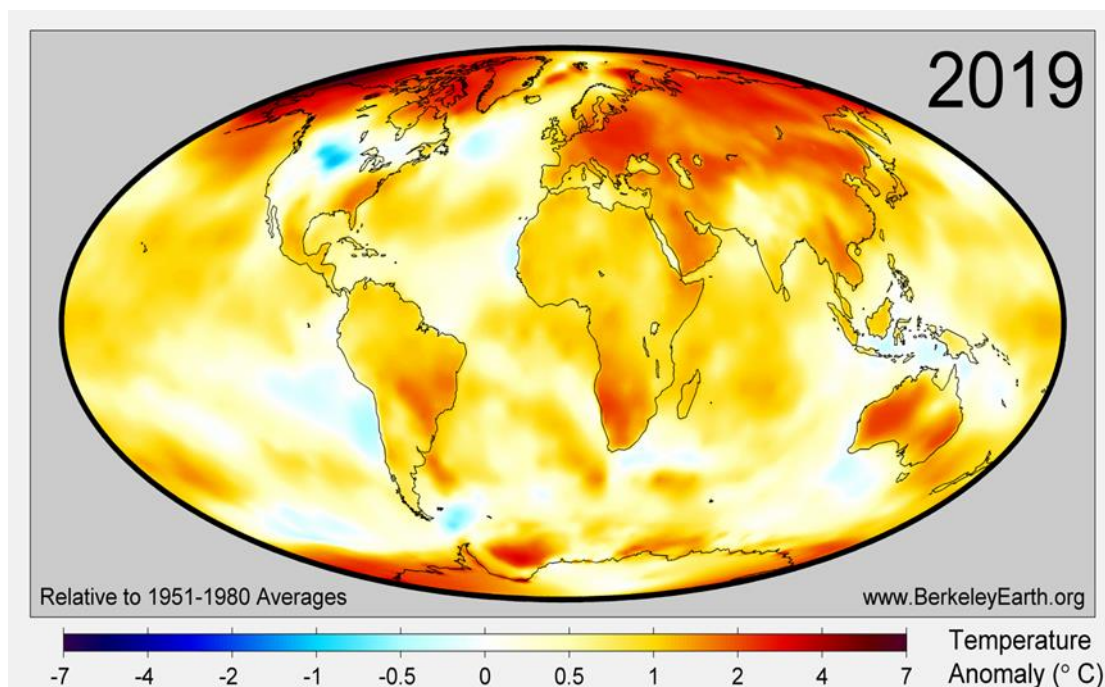
Στον χάρτη που εμφανίζεται (έχει ληφθεί από την παγκόσμια έκθεση θερμοκρασίας του Berkeley Earth) βλέπουμε την παγκόσμια κατανομή των αλλαγών θερμοκρασίας το 2019 σε σχέση με την περίοδο 1951 - 1980.^[23] Αυτή η περίοδος από το 1951 έως το 1980 είναι παρόμοια με την παγκόσμια μέση χρονική σειρά που εμφανίζεται στην παραπάνω ενότητα.

Υπάρχουν μερικά βασικά σημεία που ξεχωρίζουν:

- Πρώτον, η παγκόσμια μέση αύξηση θερμοκρασίας συνήθως δίνεται συνδυασμένη με την αλλαγή θερμοκρασίας τόσο στην ξηρά όσο και στην επιφάνεια της θάλασσας. Αλλά είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι χερσαίες περιοχές αλλάζουν τη θερμοκρασία, τόσο τη θέρμανση όσο και την ψύξη, πολύ περισσότερο από τις ωκεάνιες περιοχές. Συνολικά, οι παγκόσμιες μέσες θερμοκρασίες στην ξηρά έχουν αυξηθεί, περίπου διπλάσιες από τον ωκεανό. Σε σύγκριση με το μέσο όρο του 1951 - 1980, οι θερμοκρασίες στην ξηρά αυξήθηκαν κατά $1,32 \pm 0,04$ ° C. Ενώ η θερμοκρασία της επιφάνειας του ωκεανού (εξαιρουμένων των περιοχών του θαλάσσιου πάγου) αυξήθηκε μόνο κατά $0,59 \pm 0,06$ ° C. Δεδομένου ότι το Βόρειο Ημισφαίριο έχει μεγαλύτερη μάζα εδάφους, σημαίνει ότι η μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας βόρεια του ισημερινού ήταν υψηλότερη από το νότο.
- Δεύτερον, από τον χάρτη που εμφανίζεται, βλέπουμε ότι σε ορισμένες περιοχές η αλλαγή θερμοκρασίας ήταν πολύ πιο ακραία. Σε πολύ μεγάλα γεωγραφικά πλάτη - ειδικά κοντά στους Πόλους - η θέρμανση ήταν πάνω από 3 ° C και σε ορισμένες περιπτώσεις υπερβαίνει τους 5 ° C. Δυστυχώς, αυτές είναι οι περιοχές που θα μπορούσαν να βιώσουν τις μεγαλύτερες επιπτώσεις.

Η παρακολούθηση της μέσης παγκόσμιας αλλαγής θερμοκρασίας είναι σημαντική, αλλά θα πρέπει επίσης να γνωρίζουμε πόσο διαφορετικά αυτή η θέρμανση κατανέμεται σε ολόκληρο τον κόσμο. Σε ορισμένες περιοχές, η θέρμανση είναι πολύ πιο ακραία.

Χάρτης 3: Αύξηση της θερμοκρασίας ^[22]



2.5.2 Πώς αλλάζουν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και οι συγκεντρώσεις

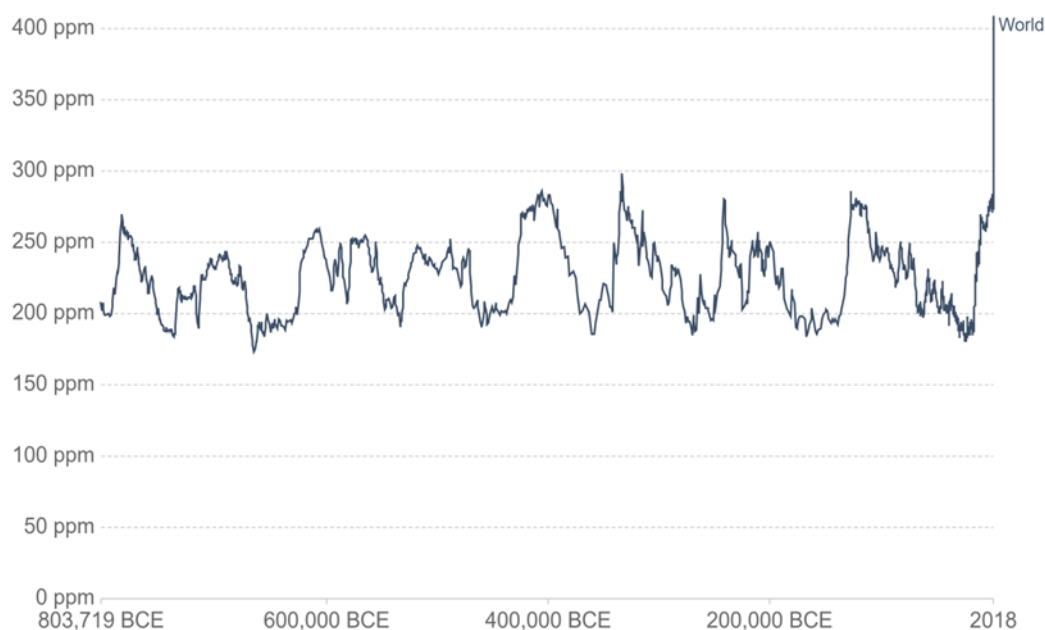
Για να επιβραδύνουμε - με τον τελικό στόχο να σταματήσουμε - τις αυξανόμενες παγκόσμιες θερμοκρασίες, πρέπει να σταθεροποιήσουμε τις συγκεντρώσεις CO₂ και άλλων αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα της Γης.^[24] Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι υπάρχει «υστέρηση» μεταξύ των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων και της τελικής αύξησης της θερμοκρασίας - αυτό σημαίνει ότι όταν καταφέρουμε τελικά να σταθεροποιήσουμε τις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις, οι θερμοκρασίες θα συνεχίσουν να επιβραδύνονται για χρόνια έως δεκαετίες.^{[25][26]}

Όμως, μακριά από τη σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων, τα αέρια του θερμοκηπίου συνεχίζουν να συσσωρεύονται. Στο γράφημα, παρακάτω, βλέπουμε παγκόσμιες μέσες συγκεντρώσεις CO₂ στην ατμόσφαιρα τα τελευταία 800.000 χρόνια. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου βλέπουμε συνεχείς διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις CO₂. Αυτές οι περίοδοι αύξησης και πτώσης του CO₂ συμπίπτουν με την έναρξη των εποχών του πάγου (χαμηλό CO₂) και μεσοπαγετωνική (υψηλό CO₂).^[27] Αυτές οι περιοδικές διακυμάνσεις προκαλούνται από αλλαγές στην τροχιά της Γης γύρω από τον ήλιο - που ονομάζονται κύκλοι Milankovitch.

Κατά τη διάρκεια αυτής της μεγάλης περιόδου, οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις CO₂ δεν ξεπέρασαν, σε περιεκτικότητα, τα 300 ppm . Αυτό άλλαξε με τη Βιομηχανική Επανάσταση και την αύξηση των εκπομπών CO₂ από την καύση ορυκτών καυσίμων. Βλέπουμε μια ραγδαία αύξηση των παγκόσμιων συγκεντρώσεων CO₂ κατά τους τελευταίους αιώνες, και ιδίως τις τελευταίες δεκαετίες. Για πρώτη φορά σε πάνω από 800.000 χρόνια, οι συγκεντρώσεις δεν αυξήθηκαν μόνο πάνω από 300ppm αλλά τώρα είναι πολύ πάνω από 400ppm.

Δεν έχει σημασία μόνο το επίπεδο αλλαγής του CO₂ στην ατμόσφαιρα, αλλά και το ποσοστό που άλλαξε. Οι ιστορικές αλλαγές στις συγκεντρώσεις CO₂ συμβαίνουν κατά τη διάρκεια αιώνων ή και χιλιάδων ετών. Θα χρειαστούν μερικές δεκαετίες για να επιτύχουμε ακόμη μεγαλύτερες αλλαγές. Αυτό δίνει σε οργανισμούς , πλανητικά συστήματα και οικοσυστήματα πολύ λιγότερο χρόνο για προσαρμογή.

Γράφημα 24: Ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις CO₂



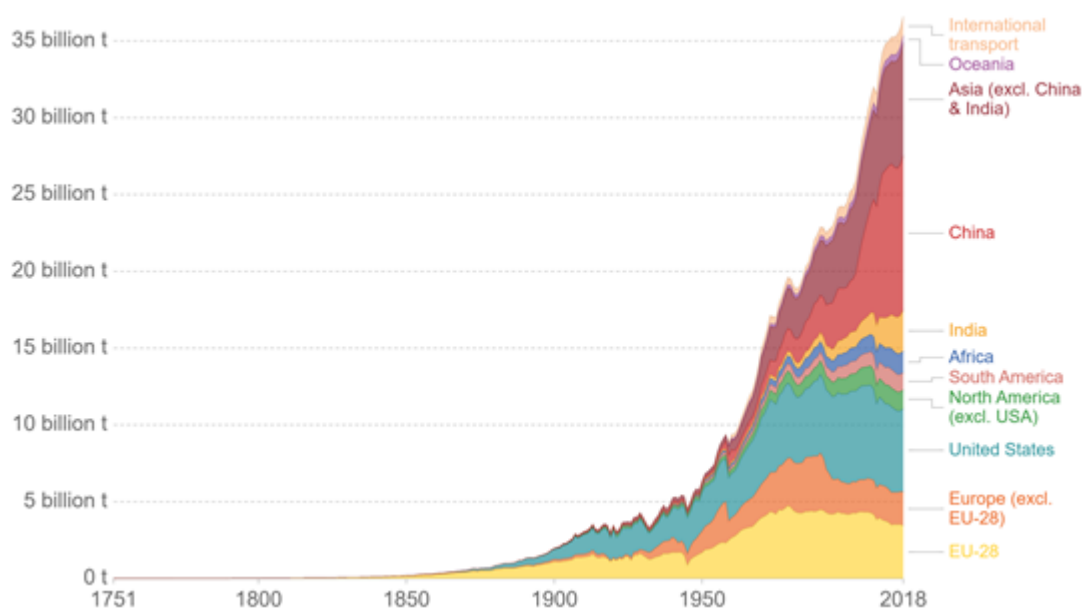
Πηγή : EPICA Dome C CO₂ record (2015) & NOAA (2018)

2.5.3 Οι παγκόσμιες εκπομπές δεν έχουν ακόμη κορυφωθεί

Για να σταθεροποιηθούν (ή ακόμα και να μειωθούν) οι συγκεντρώσεις CO₂ στην ατμόσφαιρα, ο κόσμος πρέπει να επιτύχει καθαρές μηδενικές εκπομπές. Αυτό απαιτεί μεγάλες και γρήγορες μειώσεις των εκπομπών.

Όμως, σε μια εποχή που είναι επιτακτική ανάγκη οι παγκόσμιες εκπομπές να μειωθούν, στην πραγματικότητα εξακολουθούν να αυξάνονται, όπως δείχνει το διάγραμμα παρακάτω.

Γράφημα 25: Ετήσιες συνολικές εκπομπές ανά χώρα



Πηγή : Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) ; Global Carbon Project (GCP)

Οι τρέχουσες πολιτικές για τη μείωση, ή τουλάχιστον την επιβράδυνση της ανάπτυξης των εκπομπών CO₂ και άλλων αερίων θερμοκηπίου θα έχουν κάποια επίδραση στη μείωση της μελλοντικής υπερθέρμανσης.

Όπως βλέπουμε στο διάγραμμα που παρουσιάζεται εδώ, οι τρέχουσες πολιτικές για το κλίμα και την ενέργεια που εφαρμόζονται θα μειώσουν τη θέρμανση σε σχέση με έναν κόσμο χωρίς πολιτικές για το κλίμα. Αυτό το διάγραμμα απεικονίζει μελλοντικά σενάρια εκπομπών αερίων θερμοκηπίου σε μια σειρά υποθέσεων: εάν δεν εφαρμόστηκαν πολιτικές για το κλίμα, εάν συνεχιστούν οι τρέχουσες πολιτικές, εάν όλες οι χώρες πετύχουν τις τρέχουσες

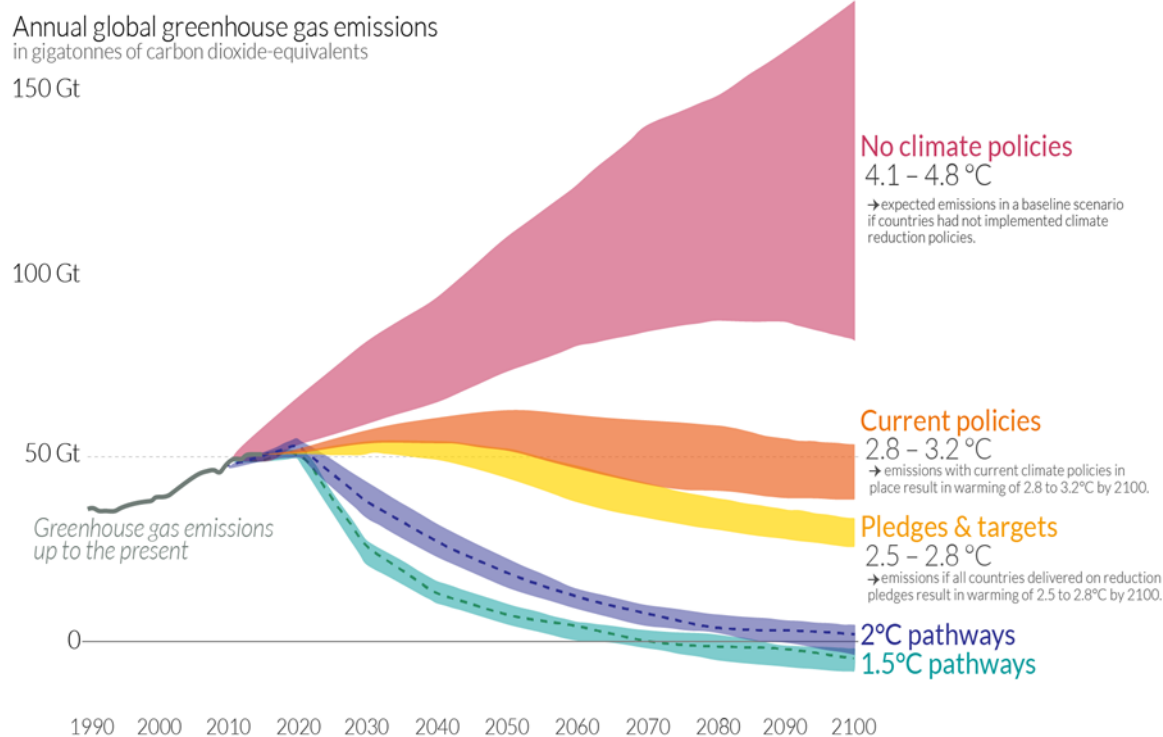
μελλοντικές δεσμεύσεις τους για μείωση των εκπομπών και τα απαραίτητα μονοπάτια που είναι συμβατά με τον περιορισμό της θέρμανσης σε 1,5 ° C ή 2 ° C της θέρμανσης αυτόν τον αιώνα.^[28]

Εάν οι χώρες πετύχουν τις τρέχουσες «δεσμεύσεις» τους (που φαίνονται επίσης στο γράφημα), αυτό θα ήταν μια ακόμη περαιτέρω βελτίωση. Από αυτή την άποψη, ο κόσμος σημειώνει κάποια πρόοδο. Αλλά αν ο στόχος μας είναι να περιορίσουμε τη θέρμανση σε «πολύ κάτω από τους 2 ° C» - όπως ορίζεται στη Συμφωνία του Παρισιού - είμαστε σαφώς πολύ μακριά.

Ο Robbie Andrew, ανώτερος ερευνητής στο Κέντρο Διεθνούς Έρευνας για το Κλίμα (CICERO), χαρτογράφησε τα σενάρια μείωσης των εκπομπών που είναι απαραίτητα για τον περιορισμό της μέσης θέρμανσης του πλανήτη σε 1,5 ° C και 2 ° C. Με βάση την Ειδική Έκθεση της IPCC για τους 1,5 ° C και το έργο του Michael Raupach, που δημοσιεύτηκε στο Nature Climate Change, αυτές οι καμπύλες μετριασμού δείχνουν ότι θα απαιτηθούν επείγουσες και γρήγορες μειώσεις των εκπομπών για την επίτευξη ενός από τους στόχους.^[29,30,31] Και όσο περισσότερο καθυστερούμε στο μέγιστο των εκπομπών, τόσο πιο δραστικές θα έπρεπε να είναι αυτές οι μειώσεις.

Ίσως να σημειώνουμε αργή πρόοδο σε σχέση με έναν κόσμο χωρίς πολιτικές για το κλίμα, αλλά απέχουμε ακόμη μακριά από τα ποσοστά προόδου που πρέπει να επιτύχουμε σε σχέση με τους διεθνείς στόχους.

Γράφημα 26 : Σενάρια για τις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και υπερθέρμανσης



Πηγή : Climatic Action Tracker (based on national policies and pledges as of December 2019

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Καθώς ο κόσμος προσπαθεί να μεταφέρει τα ενεργειακά του συστήματα μακριά από ορυκτά καύσιμα σε πηγές ενέργειας χαμηλών εκπομπών άνθρακα, έχουμε μια σειρά ενεργειακών επιλογών: τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως υδροηλεκτρική ενέργεια, αιολική και ηλιακή, αλλά και πυρηνική ενέργεια. Η πυρηνική ενέργεια και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εκπέμπουν συνήθως πολύ λίγο CO₂ ανά μονάδα παραγωγής ενέργειας, και είναι επίσης πολύ καλύτερες από τα ορυκτά καύσιμα σε περιορισμένα επίπεδα τοπικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Ωστόσο, ενώ ορισμένες χώρες επενδύουν σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση του εφοδιασμού των πυρηνικών εγκαταστάσεων, άλλες περνούν τις εγκαταστάσεις τους εκτός δικτύου. Ο ρόλος, επομένως, που διαδραματίζει η πυρηνική ενέργεια στο ενεργειακό σύστημα είναι πολύ συγκεκριμένος για κάθε χώρα ξεχωριστά.

3.1 Παραγωγή πυρηνική ενέργειας

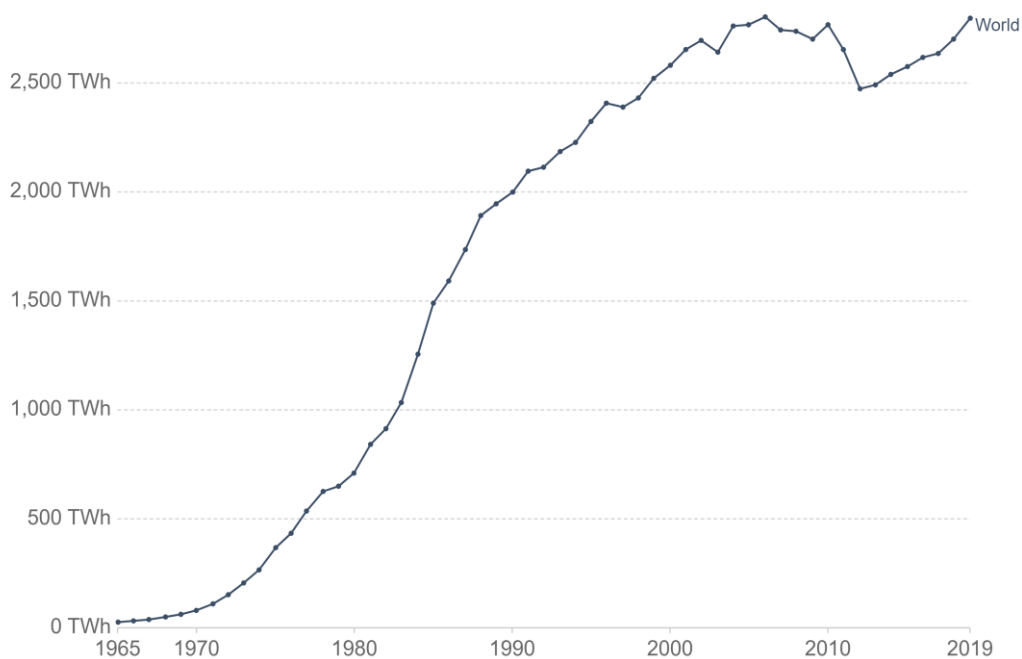
Η πυρηνική ενέργεια - παράλληλα με την υδροηλεκτρική ενέργεια - είναι μια από τις παλαιότερες τεχνολογίες ενέργειας χαμηλών εκπομπών άνθρακα.

Η παραγωγή πυρηνικής ενέργειας υπήρχε από τη δεκαετία του 1960, αλλά σημειώθηκε τεράστια ανάπτυξη παγκοσμίως στις δεκαετίες του 1970, του '80 και του '90. Στο παρακάτω διάγραμμα που εμφανίζεται βλέπουμε πώς έχει αλλάξει η παγκόσμια πυρηνική παραγωγή τον τελευταίο μισό αιώνα.

Μετά την ταχεία ανάπτυξη κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970 έως 1990, η παγκόσμια παραγωγή έχει επιβραδυνθεί σημαντικά. Στην πραγματικότητα, βλέπουμε μια απότομη πτώση της πυρηνικής παραγωγής μετά το τσουνάμι της Φουκουσίμα στην Ιαπωνία το 2011 (εξετάζουμε τις επιπτώσεις αυτής της καταστροφής αργότερα) καθώς οι χώρες έβγαλαν τα εργοστάσια εκτός παραγωγής λόγω ανησυχιών για την ασφάλεια. Ωστόσο, βλέπουμε ότι τα τελευταία χρόνια, παρά αυτό το γεγονός, η παραγωγή αυξήθηκε και πάλι.

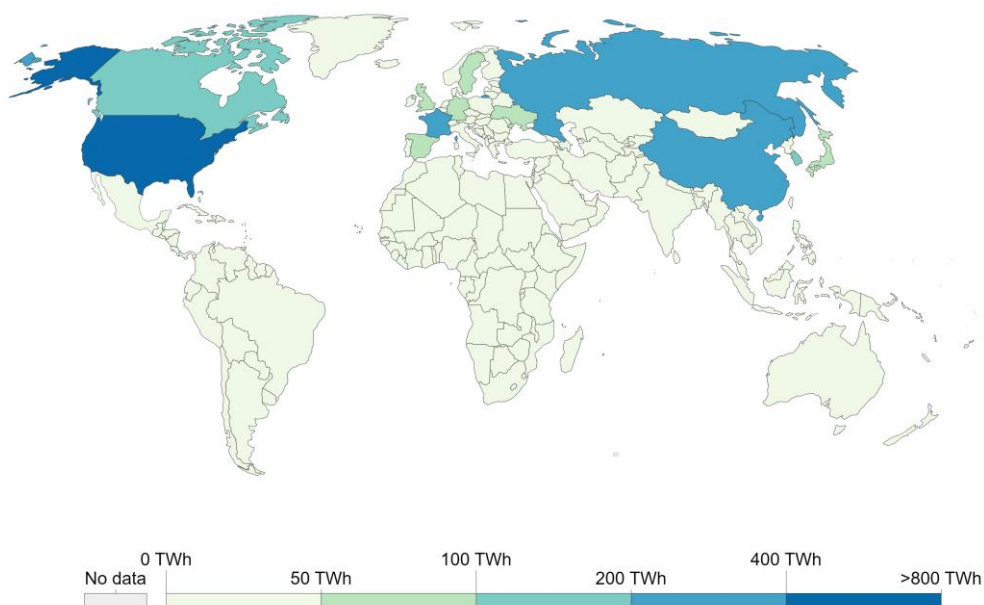
Η παγκόσμια τάση στην παραγωγή πυρηνικής ενέργειας καλύπτει τις μεγάλες διαφορές στο ρόλο που διαδραματίζει σε επίπεδο χώρας. Ορισμένες χώρες δεν λαμβάνουν καθόλου ενέργεια από πυρηνικά - ή σκοπεύουν να την εξαλείψουν εντελώς - ενώ άλλες παίρνουν την πλειοψηφία της δύναμής τους από αυτήν. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η ποσότητα της πυρηνικής ενέργειας που παράγεται από την Γαλλία, τις ΗΠΑ, την Κίνα, την Ρωσία και τον Καναδά, που παράγουν σχετικά μεγάλες ποσότητες πυρηνικής ενέργειας.

Γράφημα 27 : Παγκόσμια παραγωγή πυρηνικής ενέργειας



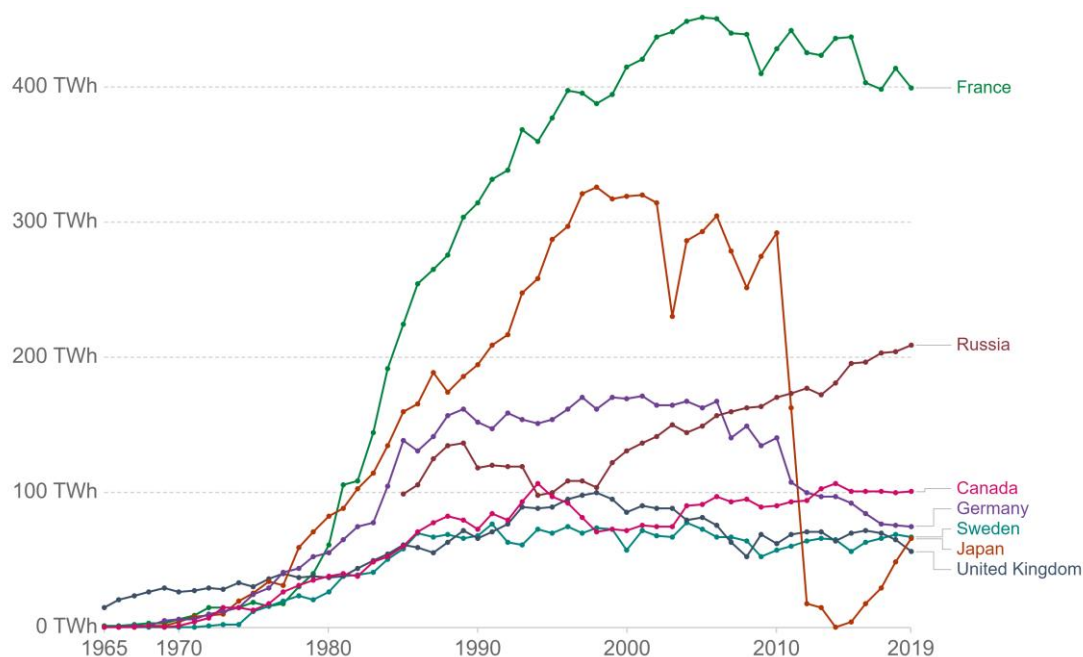
Πηγή: BP Statistical Review of World Energy and Ember

Χάρτης 4 : Παραγωγή πυρηνικής ενέργειας



Πηγή : BP Statistical Review of World Energy and Ember

Γράφημα 28 : Παραγωγή πυρηνικής ενέργειας



Πηγή : BP Statistical Review of World Energy and Ember

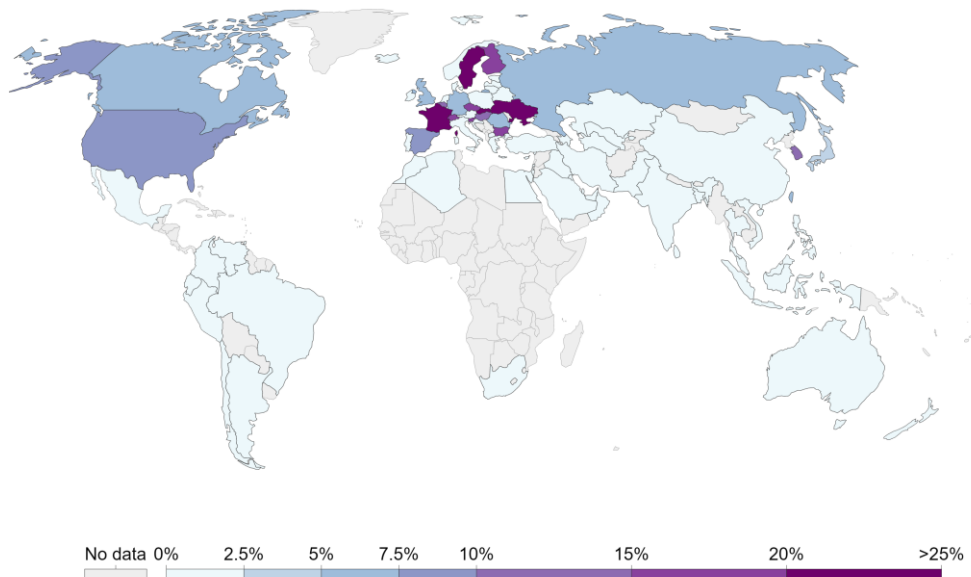
3.2 Μείγμα πυρηνικής και ηλεκτρικής ενέργειας

Εξετάσαμε προηγουμένως την πυρηνική παραγωγή σε όρους ενεργειακών μονάδων – πόσο παράγει κάθε χώρα σε terawatt-ώρες. Αλλά για να καταλάβουμε πόσο μεγάλο ρόλο παίζει η πυρηνική ενέργεια στο ενεργειακό σύστημα πρέπει να το μελετήσουμε ως συνολική κατανάλωση ενέργειας.

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται το μερίδιο της πρωτογενούς ενέργειας που προέρχεται από πυρηνικές πηγές. Να σημειωθεί ότι αυτά τα δεδομένα βασίζονται στην πρωτογενή ενέργεια που υπολογίζεται με τη «μέθοδο υποκατάστασης», η οποία επιχειρεί να διορθώσει τις ανεπάρκειες στην παραγωγή από τα ορυκτά καύσιμα. Αυτό το κάνει μετατρέποντας πηγές μη ορυκτών καυσίμων στα «ισοδύναμα εισόδου» τους: δηλαδή την ποσότητα πρωτογενούς ενέργειας που θα απαιτούσε για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ενέργειας εάν προερχόταν από ορυκτά καύσιμα.

Το 2019, λίγο περισσότερο από το 4% της παγκόσμιας πρωτογενούς ενέργειας προήλθε από την πυρηνική ενέργεια. Να σημειωθεί ότι αυτό βασίζεται στο μερίδιο της πυρηνικής ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα. Η κατανάλωση ενέργειας αντιπροσωπεύει το άθροισμα της ηλεκτρικής ενέργειας, των μεταφορών και της θέρμανσης. Εξετάζουμε το μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας παρακάτω.

Χάρτης 5: Μερίδιο πρωτογενούς παραγωγής ενέργειας από πυρηνικά



Πηγή : BP Statistical Review of World Energy (2020)

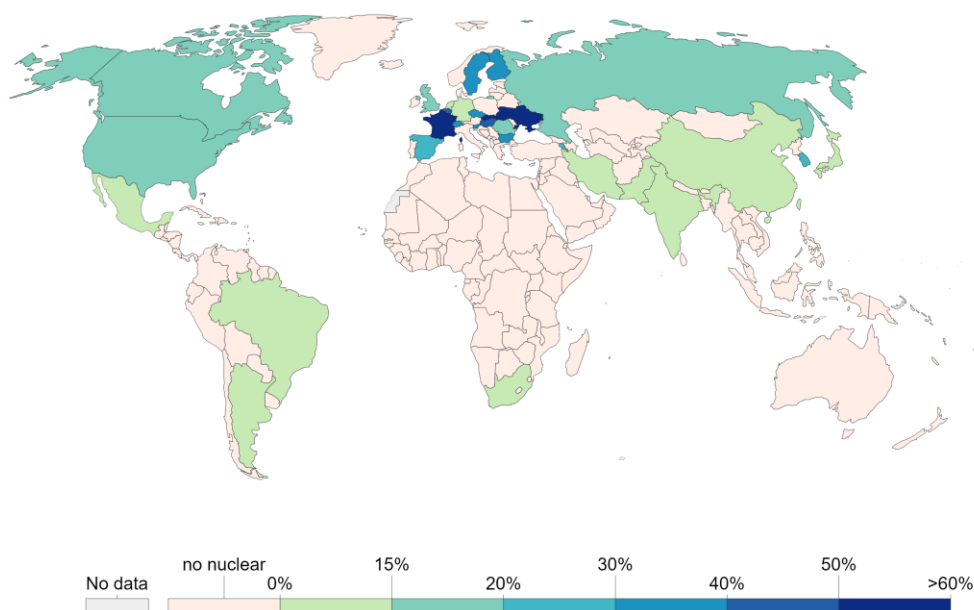
3.2.1 Μερίδιο ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από πυρηνικά

Στις παραπάνω ενότητες εξετάσαμε το ρόλο του πυρηνικού στο συνολικό ενεργειακό μείγμα. Αυτό περιλαμβάνει όχι μόνο ηλεκτρική ενέργεια, αλλά και μεταφορά και θέρμανση. Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μόνο ένα συστατικό της κατανάλωσης ενέργειας.

Δεδομένου ότι οι μεταφορές και η θέρμανση τείνουν να είναι πιο δύσκολο να απαλλαχθούν από τον άνθρακα - εξαρτώνται περισσότερο από το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο - η πυρηνική ενέργεια και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας τείνουν να έχουν μεγαλύτερο μερίδιο στο μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με το συνολικό ενεργειακό μείγμα.

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται το μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από πυρηνικές πηγές. Σε παγκόσμιο επίπεδο, περίπου το 10% της ηλεκτρικής ενέργειάς μας προέρχεται από πυρηνικά. Ωστόσο, ορισμένες χώρες βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην πυρηνική ενέργεια, όπως για παράδειγμα περισσότερο από το 70% της ηλεκτρικής ενέργειας στη Γαλλία και περισσότερο από το 40% στη Σουηδία προέρχονται από πυρηνικά.

Χάρτης 6: Μερίδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικά, 2019



Πηγή : BP Statistical Review of World Energy (2020)

3.3 Η πιο ασφαλή πηγής ενέργειας

Πριν από δύο αιώνες ανακαλύψαμε πώς να χρησιμοποιούμε την ενέργεια από ορυκτά καύσιμα για να κάνουμε τη δουλειά μας πιο παραγωγική. Ήταν η καινοτομία που ξεκίνησε τη Βιομηχανική Επανάσταση. Έκτοτε, η αυξανόμενη διαθεσιμότητα φθηνής ενέργειας αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της προόδου που έχουμε δει τους τελευταίους αιώνες. Έχει επιτρέψει στην εργασία να γίνει πιο παραγωγική και οι άνθρωποι στις βιομηχανικές χώρες είναι πολύ πιο πλούσιοι από τους προγόνους τους, εργάζονται πολύ λιγότερο και απολαμβάνουν πολύ καλύτερες συνθήκες διαβίωσης από ποτέ. Η πρόσβαση στην ενέργεια είναι επομένως μία από τις θεμελιώδεις κινητήριες δυνάμεις της ανάπτυξης. Τα Ηνωμένα Έθνη ορθώς λένε ότι «η ενέργεια είναι το επίκεντρο για σχεδόν κάθε μεγάλη πρόκληση και ευκαιρία που αντιμετωπίζει ο κόσμος σήμερα».

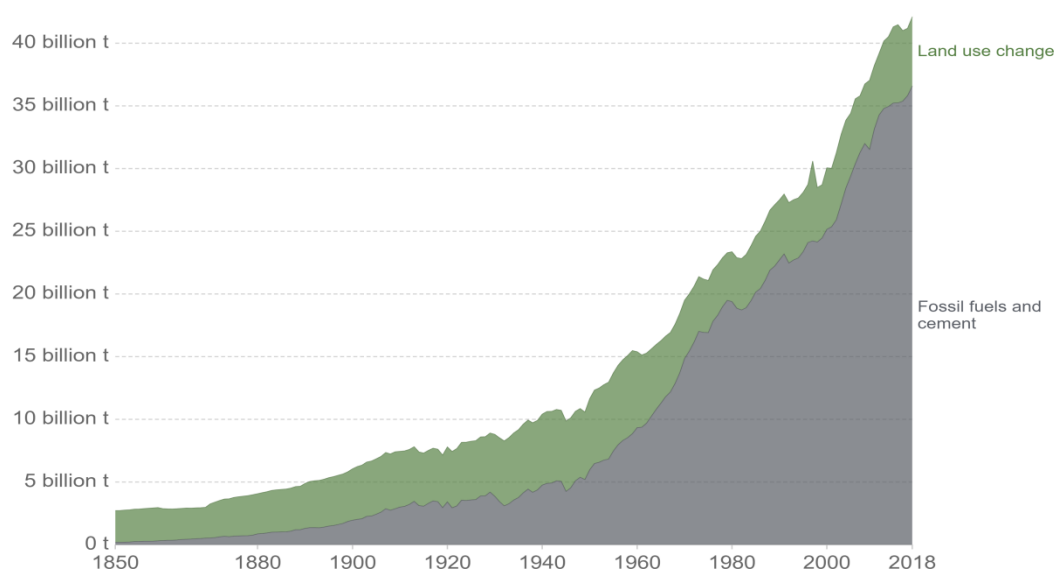
Όμως, ενώ η ενέργεια από ορυκτά καύσιμα έφερε πολλά οφέλη, δυστυχώς έχει επίσης σημαντικές αρνητικές συνέπειες. Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες αρνητικών συνεπειών.

Η πρώτη είναι η ατμοσφαιρική ρύπανση: τουλάχιστον πέντε εκατομμύρια άνθρωποι πεθαίνουν πρόωρα κάθε χρόνο ως αποτέλεσμα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ^[32] Τα ορυκτά καύσιμα και η καύση βιομάζας - ξύλο, κοπριά και κάρβουνο - ευθύνονται για τους περισσότερους από αυτούς τους θανάτους. Η εξάλειψη των ορυκτών καυσίμων θα μπορούσε να μειώσει τους πρόωπους θανάτους από την ατμοσφαιρική ρύπανση κατά περίπου δύο τρίτα. Αυτό είναι τρία έως τέσσερα εκατομμύρια θάνατοι το χρόνο. ^[33]

Η δεύτερη είναι τα ατυχήματα. Αυτό περιλαμβάνει ατυχήματα που συμβαίνουν στην εξόρυξη καυσίμων (άνθρακας, ουράνιο, σπάνια μέταλλα, πετρέλαιο και φυσικό αέριο), και περιλαμβάνει ατυχήματα που συμβαίνουν κατά τη μεταφορά πρώτων υλών και υποδομών, την κατασκευή του σταθμού παραγωγής ενέργειας ή την ανάπτυξή τους.

Η τρίτη είναι οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου: τα ορυκτά καύσιμα είναι η κύρια πηγή αερίων του θερμοκηπίου, ο πρωταρχικός μοχλός της κλιματικής αλλαγής. Το 2018, το 87% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ προήλθαν από τα ορυκτά καύσιμα και τη βιομηχανία.

Γράφημα 29: Παγκόσμια εκπομπή αερίων διοξειδίου του άνθρακα



Πηγή: Global Carbon Project (GCP)

Όλες οι πηγές ενέργειας έχουν αρνητικές επιπτώσεις, αλλά διαφέρουν πάρα πολύ στο μέγεθος τους. Όπως θα δούμε, και στις τρεις πτυχές, τα ορυκτά καύσιμα είναι τα πιο βρώμικα και πιο επικίνδυνα, ενώ οι πυρηνικές και σύγχρονες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι πολύ ασφαλέστερες και καθαρότερες.

Από την προοπτική τόσο της ανθρώπινης υγείας όσο και της κλιματικής αλλαγής, έχει λιγότερη σημασία εάν μεταβαίνουμε στην πυρηνική ενέργεια ή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και περισσότερο ότι σταματάμε να βασιζόμαστε στα ορυκτά καύσιμα.

3.3.1 Η πυρηνική ενέργεια και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι πολύ πιο ασφαλείς από τα ορυκτά καύσιμα

Σήμερα το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα κυριαρχείται από ορυκτά καύσιμα, παραδοσιακή βιομάζα, υδροηλεκτρική ενέργεια και πυρηνική ενέργεια.^[34] Ωστόσο, οι σύγχρονες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, αναπτύσσονται και περιμένουμε να διαδραματίσουν αυξανόμενο ρόλο στα ενεργειακά μας συστήματα τις επόμενες δεκαετίες. Καθώς μεταβαίνουμε στα ενεργειακά μας συστήματα, πρέπει να πάρουμε αποφάσεις που αφορούν για το ποιές πηγές θα επιλέξουμε. Οι ανησυχίες για την ασφάλεια πρέπει να είναι ένας βασικός παράγοντας που πρέπει να λάβουμε υπόψη.

Οι Anil Markandya και Paul Wilkinson (2007) δημοσίευσαν μια ανάλυση στο ιατρικό περιοδικό The Lancet, το οποίο συνέκρινε τα ποσοστά θανάτου από ορυκτά καύσιμα, πυρηνικά, υδροηλεκτρικά και βιομάζα. Σε αυτή τη μελέτη εξέτασαν θανάτους από ατυχήματα - όπως πυρηνική καταστροφή στο Τσερνομπίλ - επαγγελματικά ατυχήματα σε εργασίες εξόρυξης ή ηλεκτροπαραγωγής, καθώς και πρόωρους θανάτους από ατμοσφαιρική ρύπανση.^[35] Όταν δημοσίευσαν το άρθρο, οι σύγχρονες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είχαν ακόμη ένα πολύ μικρό ποσοστό στην παραγωγή ενέργειας και δεν συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση. Στοιχεία για την ασφάλεια των ανανεώσιμων πηγών δημοσιεύθηκαν σε μια μελέτη του Benjamin Sovacool και των συναδέλφων του (2016).^{[36][37]} Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα αυτών των μελετών μπορούμε να συγκρίνουμε τα ποσοστά θανάτου από όλες τις πηγές ενέργειας.

Παρακάτω θα αναφερθεί λεπτομερέστερα πώς προέκυψαν τα ποσοστά θανάτου από την πυρηνική ενέργεια. Συνοψίζοντας, τα ποσοστά θανάτου για την πυρηνική ενέργεια περιλαμβάνουν περίπου 4000 θανάτους από την καταστροφή του Τσερνομπίλ του 1986 στην Ουκρανία (βάσει εκτιμήσεων του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας)^[38], 574 θάνατοι από τη Φουκουσίμα (ένας εργαζόμενος και 573 έμμεσοι θάνατοι από το άγχος της εκκένωσης). Και μερικοί επαγγελματικοί θάνατοι (κυρίως από εξόρυξη και άλεση), όπως παρέχονται από τους Markandya και Wilkinson (2007).

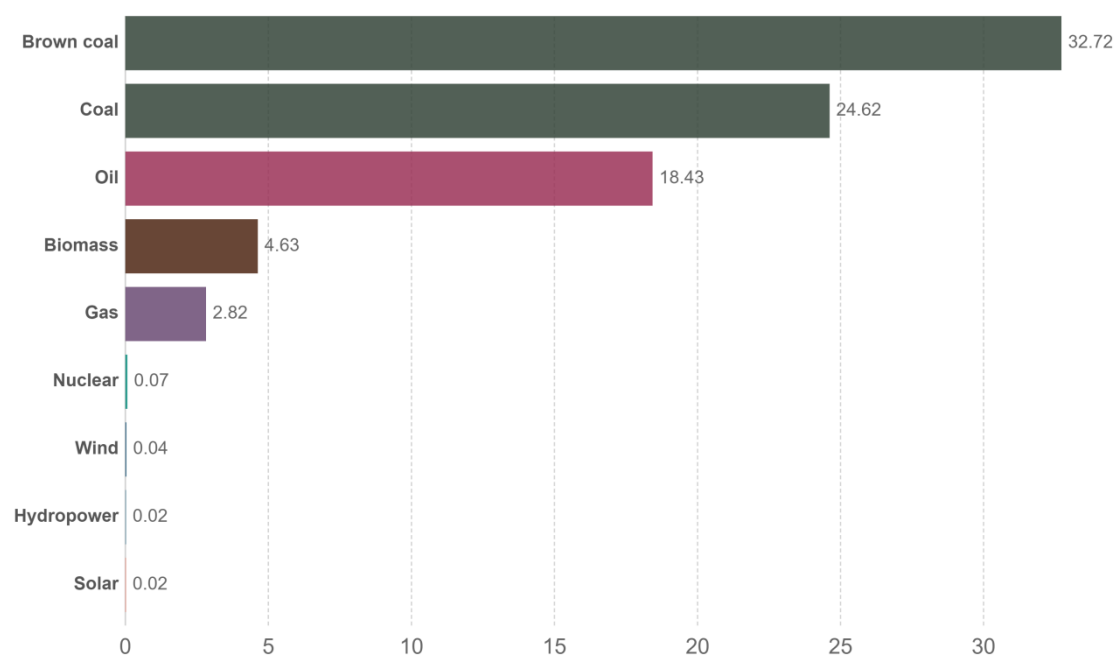
Στο γράφημα βλέπουμε τα ποσοστά θανάτου του καθενός - δεδομένου του αριθμού των θανάτων ανά terawatt-ώρες ενέργειας. Μια ενέργεια terawatt-hour είναι περίπου η ίδια με την ετήσια κατανάλωση ενέργειας 27.000 πολιτών στην Ευρωπαϊκή Ένωση.³

Βλέπουμε τεράστιες διαφορές στα ποσοστά θνησιμότητας πυρηνικών και σύγχρονων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα.

Η πυρηνική ενέργεια, για παράδειγμα, έχει ως αποτέλεσμα 99,8% λιγότερους θανάτους από τον λιγνίτη, 99,7% λιγότερα από τον άνθρακα, 99,6% λιγότερα από το πετρέλαιο και 97,5% λιγότερα από το φυσικό αέριο. Ο άνεμος, η ηλιακή και η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι ακόμα πιο ασφαλείς.

³ Η μέση κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας στην ΕΕ το 2015 ήταν 37.298 kilowatt-hour (kWh). Μία ώρα terawatt (που ισοδυναμεί με 1 δισεκατομμύριο kWh) είναι επομένως η ετήσια κατανάλωση ενέργειας [1 × 10⁹ kWh / 37.298 = 26.811 πολίτες της ΕΕ]

Γράφημα 30: Ποσοστά θανάτου από παραγωγή πυρηνικής ενέργειας ανά TWh



Πηγή : Markandya & Wilkinson (2007) ; Sovacool et al. (2006)

Η εξέταση των θανάτων ανά terawatt-hour ίσως να φαίνεται λίγο αφηρημένη. Ας προσπαθήσουμε λοιπόν να το θέσουμε σε μικροσκοπική κλίμακα.

Ας εξετάσουμε πόσους θανάτους θα προκαλούσε κάθε πηγή ενέργειας για μια μέση πόλη 27.000 ανθρώπων στην Ευρώπη, η οποία καταναλώνει μία terawatt-hour ετησίως. Ας ονομάσουμε αυτήν την πόλη «Euroville».

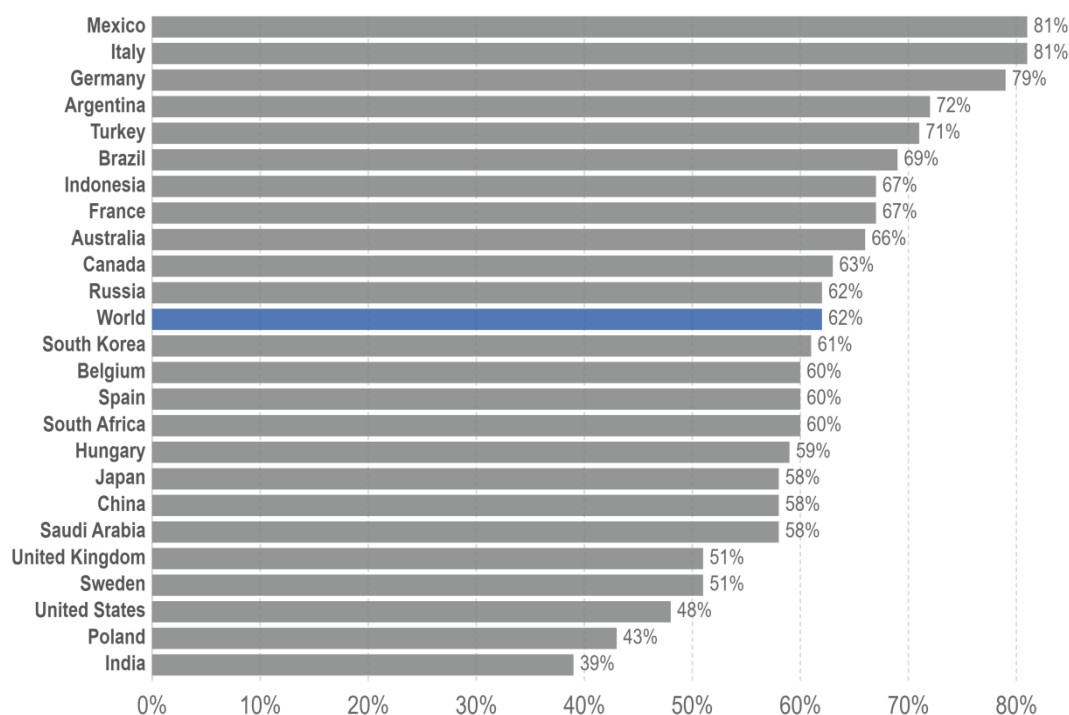
Εάν η Euroville τροφοδοτείται πλήρως από άνθρακα, θα περιμέναμε 25 άτομα να πεθαίνουν πρόωρα κάθε χρόνο ως αποτέλεσμα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Έτσι συγκρίνεται η Euroville με άνθρακα με τις πόλεις που τροφοδοτούνται από άλλες πηγές ενέργειας:

- Άνθρακας: 25 άνθρωποι πεθαίνουν πρόωρα κάθε χρόνο.
- Πετρέλαιο : 18 άνθρωποι πεθαίνουν πρόωρα κάθε χρόνο
- Αέριο: 3 άνθρωποι πεθαίνουν πρόωρα κάθε χρόνο.
- Πυρηνική : Σε ένα μέσο χρόνο κανείς δεν θα πεθάνει. Ένα ποσοστό θανάτου 0,07 θανάτων ανά terawatt-ώρα σημαίνει ότι θα χρειαστούν 14 χρόνια για να πεθάνει ένα άτομο.
- Άνεμος: Σε ένα μέσο χρόνο κανείς δεν θα πεθάνει - θα χρειαστούν 29 χρόνια για να πεθάνει κάποιος.

- Υδροηλεκτρική ενέργεια: Κατά μέσο όρο, κανένας δεν θα πεθάνει - θα χρειαστούν 42 χρόνια για να πεθάνει κάποιος
- Ηλιακή : Σε ένα μέσο χρόνο κανείς δεν θα πεθάνει - μόνο κάθε 53 χρόνια μπορεί να πεθάνει κάποιος.

Σε αντίθεση με τη δημοφιλή πεποίθηση, η πυρηνική ενέργεια έχει σώσει ζωές αντικαθιστώντας τα ορυκτά καύσιμα. Τα ορυκτά καύσιμα σκοτώνουν πολύ περισσότερους ανθρώπους από την πυρηνική ενέργεια. Το έχουμε δει από την παραπάνω σύγκριση. Αυτό προκαλεί έκπληξη σε πολλούς ανθρώπους, επειδή πολλοί έχουν σημαντικές αναμνήσεις για τις δύο μεγάλες πυρηνικές καταστροφές στην ιστορία: Τσερνομπίλ και Φουκουσίμα. Δυστυχώς, η κοινή γνώμη για την πυρηνική ενέργεια τείνει να είναι πολύ αρνητική.

Γράφημα 31 : Κοινή γνώμη για την πυρηνική ενέργεια



Πηγή : Ipsos MORI

Παρακάτω εξετάζουμε τον αριθμό των νεκρών του Τσερνομπίλ και της Φουκουσίμα. Αλλά σε αυτό το στάδιο πρέπει να συνοψίσουμε πώς υπολογίστηκαν τα ποσοστά θανάτου για την πυρηνική ενέργεια.

Όταν έγινε προσπάθεια να συνδυαστούν οι δύο αναλύσεις που αναφέρθηκαν νωρίτερα, ένα ζήτημα που προέκυψε είναι ότι καμία μελέτη δεν περιλαμβάνει και τα δύο μεγάλα πυρηνικά ατυχήματα στο ποσοστό του θανάτου της : οι Markandya και Wilkinson (2007) δημοσίευσαν το άρθρο τους πριν από την καταστροφή της Φουκουσίμα το 2011 και ο Sovacool et al.

(2016) εξετάζει μόνο τα ποσοστά θανάτων από το 1990 και συνεπώς δεν συμπεριλαμβάνει το ατύχημα του Τσερνομπίλ του 1986. Συνεπώς, ανακατασκευάστηκαν τα ποσοστά θανάτου για την πυρηνική ενέργεια ώστε να συμπεριληφθούν και τα δύο αυτά τρομερά ατυχήματα.

Για το Τσερνομπίλ, υπάρχουν αρκετές εκτιμήσεις θανάτων. Βασιζόμαστε στην εκτίμηση που δημοσιεύθηκε από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας αν και αυτό θεωρείται υπερβολικά υψηλό από αρκετούς ερευνητές, συμπεριλαμβανομένης μιας μεταγενέστερης έκθεσης της Επιστημονικής Επιτροπής των Ηνωμένων Εθνών για τις επιπτώσεις της ατομικής ακτινοβολίας (UNSCEAR).^[39] Ο Π.Ο.Υ. εκτιμά ότι 4000 άνθρωποι έχουν πεθάνει ή θα πεθάνουν από την καταστροφή του Τσερνομπίλ. Αυτό περιλαμβάνει το θάνατο 31 ατόμων ως άμεσο αποτέλεσμα της καταστροφής και εκείνων που αναμένεται να πεθάνουν αργότερα από καρκίνο λόγω έκθεσης σε ακτινοβολία.

Η καταστροφή στη Φουκουσίμα σκότωσε 574 άτομα. Το 2018, η ιαπωνική κυβέρνηση ανέφερε ότι από τότε ένας εργαζόμενος πέθανε από καρκίνο του πνεύμονα ως αποτέλεσμα της έκθεσης σε ακτινοβολία. Κανείς δεν πέθανε άμεσα από την καταστροφή της Φουκουσίμα. Αντ' αυτού, οι περισσότεροι άνθρωποι πέθαναν ως αποτέλεσμα των διαδικασιών εκκένωσης. Σύμφωνα με τις ιαπωνικές αρχές 573 άνθρωποι πέθαναν λόγω των επιπτώσεων της εκκένωσης και του άγχους.^[40]

Στον αριθμό θανάτου των δύο πυρηνικών καταστροφών της ιστορίας, προσθέσαμε το ποσοστό θανάτου που εκτιμήθηκαν από τους Markandya και Wilkinson (2007) για εργασιακούς θανάτους, κυρίως από άλεση και εξόρυξη. Το δημοσιευμένο ποσοστό τους είναι 0,022 θάνατοι ανά TWh.

Το άθροισμα αυτών των τριών σημείων δεδομένων μας δίνει ένα ποσοστό θανάτου 0,07 θανάτων ανά TWh. Θα μπορούσαμε να το θεωρήσουμε ως ανώτερη εκτίμηση. Ο εκτιμώμενος αριθμός θανάτων από το Τσερνομπίλ βασίζεται στην αξιολόγηση 2005/06 από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, η οποία εφαρμόζει μια πολύ συντηρητική μεθοδολογία που ονομάζεται γραμμικό μοντέλο χωρίς όριο, στο οποίο θα αναφερθούμε στο παρακάτω κεφάλαιο. Μια μεταγενέστερη έκθεση της επιστημονικής επιτροπής των Ηνωμένων Εθνών για τις επιπτώσεις της ατομικής ακτινοβολίας (UNSCEAR) υποδηλώνει ότι αυτό υπερεκτιμά τον κίνδυνο θανάτων που σχετίζονται με την ακτινοβολία.^[41]

Ακόμη και με αυτό το ανώτερο σχήμα, η πυρηνική ενέργεια έχει πολύ χαμηλότερο ποσοστό θανάτου από τα ορυκτά καύσιμα - 350 φορές χαμηλότερο από τον άνθρακα. Παρ' όλα αυτά, οι πολιτικοί έχουν γυρίσει την πλάτη τους, σε πολλές χώρες, στην πυρηνική ενέργεια.

3.3.2 Οι σύγχρονες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η πυρηνική ενέργεια δεν είναι μόνο ασφαλέστερες αλλά και καθαρότερες από τα ορυκτά καύσιμα

Μέχρι στιγμής έχουμε εξετάσει μόνο τις βραχυπρόθεσμες επιπτώσεις στην υγεία αυτών των πηγών ενέργειας. Αλλά πρέπει επίσης να λάβουμε υπόψη τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις τους στην κλιματική αλλαγή.

Υπάρχουν πραγματικά πολύ καλά νέα εδώ, οι ασφαλέστερες πηγές για εμάς σήμερα είναι οι ίδιες πηγές που έχουν την μικρότερη επίδραση στο κλίμα. Μερικές φορές οι λύσεις στα μεγάλα παγκόσμια ζητήματα που αντιμετωπίζουμε έρχονται με αντισταθμίσεις, αλλά όχι εδώ. Είτε ανησυχούμε για τους ανθρώπους που πεθαίνουν τώρα ή για το μέλλον του πλανήτη, θα χρειαστούμε τις ίδιες πηγές ενέργειας.

Το παρακάτω γράφημα μας δείχνει ακριβώς αυτό. Στα αριστερά έχουν σχεδιαστεί τα ποσοστά θανάτου ανά μονάδα ενεργειακών δεδομένων που εξετάσαμε προηγουμένως και στα δεξιά βλέπουμε τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά μονάδα ενέργειας. Αυτό το μέτρο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου λαμβάνει υπόψη το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής. Τα στοιχεία για τις ανανεώσιμες τεχνολογίες, για παράδειγμα, λαμβάνουν υπόψη το αποτύπωμα των πρώτων υλών, των μεταφορών και της κατασκευής τους. Έχουν υιοθετηθεί αυτά τα στοιχεία όπως αναφέρονται στην 5η Έκθεση Αξιολόγησης της IPCC και πιο πρόσφατα στοιχεία του κύκλου ζωής των Pehl et al. (2017), που δημοσιεύθηκε στο Nature.^{[42][43][44]}

Ο κόσμος δεν αντιμετωπίζει συμβιβασμούς - οι ασφαλέστερες πηγές ενέργειας είναι επίσης οι λιγότερο ρυπογόνες. Αυτό το βλέπουμε από τη συμμετρία του γραφήματος. Ο άνθρακας προκαλεί τις περισσότερες βλάβες και στις δύο μετρήσεις: έχει σοβαρό κόστος υγείας με τη μορφή ατμοσφαιρικής ρύπανσης και ατυχημάτων και εκπέμπει μεγάλες ποσότητες εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Το πετρέλαιο, έπειτα το φυσικό αέριο, είναι καλύτερα από τον άνθρακα, αλλά εξακολουθούν να είναι πολύ χειρότερα από την πυρηνική και τις ανανεώσιμες πηγές και στις δύο περιπτώσεις.

Η πυρηνική, η αιολική, η υδροηλεκτρική και η ηλιακή ενέργεια πέφτουν στο κάτω μέρος του γραφήματος και στις δύο μετρήσεις. Είναι όλα πολύ πιο ασφαλείς όσον αφορά τα ατυχήματα και την ατμοσφαιρική ρύπανση και είναι επιλογές χαμηλών εκπομπών άνθρακα.

Δυστυχώς, εξακολουθούν να αντιπροσωπεύουν ένα πολύ μικρό μερίδιο της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας - λιγότερο από το 10% της πρωτογενούς ενέργειας. Το μερίδιο κάθε πηγής στην παγκόσμια παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας το 2019 (συμπεριλαμβανομένης της παραδοσιακής βιομάζας στο σύνολο) εμφανίζεται στο κέντρο. Τα ορυκτά καύσιμα έχουν κυριαρχήσει μέχρι τώρα στα ενεργειακά μας συστήματα για δύο λόγους: ξεκίνησαν τη Βιομηχανική Επανάσταση και έκτοτε μεγάλο μέρος της ενεργειακής μας υποδομής έχει χτιστεί γύρω τους. Αυτή η πρώιμη επένδυση σε ορυκτά καύσιμα σημαίνει ότι για πολύ καιρό ήταν σχετικά φθηνή - φθηνότερη από πολλές σύγχρονες ανανεώσιμες πηγές. Αλλά σήμερα, αν λάβουμε υπόψη το συνολικό κόστος των ορυκτών καυσίμων - όχι μόνο το ενεργειακό

κόστος αλλά και το κοινωνικό κόστος για την υγεία και το περιβάλλον μας - είναι πολύ πιο ακριβό από τις εναλλακτικές λύσεις.

Ευτυχώς, οι καθαρές και ασφαλείς ανανεώσιμες τεχνολογίες καθίστανται οικονομικά ανταγωνιστικές από μόνες τους. Η τιμή αγοράς τόσο της ηλιακής όσο και της αιολικής ενέργειας πέφτει γρήγορα, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει πραγματική πιθανότητα αλλαγής.

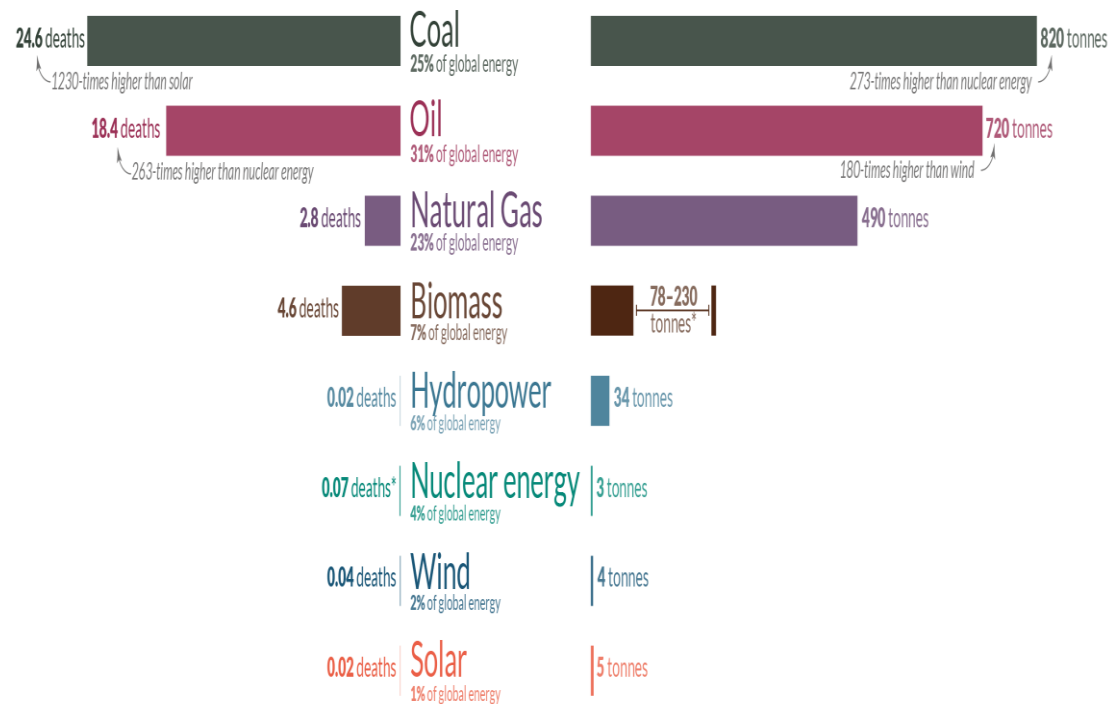
Υπάρχει έντονη συζήτηση σχετικά με το ποιες ενεργειακές τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα πρέπει να ακολουθήσουμε. Αλλά με βάση τρία βασικά ερωτήματα - ανθρώπινη υγεία, ασφάλεια και αποτύπωμα άνθρακα - οι πυρηνικές και σύγχρονες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι σαφώς καλύτερες. Ορισμένες μελέτες έχουν βρει ότι υπάρχουν μεγάλα οφέλη για την ανθρώπινη υγεία και ασφάλεια κατά τη μετάβαση μακριά από τα ορυκτά καύσιμα, ανεξάρτητα από το αν θα αντικατασταθούν από την πυρηνική ενέργεια ή τις ανανεώσιμες πηγές.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση που προκαλούν τα ορυκτά καύσιμα σκοτώνει εκατομμύρια ανθρώπους κάθε χρόνο και θέτει σε κίνδυνο πολλούς άλλους καθώς και ενέχει μελλοντικούς κινδύνους ως προς την κλιματική αλλαγή. Πρέπει να απομακρυνθούμε από αυτούς. Και μπορούμε και έχουμε καλύτερες εναλλακτικές λύσεις.

Γράφημα 32 : Ασφαλέστερη και καθαρότερη πηγή ενέργειας

Στα αριστερά βρίσκονται οι θάνατοι από ατυχήματα και την ατμοσφαιρική ρύπανση

Στα δεξιά βρίσκεται οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου



Πηγή : Death rates from Markandya & Wilkinson (2007) in The Lancet , and Sovacool et al. (2016) in Journal of Cleaner Production; Greenhouse gas emission factors from IPCC AR5 (2014) and Pehl et al. (2017) in Nature; Energy shares from BP(2019) and Smil (2017)

3.3.3. Η πυρηνική ενέργεια σώζει ζωές

Όταν οι άνθρωποι συζητούν για την ασφάλεια της πυρηνικής ενέργειας, συχνά εστιάζουν στον αριθμό των θανάτων που προκάλεσε. Αλλά όπως είδαμε προηγουμένως, τα πυρηνικά είναι μια από τις ασφαλέστερες και καθαρότερες πηγές ενέργειας, ανά μονάδα ενέργειας οδηγεί σε εκατοντάδες λιγότερους θανάτους από τον άνθρακα, το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο και είναι συγκρίσιμο με τις σύγχρονες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή ή η αιολική ενέργεια.

Με αυτό το σκεπτικό ίσως πρέπει να αναρωτηθούμε: «Πόσες ζωές έχει σώσει η πυρηνική ενέργεια;» ή «Πόσες ζωές θα μπορούσαν να είχαν σωθεί εάν οι χώρες δεν την είχαν εγκαταλείψει;»

Μετά την πυρηνική καταστροφή της Φουκουσίμα το 2011, η Γερμανία ανακοίνωσε σχέδια για σταδιακή κατάργηση της παραγωγής πυρηνικής ενέργειας. Κατά την περίοδο από το 2011 έως το 2017 έκλεισε 10 από τις 17 πυρηνικές εγκαταστάσεις της και σκοπεύει να κλείσει τους εναπομείναντες αντιδραστήρες το 2022.^[45]

Η μη αντικατάσταση της πυρηνικής ενέργειας με ορυκτά καύσιμα σκοτώνει ανθρώπους. Αυτό φαίνεται να συμβαίνει στο πρόσφατο παράδειγμα της Γερμανίας. Το μεγαλύτερο μέρος του ενεργειακού ελλείμματος της Γερμανίας από τη διάλυση της πυρηνικής ενέργειας πληρώθηκε από την αυξημένη παραγωγή άνθρακα - η οποία, όπως μόλις είδαμε, είναι η πιο ρυπογόνα πηγή με τις μεγαλύτερες επιπτώσεις στην υγεία. Η ανάλυση των Stephen Jarvis, Olivier Deschenes και Akshaya Jha (2020) εκτιμά ότι η πυρηνική κατάργηση της Γερμανίας στοιχίζει περισσότερους από 1.100 επιπλέον θανάτους κάθε χρόνο ως αποτέλεσμα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.^[23]

Σε μια μελέτη που δημοσιεύθηκε στο περιοδικό Environmental Science and Technology, οι Pushker Kharecha και James Hansen (2013) στόχευαν να απαντήσουν στο ερώτημα «πόσες ζωές έχει σώσει η πυρηνική ενέργεια».^[46] Ανέλυσαν πόσοι περισσότεροι άνθρωποι θα είχαν πεθάνει κατά την περίοδο από το 1971 έως το 2009 εάν η πυρηνική ενέργεια είχε αντικατασταθεί πλήρως από ορυκτά καύσιμα. Ο αριθμός των θανάτων θα εξαρτιόταν από το μείγμα των ορυκτών καυσίμων που θα χρησιμοποιούνταν για την αντικατάσταση των πυρηνικών - περισσότεροι θα είχαν πεθάνει εάν χρησιμοποιούταν περισσότερος άνθρακας από το πετρέλαιο ή το αέριο - αλλά εκτιμούν ότι η πυρηνική ενέργεια έχει σώσει παγκοσμίως περίπου δύο εκατομμύρια ζωές.^[47]

Από το 1965 μπορούμε να εκτιμήσουμε ότι 81 εκατομμύρια άνθρωποι πέθαναν πρόωρα ως αποτέλεσμα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και ατυχημάτων από ορυκτά καύσιμα - 39 εκατομμύρια από άνθρακα, 39 εκατομμύρια από το πετρέλαιο και 3 εκατομμύρια από αέριο. Οι εκτιμήσεις αυτές βέβαια αποδίδονται με μικρότερη αξία, διότι οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας σήμερα είναι πολύ πιο καθαροί και καλύτερα ρυθμισμένοι/οργανωμένοι από ό,τι πριν από 50 χρόνια - τα ποσοστά θανάτου ήταν πιθανώς πολύ υψηλότερα τότε. Εάν υποθέσουμε ότι είχαμε αντικαταστήσει όλη αυτή την ενέργεια από ορυκτά καύσιμα σε

πυρηνικά, έχουμε εκτιμώμενο αριθμό θανάτων 340.000. Σε αυτό το σενάριο, θα είχαμε σώσει περισσότερες από 80 εκατομμύρια ζωές.

3.4 Θάνατοι από το Chernobyl και Fukushima

Όσον αφορά την ασφάλεια της πυρηνικής ενέργειας, η συζήτηση συχνά στρέφεται γρήγορα στα πυρηνικά ατυχήματα στο Τσερνομπίλ στην Ουκρανία (1986) και στη Φουκουσίμα στην Ιαπωνία (2011). Αυτά τα δύο γεγονότα ήταν μακράν τα μεγαλύτερα πυρηνικά συμβάντα στην ιστορία, οι μόνες καταστροφές που θα λάβουν ένα επίπεδο 7 (η μέγιστη ταξινόμηση) στη Διεθνή κλίμακα πυρηνικών γεγονότων.

Όσον αφορά τα πυρηνικά ατυχήματα, υπάρχουν πραγματικά δύο θανατηφόρες επιπτώσεις: το πρώτο είναι ο αριθμός των άμεσων θανάτων που συνέβησαν είτε κατά τη στιγμή του συμβάντος, είτε τις επόμενες ημέρες (δηλαδή τις οξείες επιπτώσεις). Το δεύτερο είναι οι μακροχρόνιες επιπτώσεις της έκθεσης σε ακτινοβολία, η οποία έχει γνωστούς δεσμούς με την εμφάνιση διαφόρων μορφών καρκίνου.

Τριανταένα άτομα πέθαναν ως άμεσο αποτέλεσμα του ατυχήματος του Τσερνομπίλ. Δύο πέθαναν από τις επιπτώσεις της έκρηξης και 29 άλλοι πυροσβέστες πέθαναν ως αποτέλεσμα οξείας έκθεσης σε ακτινοβολία (όπου οξεία αναφέρεται σε συγκεκριμένη έκθεση ενός σύντομου χρονικού διαστήματος) τις επόμενες ημέρες^[48]

Ο αριθμός των ατόμων που επηρεάστηκαν από τη μακροχρόνια έκθεση σε ακτινοβολία είναι πιο δύσκολο να διακριθεί και παραμένει ιδιαίτερα αμφισβητούμενος. Μέρος αυτής της δυσκολίας έγκειται στη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των μακροπρόθεσμων θανάτων από έκθεση σε ακτινοβολία χαμηλού επιπέδου. Στις δημοσιευμένες εκτιμήσεις που εμφανίζονται, οι μελέτες έχουν χρησιμοποιήσει μια μεθοδολογία που ονομάζεται «γραμμικό μοντέλο χωρίς όριο» (LNT). Αυτό το μοντέλο εφαρμόζεται συνήθως στις εκτιμήσεις του κινδύνου ακτινοβολίας και στον καθορισμό ρυθμιστικών ορίων για την προστασία του περιβάλλοντος. Ωστόσο, η μέθοδος LNT εξακολουθεί να αμφισβητείται έντονα και θεωρείται ότι παρέχει μια συντηρητική εκτίμηση της πιθανής θνησιμότητας (δίνεται μια σύντομη περίληψη για το μοντέλο LNT και τις επιπτώσεις του παρακάτω). Ως εκ τούτου, αναμένουμε ότι οι αριθμοί που αναφέρονται παρακάτω θα ερμηνευθούν ως το ανώτατο όριο της εκτίμησης μιας δεδομένης πηγής.

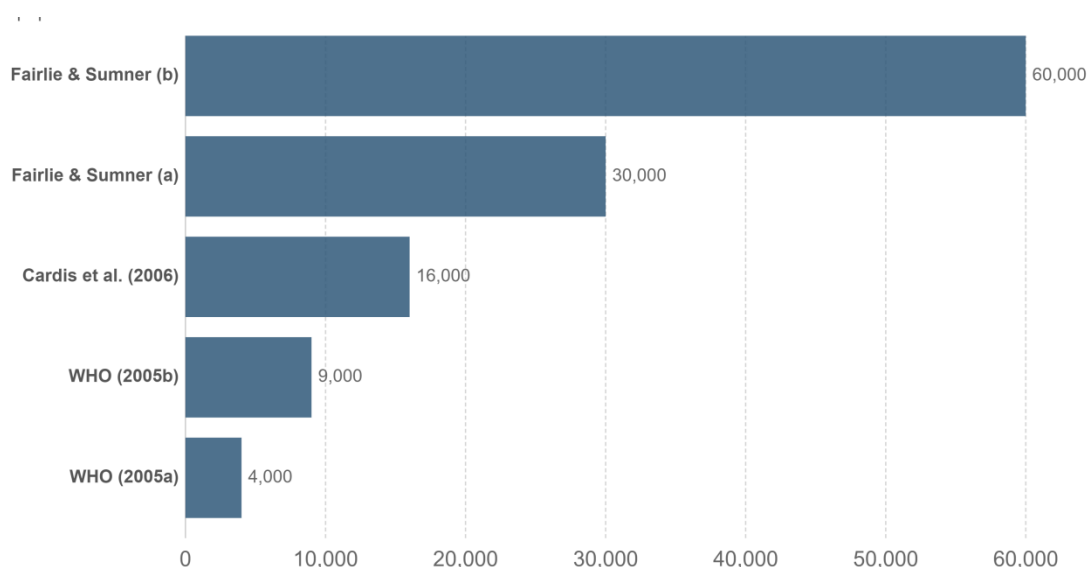
Το διάγραμμα εδώ αντικατοπτρίζει μια σειρά δημοσιευμένων εκτιμήσεων σχετικά με τον αριθμό των θανάτων που οφείλονται στην καταστροφή του Τσερνομπίλ. Στην αξιολόγηση του 2005/06 «Η κληρονομιά του Τσερνομπίλ: Υγεία, περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις», ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας εκτιμά ότι ο συνολικός αριθμός των μακροπρόθεσμων θανάτων θα είναι περίπου 4.000.^[49]

Ωστόσο, αυτός ο αριθμός σχετίζεται μόνο με τους κοντινούς πληθυσμούς της Ουκρανίας, της Ρωσίας και της Λευκορωσίας, οι οποίες εκτέθηκαν σε υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας. Εάν επεκταθεί σε εκτιμήσεις εκείνων που εκτίθενται σε χαμηλού επιπέδου ακτινοβολία σε ολόκληρη την περιοχή, ο αριθμός αυτός ανέρχεται σε 9.000^[50]

Άλλες μελέτες έχουν προτείνει υψηλότερα στοιχεία. Μια μελέτη στο International Journal of Cancer από τους Cardis et al. (2006) εκτιμά συνολικά 16.000 θανάτους σε όλη την Ευρώπη.^[51] Οι επιστήμονες ακτινοβολίας Fairlie και Sumner παρέχουν μερικές από τις υψηλότερες εκτιμήσεις, προβλέποντας μεταξύ 30.000-60.000 θανάτων.^[52]

Ο κίνδυνος για πρόκληση καρκίνου - ειδικά σε χαμηλές δόσεις έκθεσης σε περαιτέρω γεωγραφικές περιοχές - καθιστά αυτή τη διαδικασία εκτίμησης ιδιαίτερα δύσκολη. Στην έκθεσή της για το 2008, η Επιστημονική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για τις επιπτώσεις της ατομικής ακτινοβολίας (UNSCEAR) απέφυγε να αναφέρει έναν αριθμό για τον απόλυτο αριθμό θανάτων σε πληθυσμούς που εκτέθηκαν σε χαμηλές δόσεις ακτινοβολίας από το Τσερνομπίλ λόγω της αβεβαιότητας του μοντέλου LNT.^[53]

Γράφημα 33: Εκτίμηση θανάτων από το Chernobyl



Πηγή : W.H.O. (2005) , Fairlie & Sumner (2006) & Cardis et al. (2006)

Στην περίπτωση της Φουκουσίμα, παρόλο που 40 έως 50 άτομα υπέστησαν σωματικό τραυματισμό ή εγκαύματα από την ακτινοβολία στην πυρηνική εγκατάσταση, ο αριθμός των άμεσων θανάτων από το συμβάν αναφέρεται ότι είναι μηδέν. Το 2018, η ιαπωνική κυβέρνηση ανέφερε ότι από τότε ένας εργαζόμενος πέθανε από καρκίνο του πνεύμονα ως αποτέλεσμα έκθεσης σε ακτινοβολία .

Ωστόσο, η θνησιμότητα από την έκθεση σε ακτινοβολία δεν ήταν η μόνη απειλή για την ανθρώπινη υγεία: ο επίσημος αριθμός θανάτων ήταν 573 άτομα - που πέθαναν ως αποτέλεσμα διαδικασιών εκκένωσης και παραγόντων που προκαλούνται από άγχος. Ο αριθμός αυτός κυμαίνεται μεταξύ 1.000-1.600 θανάτων από την εκκένωση (η εκκένωση πληθυσμών που επλήγησαν από τον σεισμό και το τσουνάμι εκείνη την εποχή μπορεί να κάνει τη μοναδική απόδοση στην πρόκληση της πυρηνικής καταστροφής). Οι θάνατοι που

προκαλούνται από το στρες επηρέασαν κυρίως τους ηλικιωμένους. Περισσότερο από το 90% της θνησιμότητας εμφανίστηκε σε άτομα άνω των 66 ετών.

Στο γράφημα παρακάτω, φαίνεται ο εκτιμώμενος αριθμός των συνολικών θανάτων ανά αιτία. Στην αρχική εκτίμηση του κινδύνου για την πυρηνική καταστροφή - που δημοσιεύθηκε το 2013 - ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας σημειώνει ότι τα επίπεδα έκθεσης είναι πολύ χαμηλά για να επηρεάσουν την ανθρώπινη υγεία για τον εθνικό πληθυσμό, με εξαίρεση μερικές κοινότητες που βρίσκονται πολύ κοντά.^[54] Από την έκθεση του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας που δημοσιεύτηκε πέντε χρόνια πριν - το 2015 - υποδηλώνεται πολύ χαμηλός κίνδυνος αυξημένων θανάτων από καρκίνο στην Ιαπωνία.^[55] Σε μια ανασκόπηση της ανταπόκρισης και των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων στην υγεία της Φουκουσίμα, που δημοσιεύθηκε από τους Michael Reich και Aya Goto (2015), οι συγγραφείς σημειώνουν ότι: «κανείς δεν πέθανε από έκθεση σε ακτινοβολία και η επιστημονική επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για τις επιπτώσεις της ατομικής ακτινοβολίας το 2013 δήλωσε ότι δεν αναμένονται σημαντικές αλλαγές στις μελλοντικές στατιστικές καρκίνου που αποδίδονται στην έκθεση σε ακτινοβολία».^[56,57]

Σε πιο πρόσφατες εκτιμήσεις των ποσοστών περί γεννητικής θνησιμότητας (δηλαδή, τοκετός ή θάνατοι εντός της πρώτης εβδομάδας της ζωής) σε περιοχές πλησιέστερες στην τοποθεσία της Φουκουσίμα, δεν υπήρχαν στατιστικές ενδείξεις αυξημένης συχνότητας.^[58] Στην πραγματικότητα, τα ποσοστά περί γεννητικής θνησιμότητας έδειξαν συνολική μείωση με το χρόνο.

Ο αριθμός των νεκρών του πυρηνικού ατυχήματος στη Φουκουσίμα κυριάρχησε στα πρωτοσέλιδα για εβδομάδες μετά το συμβάν και επισκίασε την πολύ μεγαλύτερη τραγωδία που συνέβη το τσουνάμι σκότωσε 15.893 άτομα, περισσότερο από 25 φορές τον αριθμό από το πυρηνικό ατύχημα.

Κεφάλαιο 4: Πυρηνική Τεχνολογία

4.1 Βασικά στοιχεία πυρηνικής φυσικής

4.1.1 Άτομο και πυρήνας

Το άτομο αποτελεί τη βασική μονάδα ύλης και χαρακτηρίζεται από δύο αριθμούς :

- Το αριθμό Z , που αποτελεί την χημική ταυτότητα κάθε στοιχείου και καθορίζει τις χημικές του ιδιότητες καθώς και στον αριθμό πρωτονίων του πυρήνα του.
- Το μαζικό αριθμό A , ο οποίος αναφέρεται στο συνολικό αριθμό νουκλεονίων (πρωτόνια - νετρόνια) στον πυρήνα.

Τα πρωτόνια και τα νετρόνια είναι υποατομικά σωματίδια και αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του πυρήνα του ατόμου, όπου συγκρατούνται στον πυρήνα με ελκτικές δυνάμεις , οι οποίες είναι αρκετά ισχυρές και υπερνικούν τις απωστικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις που ασκούν μεταξύ τους τα θετικά φορτισμένα πρωτόνια. Οι δυνάμεις αυτές ονομάζονται πυρηνικές δυνάμεις. Στην ουσία ο πυρήνας του ατόμου αποτελεί μία σταθερή οντότητα και η ενέργεια του είναι χαμηλότερη από εκείνη των συστατικών του. Επομένως για να διασπαστεί στα επιμέρους συστατικά του , απαιτείται προσφορά ενέργειας. Η απαιτούμενη αυτή ενέργεια ονομάζεται ενέργεια σύνδεσης ή συνοχής ^[59]. Επιπλέον, το γεγονός πως η ενέργεια του πυρήνα είναι χαμηλότερη από αυτή των συστατικών του, υποδηλώνει πως η μάζα οποιουδήποτε πυρήνα είναι μικρότερη του αθροίσματος των μαζών των νουκλεονίων που τον συγκροτούν. Η διαφορά αυτή ονομάζεται έλλειμμα μάζας και ισοδυναμεί με την ενεργειακή διαφορά ΔE ανάμεσα στις δύο καταστάσεις (ελεύθερα νετρόνια – πυρήνας) και υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\Delta E = \Delta m * c^2 \text{ [60]}$$

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 και είναι χαρακτηριστικές του είδους του πυρήνα. Σε πυρηνικό επίπεδο, η τάξη μεγέθους των επιτρεπόμενων σταθμών είναι μερικά MeV, δηλαδή 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. Όταν ένας πυρήνας βρίσκεται σε κατάσταση διέγερσης είναι ασταθής και τείνει να επιστρέψει στην θεμελιώδη κατάσταση του απελευθερώνοντας την περίσσεια ενέργεια.^[61]

Ραδιενεργός πυρήνας είναι αυτός που είναι μεγάλος σε ενεργειακή πυκνότητα εκπέμπει σωματίδια και είναι ασταθής. Ραδιενεργός διάσπαση, ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία υπάρχει μετατροπή του πυρήνα σε κάποιον άλλο εκπέμποντας φωτόνια χωρίς να υπάρχει κάποια εξωτερική διέγερση.^[62]

4.1.2 Πυρηνικές αντιδράσεις

Πυρηνική ενέργεια καλείται αυτή που απελευθερώνεται από τον μετασχηματισμό των ατομικών πυρήνων , δηλαδή τις πυρηνικές αντιδράσεις. Πυρηνική αντίδραση είναι η διαδικασία κατά την οποία μεταβάλλεται η ενεργειακή κατάσταση του πυρήνα. Επομένως, η πυρηνική ενέργεια με ,απλά λόγια, είναι η δυναμική ενέργεια που υπάρχει αποθηκευμένη στον πυρήνα του ατόμου ως αποτέλεσμα των δυνάμεων που ασκούνται στο εσωτερικό του. Για να προκληθεί πυρηνική αντίδραση, πρέπει να υπάρξει πρόσκρουση ενός νετρονίου στον πυρήνα του ατόμου με αποτέλεσμα ο πυρήνας να αποκτήσει επιπλέον ενέργεια .

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

- Ραδιενεργός σύλληψη: Ο σύνθετος πυρήνας αποδιεγείρεται εκπέμποντας φωτόνια (ακτινοβολία γ).
- Εκπομπή φορτισμένων σωματιδίων: Στην περίπτωση αυτή η αποδιέγερση υλοποιείται μέσω της εκπομπής ενός πρωτονίου ή σωματιδίου α ή β .
- 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.
- Ελαστική σκέδαση: 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.
- 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. 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.^[63]

4.2 Εισαγωγή στις πυρηνικές τεχνολογίες

4.2.1 Αλυσιδωτή αντίδραση σχάσης

Η λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων βασίζεται στο φαινόμενο της σχάσης. Η σχάση είναι το αποτέλεσμα της διαδικασίας στην οποία ένα νετρόνιο συγκρούεται με τον πυρήνα ουρανίου (U-235), απορροφείται από αυτόν και προκύπτει ένας νέος σύνθετος πυρήνας σε κατάσταση διέγερσης, ο οποίος μετά την σχάση χωρίζεται σε δύο κομμάτια απελευθερώνοντας ενέργεια και μερικά νετρόνια. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής την ενέργειας εμφανίζεται ως θερμότητα σχεδόν ταυτόχρονα με την σχάση. Με αρκετή ποσότητα U-235 η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς, καθώς τα νέα νετρόνια που προκύπτουν απορροφώνται από τους άλλους πυρήνες και με την σειρά τους πυροδοτούν εκ νέου την διαδικασία. Ως επί το πλείστον, η σχάση, εκτός από την θερμότητα που εκλύει, παράγει και το μέσο αναπαραγωγής, δηλαδή τα νετρόνια, ένα φαινόμενο που είναι αυτοσυντηρούμενο.

Η διάταξη σχεδιασμένη έτσι ώστε να πραγματοποιείται ελεγχόμενη αυτοσυντήρητη αντίδραση σχάσης, ονομάζεται Πυρηνικός Αντιδραστήρας Σχάσης. Προκειμένου να εκμεταλλευτεί η θερμότητα που παράγεται από την διαδικασία της σχάσης, πρέπει απαραίτητα να υπάρχει ένα ψυκτικό υλικό, το οποίο θα απάγει την θερμότητα και θα την μεταφέρει έξω από τον πυρήνα. Πυρηνικό καύσιμο, ονομάζεται το υλικό που περιέχει τους σχάσιμους πυρήνες. Στους περισσότερους σύγχρονους αντιδραστήρες το καύσιμο τοποθετείται σε μεταλλικό κυλινδρικό περίβλημα με σκοπό τον περιορισμό των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης εντός του περιβλήματος και την ελαχιστοποίηση της διαρροής ραδιενεργών υλικών στο κύκλωμα του αντιδραστήρα. Το περίβλημα μαζί με το καύσιμο που περιέχει, ονομάζεται ράβδος καυσίμου. Οι σχάσεις πραγματοποιούνται στο σχάσιμο υλικό μέσα στη ράβδο. Το μέγιστο ποσοστό της ενέργειας των σχάσεων εμφανίζεται, όπως προείπαμε, ως θερμότητα, στις θέσεις όπου γίνονται οι σχάσεις, δηλαδή μέσα στις ράβδους καυσίμου, πρακτικά ταυτόχρονα με τη σχάση. Γύρω από τις ράβδους του πυρηνικού καυσίμου ρέει το ψυκτικό (στη μεγάλη πλειοψηφία των σύγχρονων αντιδραστήρων αυτό είναι H₂O, σε αντιδραστήρες γραφίτη-φυσικού ουρανίου CO₂, στους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων υγρό Na) που απάγει την θερμότητα που παράγεται από τις σχάσεις.

Οι ράβδοι καυσίμου είναι τοποθετημένες ή μια δίπλα στην άλλη. Η περιοχή του αντιδραστήρα όπου βρίσκεται το σχάσιμο υλικό (μέσα στις ράβδους καυσίμου) και πραγματοποιείται η αλυσωτή αντίδραση σχάσης, ονομάζεται καρδιά ή πυρήνας του αντιδραστήρα. Το ψυκτικό εισέρχεται σχετικά «ψυχρό» στην καρδιά του αντιδραστήρα και, απάγοντας τη θερμότητα που παράγεται από τις σχάσεις στις ράβδους του καυσίμου, εξέρχεται από την καρδιά σχετικά «θερμό». Ο ρόλος του αντιδραστήρα στην ηλεκτροπαραγωγή μονάδα είναι ίδιος με το ρόλο ενός λέβητα συμβατικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής -παραγωγή θερμότητας για την παραγωγή ατμού υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης.

Επιπλέον και ως φυσικό επακόλουθο της όλης διαδικασίας είναι και ο απαραίτητος έλεγχος στο πλήθος των νετρονίων. Ο συνολικός αριθμός των νετρονίων στον πυρήνα του

αντιδραστήρα είναι ανάλογος του ρυθμού των σχάσεων, επομένως και της θερμικής ισχύος του. Ως εκ τούτου ο έλεγχος του συνολικού αριθμού των νετρονίων της παραγόμενης ισχύος και επομένως του ισοζυγίου μεταξύ ρυθμού παραγωγής και απώλειας τους είναι αρκετά σημαντικός. Η υλοποίηση αυτού του ελέγχου γίνεται με την βοήθεια ενός συντελεστή k , ο οποίο υπολογίζεται:

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

- $k > 1$: 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. Αφότου, η παραγόμενη ενέργεια τείνει προς την επιθυμητή τιμή, μεταβάλλουμε εκ νέου το k , ώστε το σύστημα να γίνει κρίσιμο ($k=1$). Για να μειώσουμε την παραγόμενη ενέργεια ή να απενεργοποιήσουμε τον αντιδραστήρα μειώνουμε την τιμή του k ώστε να γίνει ελαφρώς μικρότερη της μονάδας.

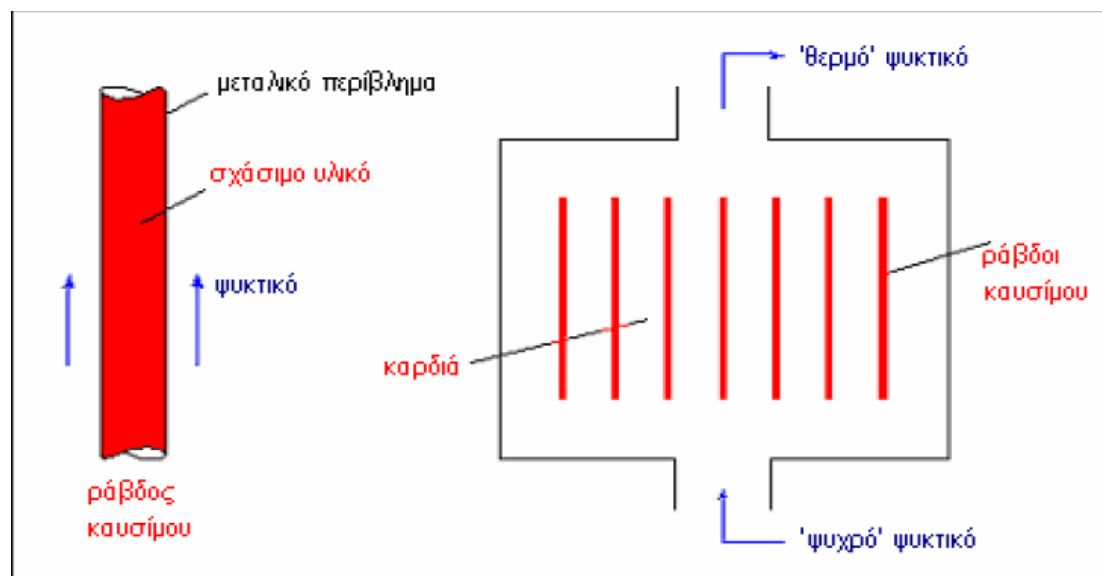
Επιπλέον, ένας ακόμα συντελεστής που θα διευκολύνει τον έλεγχο, ορίζεται :

$n = \text{αριθμός νετρονίων που απελευθερώνονται κατά τη σχάση} / \text{αριθμό νετρονίων που απορροφούνται από την σχάση}$

4.2.2 Βασική δομή και λειτουργία αντιδραστήρα^[64]

Όπως ήδη αναφέραμε, με τον όρο πυρηνικό αντιδραστήρα, αναφερόμαστε σε μία διάταξη κατάλληλα 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.

Εικόνα 2: Σχηματικό διάγραμμα απαγωγής θερμότητας από την καρδιά του αντιδραστήρα



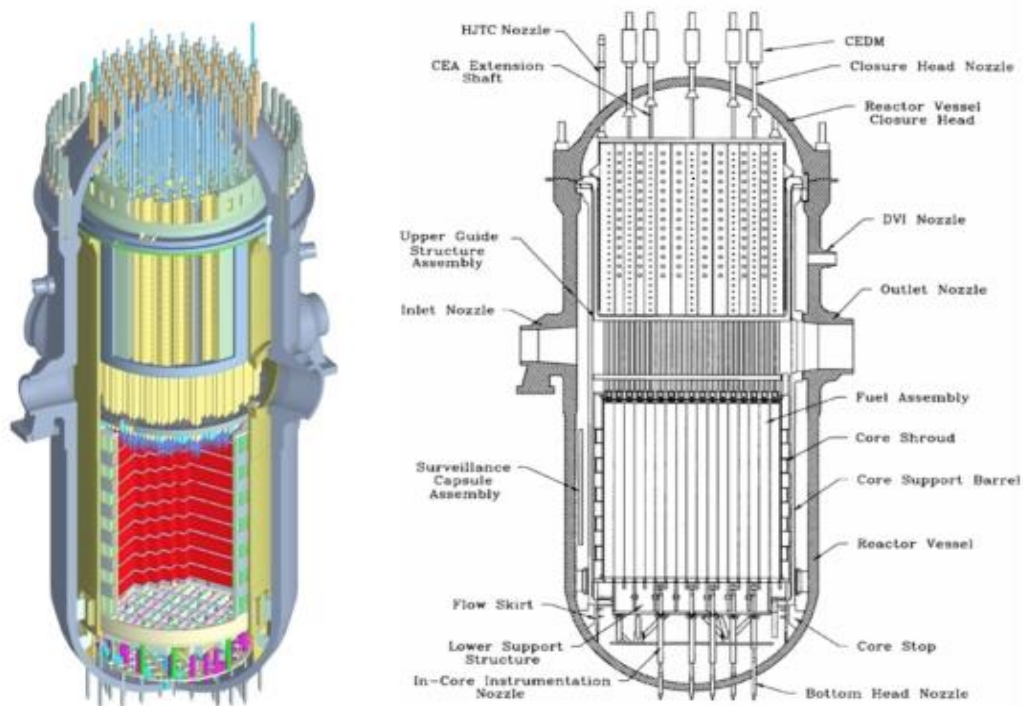
Πηγή :

Απαραίτητη για τη λειτουργία κάθε αντιδραστήρα είναι η ύπαρξη πυρηνικού καυσίμου (nuclear fuel) και αναφέρεται στο υλικό που περιέχει τους σχάσιμους πυρήνες. Ως επί το πλείστον, 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. Στο μεγαλύτερο ποσοστό των σύγχρονων πυρηνικών αντιδραστήρων (θερμικοί αντιδραστήρες) το καύσιμο είναι εμπλουτισμένο με ουράνιο και βρίσκεται μέσα σε δισκία τα οποία συγκρατούν τα στερεά προϊόντα της σχάσης και είναι τοποθετημένα σε ένα μεταλλικό, κυλινδρικό περίβλημα (fuel can, cladding). Το περίβλημα αυτό, διασφαλίζει τον περιορισμό των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης στο εσωτερικό του και την ελαχιστοποίηση διαρροών ραδιενεργών υλικών στο κύκλωμα του αντιδραστήρα και μαζί με το ίδιο το καύσιμο αποτελούν τη ράβδο καυσίμου (fuel rod). Σε κάθε αντιδραστήρα υπάρχουν περισσότερες από μία ράβδοι καυσίμου, οι οποίες είναι τοποθετημένες σε συστάδες και περιέχουν το σύνολο του σχάσιμου υλικού, μέσα στο οποίο πραγματοποιούνται οι σχάσεις.

Με τον όρο συστάδα καυσίμου (fuel assembly, subassembly, bundle), η οποία αποτελεί τη μικρότερη μονάδα καυσίμου, εννοούμε το σύνολο των ράβδων καυσίμου που είναι τοποθετημένες σε ένα ενιαίο συγκρότημα με συγκεκριμένη μορφή με αποτέλεσμα να διατηρείται η μεταξύ τους απόσταση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η συστάδα καυσίμου περικλείεται από ένα μεταλλικό πολυγωνικό σωλήνα που ονομάζεται 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. 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, δηλαδή 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 και 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) 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.

Εικόνα 3 : Καρδιά Πυρηνικού Αντιδραστήρα



Πηγή : <https://www.greencarcongress.com/2019/05/20190503-nrc.html>

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.

Μέσα τον αντιδραστήρα υπάρχουν επίσης και κάποια κινητά μέρη που ονομάζονται ράβδου ελέγχου (control rods) και χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την απορρόφηση των νετρονίων καθώς ρυθμίζουν την παροχή τους και μεταβάλλουν τον συντελεστή k προ τα επιθυμητά σημεία. Επίσης, οι ράβδοι ελέγχου καθορίζουν 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 στον πυρήνα. Επομένως, με την εξαγωγή ή την εισαγωγή των ράβδων ελέγχου, επιτυγχάνεται η έναρξη κι η διακοπή λειτουργίας του αντιδραστήρα αντίστοιχα. Η διαδικασία αυτή γίνεται αυτόματα ανάλογα με την απαίτηση για την κάλυψη του φορτίου. 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 ψυκτικό (coolant) που συνήθως είναι νερο, βαρύ ύδωρ, διοξείδιο του άνθρακα, υγρό νάτριο ή ήλιο , με στόχο την απαγωγή των ποσοτήτων θερμότητας που απελευθερώνονται από τις σχάσεις. Με το ψυκτικό η θερμότητα που παράγεται οδηγείται έξω από την καρδιά του αντιδραστήρα στον εναλλάκτη θερμότητας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού

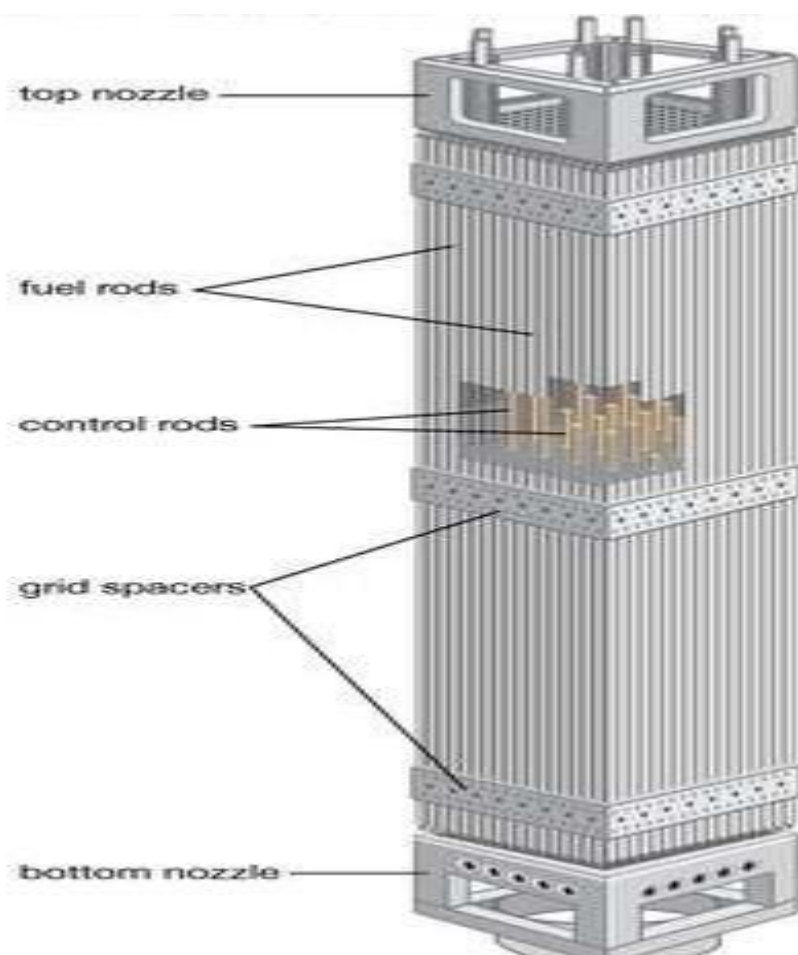
Στους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες, γύρω από την καρδιά του αντιδραστήρα υπάρχει μια περιοχή με γόνιμο υλικό, που καλείται μανδύας επώασης (blanket) και σχεδιασμένη για μετατροπή ή αναπαραγωγή. Τα νετρόνια που διαφεύγουν από τον πυρήνα εισέρχονται στον μανδύα επώασης και χρησιμοποιούνται στις αντιδράσεις 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 ποσά ενέργειας.

Ο μανδύας επώασης (ή η ίδια του καρδιά του αντιδραστήρα όταν αυτός δεν υπάρχει) περικλείεται από τον ανακλαστή (reflector). Στόχος 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. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η διάταξη του καθώς 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 με αποτέλεσμα την φθορά των υλικών και των λειτουργικών μονάδων που την περιβάλλο. 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 διαφορετικών 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).

Όλα τα παραπάνω πρέπει να περιέχονται μέσα σε ένα δοχείο πίεσης (pressure vessel) για την ασφαλέστερη λειτουργία τους και γύρω από το δοχείο πίεσης, να υπάρχει μία βιολογική θωράκιση με στόχο την εξασθένηση των ακτινοβολιών, για την ασφάλεια των εργαζομένων.

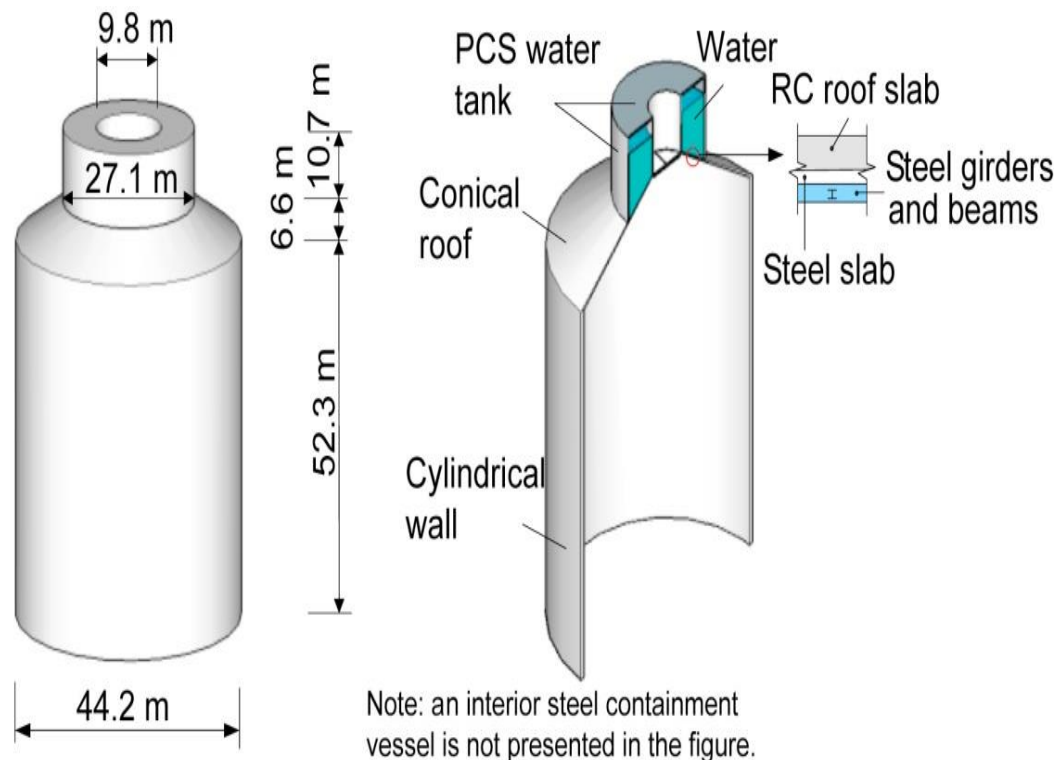
Εικόνα 4 : Ράβδοι ελέγχου



Πηγή : <https://www.britannica.com/technology/control-rod>

Κλείνοντας, όλα τα προαναφερθέντα εξαρτήματα, που περικλείουν ποσά θερμότητας και ραδιενέργειας, περιβάλλονται από το δοχείο εγκλωβισμού (containment vessel). Το συγκεκριμένο δοχείο, είναι από σκυρόδεμα πάχους μεγαλύτερου του ενός μέτρου και εσωτερικά έχει στεγνό χαλύβδινο έλασμα. Η χρησιμότητα αυτού του δοχείου, είναι η προστασία από, τυχόν, διαρροή ραδιενεργών ουσιών στο περιβάλλον σε περίπτωση ατυχήματος και είναι σχεδιασμένο ώστε να μην δημιουργούνται διαρροές ραδιενεργών υλικών ακόμη και κάτω από ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Επιπλέον, ο χώρος αυτός είναι προσβάσιμος στο προσωπικό και ως εκ τούτου θα μπορεί να ελέγχεται συστηματικά από ανιχνευτές και να καθαρίζεται από φίλτρα ώστε να διασφαλίζεται πως δεν υπάρχουν αιωρούμενα ραδιενεργά σωματίδια ή επιβλαβείς ακτινοβολίες.

Εικόνα 5 : Δοχείο Εγκλωβισμού

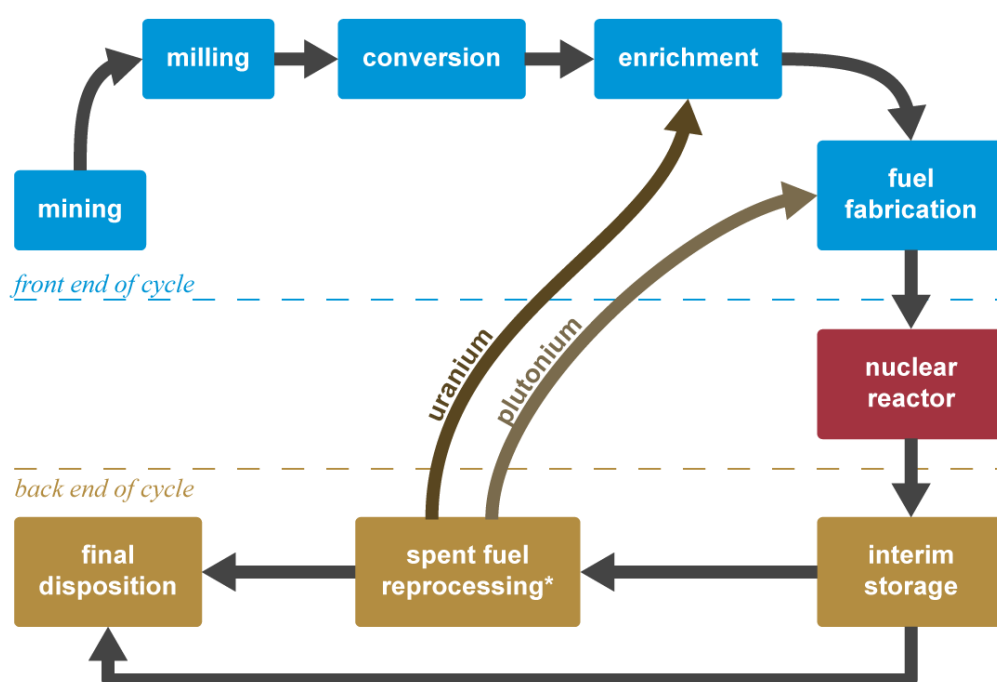


Πηγή : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573317302401#fig2>

4.2.3 Το ουράνιο ως πρώτη ύλη

Το ουράνιο αποτελεί ένα χημικό στοιχείο στη σειρά των ακτινιδών. Πρόκειται για ένα ελαφρώς ραδιενεργό μέταλλο, περίπου εξίσου κοινό με τον κασσίτερο και υπάρχει σε αφθονία στην φύση, κυρίως στους βράχους και τα χώματα, καθώς και σε πολλούς ποταμούς και στο θαλασσινό νερό. 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).

Εικόνα 6 : Κύκλος Καυσίμου



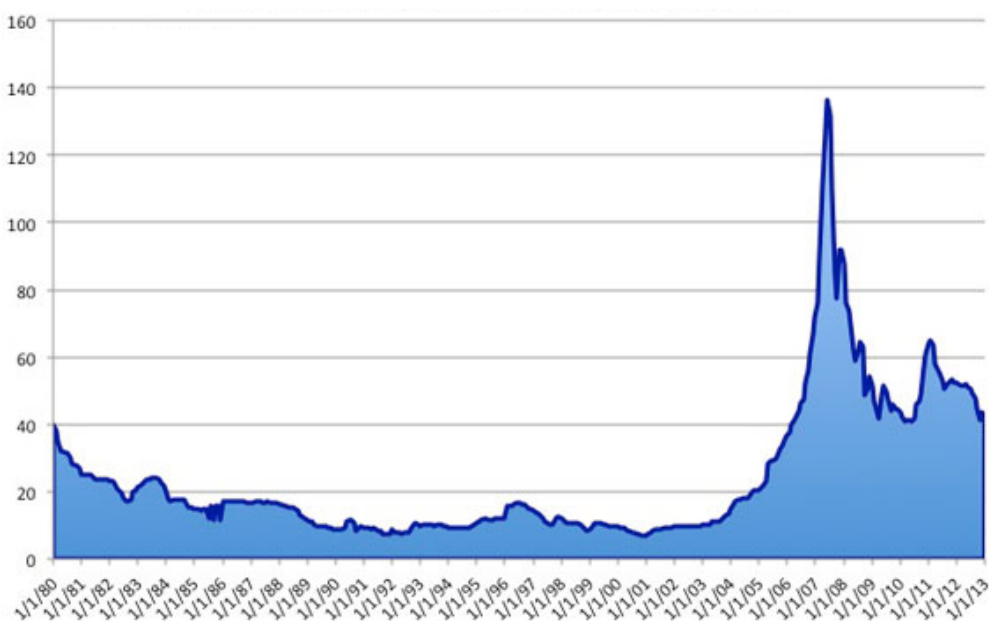
Πηγή : <https://www.eia.gov/energyexplained/nuclear/the-nuclear-fuel-cycle.php>

Πλούσια κοιτάσματα ουρανίου, που μάλιστα μπορεί να ξεπερνούν και τους 20.000 τόνους, υπολογίζεται ότι υπάρχουν στο υπέδαφος της Ελλάδος, σύμφωνα με την τελευταία κοινή έκθεση του ΟΟΣΑ και της Διεθνούς Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας, «Uranium 2009». Σύμφωνα με το Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας του 1998, τα περισσότερα

κοιτάσματα της Ελλάδας εντοπίζονται στα βόρεια του Νομού Σερρών, στην παράκτια ζώνη μεταξύ Σερρών και Καβάλας, στην ελληνοβουλγαρική μεθόριο του Νομού Δράμας, ενώ επεκτείνονται και προς τη Ξάνθη. Επίσης, διάσπαρτα μικρά κοιτάσματα έχουν βρεθεί σε ολόκληρη την περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας & Θράκης. Ακόμη, υπάρχουν διάχυτες πληροφορίες για την ύπαρξη ουρανίου τόσο στη Φλώρινα όσο και στη Λέσβο. Σε ό,τι αφορά τη γεωλογία, το ουράνιο στη χώρα μας εντοπίζεται σε ιζήματα και όξινα γρανιτικά πετρώματα και το δυνητικά «εξαγώγιμο» προϊόν είναι το οξειδίο του ουρανίου, δηλαδή το κίτρινο συμπύκνωμα που χρησιμοποιείται στην πυρηνική τεχνολογία. ^[65]

Ως αναφορά την εξόρυξη του ουρανίου, δεν διαφέρει τεχνικά από τις διαδικασίες των υπόλοιπων ορυκτών καυσίμων. Τέλος, στο διάγραμμα 34 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 \$/pound).

Γράφημα 34 : Διακύμανση τιμής Ουρανίου



Πηγή : <https://data.mongabay.com/commodities/price-charts/price-of-uranium.html>

4.3 Θεσμικό Πλαίσιο για την πυρηνική ενέργεια

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, η πυρηνική ενέργεια αποτελεί μια εναλλακτική λύση χαμηλών εκπομπών άνθρακα, αντί για τα ορυκτά καύσιμα, και αποτελεί βασικό συστατικό του ενεργειακού μίγματος δεκατριών από τα είκοσι επτά κράτη μέλη, ενώ αναλογεί στο 26% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην Ε.Ε. Ωστόσο, μετά τις πυρηνικές καταστροφές στο Τσερνόμπιλ το 1986 και στη Φουκουσίμα της Ιαπωνίας το 2011, η πυρηνική ενέργεια αμφισβητείται έντονα. Η απόφαση της Γερμανίας να καταργήσει την πυρηνική ενέργεια έως το 2020, και το προσωρινό κλείσιμο δύο αντιδραστήρων στο Βέλγιο, μετά την ανακάλυψη ρωγμών στους θαλάμους τους, ενέτειναν την πίεση για κατάργηση της πυρηνικής ενέργειας στην Ευρώπη. Παρόλο που επαφίεται στα κράτη μέλη να επιλέγουν εάν θα περιλαμβάνεται η πυρηνική ενέργεια στο ενεργειακό τους μίγμα ή όχι, η νομοθεσία της ΕΕ έχει ως στόχο τη βελτίωση των προτύπων ασφάλειας των πυρηνικών σταθμών ενέργειας και τη διασφάλιση ότι η διάθεση και μεταχείριση των πυρηνικών αποβλήτων πραγματοποιείται με ασφαλή τρόπο.

Η συνθήκη Ευρατόμ, η οποία θεσπίστηκε αρχικά για τον συντονισμό των ερευνητικών προγραμμάτων των κρατών με στόχο την ειρηνική χρήση της πυρηνικής ενέργειας, συμβάλλει σήμερα στην από κοινού χρήση των γνώσεων, των υποδομών και των χρηματοδοτικών πόρων της πυρηνικής ενέργειας. Διασφαλίζει, επίσης, την ασφάλεια εφοδιασμού με ατομική ενέργεια στο πλαίσιο κεντρικού συστήματος ελέγχου. Στόχος της συνθήκης αυτής ήταν να καταπολεμήσει το γενικότερο έλλειμμα παροχής ενέργειας από τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας και έτσι τα ιδρυτικά κράτη μέλη της Ε.Ε. αναζήτησαν στην πυρηνική ενέργεια το μέσο επίτευξης της ενεργειακής ανεξαρτησίας. Δεδομένου ότι το επενδυτικό κόστος της πυρηνικής ενέργειας υπερέβαινε τις δυνάμεις των μεμονωμένων κρατών μελών, τα ιδρυτικά κράτη συνένωσαν τις δυνάμεις τους και δημιούργησαν την Ευρατόμ.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το πεδίο εφαρμογής της Ευρατόμ περιορίζεται στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας για μη στρατιωτική και ειρηνική χρήση. Ειδικότερα, στο προοίμιο της συνθήκης, τα υπογράφοντα μέρη δηλώνουν:

«Έχοντας επίγνωση ότι η πυρηνική ενέργεια αποτελεί ουσιώδη πηγή βοήθειας για την ανάπτυξη και την ανανέωση της παραγωγής, καθώς και για την πρόοδο των έργων ειρήνης ... αποφασισμένοι να δημιουργήσουν τις προϋποθέσεις ανάπτυξης μιας ισχυρής πυρηνικής βιομηχανίας, που θα παρέχει εκτεταμένες πηγές ενέργειες, θα εκσυγχρονίζει την τεχνική και θα συμβάλλει με τις πολλαπλές άλλες εφαρμογές στην ευημερία των λαών τους, ενδιαφερόμενοι να δημιουργήσουν συνθήκες ασφαλείας που αποκλείουν τους κινδύνους για τη ζωή και την υγεία των λαών, επιθυμώντας να συνδέσουν άλλες χώρες στο έργο τους και να συνεργασθούν με τους διεθνείς οργανισμούς που ασχολούνται με την ειρηνική ανάπτυξη της ατομικής ενέργειας ...»

Το άρθρο 35 της συνθήκης Ευρατόμ ορίζει ότι κάθε κράτος μέλος δημιουργεί τις αναγκαίες εγκαταστάσεις για να διενεργεί διαρκή έλεγχο των επιπέδων ραδιενέργειας της ατμόσφαιρας, των υδάτων και του εδάφους, καθώς και έλεγχο της τήρησης των βασικών κανόνων ασφαλείας. Με άλλα λόγια, το άρθρο 35 προβλέπει ότι τα κράτη μέλη εξασφαλίζουν τη θέσπιση κατάλληλου προγράμματος παρακολούθησης του επιπέδου ραδιενέργειας στο

περιβάλλον. Σύμφωνα με το άρθρο 36 της Συνθήκης Ευρατόμ τα κράτη μέλη ανακοινώνουν στην Επιτροπή της τα αποτελέσματα αυτής της παρακολούθησης.

- Η νομική βάση : Η Συνθήκη περί ιδρύσεως της Ευρωπαϊκής Κοινότητας Ατομικής Ενέργειας (Συνθήκη Ευρατόμ), άρθρα 40-52 (επενδύσεις, κοινές επιχειρήσεις και εφοδιασμός) και 92-99 (κοινή πυρηνική αγορά).

A. Πυρηνική ασφάλεια

Η πυρηνική ασφάλεια σχετίζεται με την ασφαλή λειτουργία των πυρηνικών εγκαταστάσεων και, συμπληρωματικά, την ακτινοπροστασία και τη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων. Η ΕΕ προωθεί τα υψηλότερα πρότυπα ασφάλειας για όλους τους τύπους μη στρατιωτικών πυρηνικών δραστηριοτήτων, μεταξύ άλλων για την παραγωγή ενέργειας, την έρευνα και για ιατρικές χρήσεις. Τα κράτη μέλη πρέπει να θεσπίσουν εθνικά πλαίσια για τις απαιτήσεις περί πυρηνικής ασφάλειας, την αδειοδότηση πυρηνικών σταθμών ενέργειας, την εποπτεία και τις ενέργειες επιβολής.

Μετά το πυρηνικό ατύχημα της Φουκουσίμα, η Επιτροπή διεξήγαγε συνολική αξιολόγηση των κινδύνων και της ασφάλειας όλων των πυρηνικών σταθμών ενέργειας της ΕΕ με σκοπό την αξιολόγηση της ασφάλειας και της ανθεκτικότητας των πυρηνικών εγκαταστάσεων σε περίπτωση ακραίων φυσικών φαινομένων. Η Επιτροπή κατέληξε σε μια συνολικά θετική αξιολόγηση των υφιστάμενων ευρωπαϊκών προτύπων ασφαλείας, αλλά τόνισε ότι πρέπει να υπάρξουν περαιτέρω βελτιώσεις για να διασφαλιστεί καλύτερη εναρμόνιση μεταξύ των κρατών μελών και να καλυφθεί η απόσταση από τις διεθνείς βέλτιστες πρακτικές. Ως αποτέλεσμα, το 2014 επικαιροποιήθηκαν οι ενωσιακοί κανόνες ασφάλειας για τις πυρηνικές εγκαταστάσεις (οδηγία 2014/87/Ευρατόμ). Τον Φεβρουάριο του 2015, η Επιτροπή πρότεινε να αναθεωρηθούν οι απαιτήσεις πληροφόρησης δυνάμει του άρθρου 41 και 44 της Συνθήκης Ευρατόμ ώστε να ευθυγραμμιστούν με τις νέες πολιτικές εξελίξεις. Επιπλέον, οι απαιτήσεις κοινοποίησης πρέπει να είναι σαφέστερες για τους επενδυτές και η διαδικασία κοινοποίησης να καταστεί πιο αποτελεσματική.

A1. Ακτινοπροστασία

Η έκθεση σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για τη δημόσια υγεία (τόσο για τον ευρύτερο πληθυσμό, όσο και για τους εργαζόμενους στον ιατρικό, βιομηχανικό και πυρηνικό τομέα) και για το περιβάλλον. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επιστημονική πρόοδος, να βελτιωθεί η νομική συνοχή και να αντιμετωπιστούν τα ζητήματα των φυσικών πηγών ακτινοβολίας και της προστασίας του περιβάλλοντος, το μωσαϊκό της νομοθεσίας της ΕΕ στον τομέα της ακτινοπροστασίας επικαιροποιήθηκε και απλουστεύθηκε. Η οδηγία 2013/59/Ευρατόμ του Συμβουλίου, της 5ης Δεκεμβρίου 2013, καθορίζει βασικά πρότυπα ασφάλειας για την προστασία από τους κινδύνους που προκύπτουν από την έκθεση σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Η ευρωπαϊκή νομοθεσία απλοποιήθηκε με την αντικατάσταση πέντε οδηγιών και εισήχθησαν δεσμευτικές απαιτήσεις για την προστασία από την έκθεση σε ραδόνιο σε εσωτερικούς χώρους, για τη χρήση οικοδομικών υλικών και την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων των απορρίψεων ραδιενεργών καταλοίπων από πυρηνικές εγκαταστάσεις. Μια άλλη οδηγία, η οδηγία 2013/51/Ευρατόμ, της 22ας Οκτωβρίου 2013, επικεντρώνεται στην παρακολούθηση των ραδιενεργών ουσιών που περιέχει το νερό που προορίζεται για ανθρώπινη κατανάλωση.

Αρκετοί κανονισμοί έχουν καθορίσει όρους που διέπουν τις εισαγωγές γεωργικών προϊόντων καταγωγής τρίτων χωρών μετά το ατύχημα στον πυρηνικό σταθμό ενέργειας του Τσερνόμπιλ (κανονισμός 733/2008/ΕΚ, που επεκτάθηκε με τον κανονισμό 1048/2009/ΕΚ, κανονισμός 1635/2006/ΕΚ και κανονισμός 1609/2000). Ο κανονισμός 2016/52/ΕΚ του Συμβουλίου καθορίζει τα μέγιστα επιτρεπτά επίπεδα ραδιενέργειας στα τρόφιμα και τις ζωοτροφές μετά από πυρηνικό ατύχημα ή οποιαδήποτε άλλη περίπτωση εκτάκτου κινδύνου από ακτινοβολίες.

A2. Μεταφορά ραδιενεργών ουσιών και αποβλήτων

Ο κανονισμός 1493/93/ΕΚ, της 8ης Ιουνίου 1993, θέσπισε ένα κοινοτικό σύστημα για τη δήλωση αποστολών ραδιενεργών ουσιών μεταξύ κρατών μελών, προκειμένου να διασφαλίζεται ότι οι αρμόδιες αρχές λαμβάνουν το ίδιο επίπεδο πληροφόρησης αναφορικά με τους ελέγχους ακτινοπροστασίας όπως και πριν το 1993, όταν εφαρμόζονταν ακόμα οι συνοριακοί έλεγχοι.

Το 1992 θεσπίστηκε ένα σύστημα προηγούμενης αδειοδότησης των αποστολών ραδιενεργών αποβλήτων στην ΕΕ, το οποίο τροποποιήθηκε σημαντικά το 2006. Η οδηγία του Συμβουλίου 2006/117/Ευρατόμ, της 20ής Νοεμβρίου 2006, σχετικά με την επιτήρηση και τον έλεγχο των αποστολών ραδιενεργών αποβλήτων και αναλωμένου πυρηνικού καυσίμου έχει στόχο την εξασφάλιση επαρκούς επιπέδου προστασίας του πληθυσμού από τέτοιες αποστολές. Η οδηγία προβλέπει και απαριθμεί μια σειρά από αυστηρά κριτήρια, ορισμούς και διαδικασίες που πρέπει να εφαρμόζονται κατά τη μεταφορά ραδιενεργών αποβλήτων και αναλωμένου πυρηνικού καυσίμου, για τις αποστολές εντός και εκτός της Κοινότητας.

A3. Διαχείριση αποβλήτων

Το 2011 δημιουργήθηκε ένα νομικό πλαίσιο της ΕΕ για τη διαχείριση αποβλήτων στην Ευρώπη, με τη θέσπιση της οδηγίας 2011/70/Ευρατόμ του Συμβουλίου για τη διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων και αναλωμένου καυσίμου. Προβλέπει αυστηρή παρακολούθηση των εθνικών προγραμμάτων για την κατασκευή και διαχείριση χώρων τελικής εναπόθεσης, καθώς και δεσμευτικούς κανόνες ασφαλείας. Τα κράτη μέλη θέσπισαν τα πρώτα εθνικά προγράμματά τους το 2015 και υποβάλλουν ανά τριετία εθνικές εκθέσεις σχετικά με την εφαρμογή της οδηγίας.

A4. Παροπλισμός

Ο παροπλισμός μιας πυρηνικής εγκατάστασης είναι η τελική φάση του κύκλου ζωής της. Περιλαμβάνει δραστηριότητες που κυμαίνονται από τη διακοπή της λειτουργίας και την απομάκρυνση των πυρηνικών υλικών έως την αποκατάσταση της τοποθεσίας και την πλήρη εξάλειψη των ραδιολογικών κινδύνων, και εντέλει αποτελεί ευθύνη των κρατών μελών. Κατά την προσχώρησή τους στην ΕΕ, η Βουλγαρία, η Λιθουανία και η Σλοβακία συμφώνησαν να θέσουν εκτός λειτουργίας τους σοβιετικού σχεδιασμού πυρηνικούς αντιδραστήρες πρώτης γενιάς που είχαν στη διάθεσή τους. Προκειμένου να εκπληρώσει τις συμφωνίες προσχώρησης, η ΕΕ δρομολόγησε προγράμματα για να συνδράμει στον παροπλισμό των πυρηνικών εγκαταστάσεων με τη συγχρηματοδότηση της ασφαλούς απομάκρυνσης των ραδιενεργών υλικών και τον μετριασμό των προβλημάτων που σχετίζονταν με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την απασχόληση. Πρόσφατα, τα προγράμματα αυτά επικεντρώθηκαν στις προκλήσεις ασφαλείας του παροπλισμού. Η Επιτροπή πρότεινε τη συνέχιση της στήριξης των προγραμμάτων αυτών κατά την περίοδο 2021-2027.

B. Διασφάλιση πυρηνικών υλικών

Προκειμένου να καθιερωθεί ένα σύστημα διασφαλίσεων που να εγγυάται ότι τα πυρηνικά υλικά χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τους σκοπούς που δηλώνονται από τους χρήστες τους και ότι τηρούνται οι διεθνείς υποχρεώσεις, έχει θεσπιστεί και τροποποιηθεί μια σειρά από κανονισμούς, όπως ο κανονισμός της Επιτροπής (Ευρατόμ) 302/2005. Οι διασφαλίσεις αυτές καλύπτουν ολόκληρο τον κύκλο ζωής του πυρηνικού καυσίμου, από την εξόρυξη πυρηνικών υλικών στα κράτη μέλη ή την εισαγωγή τους από τρίτες χώρες, έως την εξαγωγή τους εκτός ΕΕ. Η Επιτροπή είναι αρμόδια για τον έλεγχο της χρήσης πυρηνικού υλικού για ειρηνικούς σκοπούς εντός ΕΕ.

Γ. Πυρηνική έρευνα, δραστηριότητες κατάρτισης και πληροφόρηση

Η πυρηνική έρευνα στην Ευρώπη χρηματοδοτείται από πολυετή προγράμματα πλαίσια. Το πρόγραμμα της Ευρατόμ για δραστηριότητες πυρηνικής έρευνας και κατάρτισης συμπληρώνει το πρόγραμμα «Ορίζοντας 2020», το οποίο αποτελεί το πρόγραμμα πλαίσιο της ΕΕ για έρευνα και καινοτομία, αλλά παραμένει χωριστό από αυτό. Το ποσό που διατέθηκε για το πρόγραμμα της Ευρατόμ κατά την περίοδο 2014-2018 ήταν 1 608 εκατομμύρια ευρώ, ποσό το οποίο μοιράστηκε σε τρία ειδικά προγράμματα: το πρώτο περιλαμβάνει έμμεσες δράσεις που αφορούν την έρευνα στο πεδίο της ενέργειας σύντηξης (728 εκατομμύρια ευρώ), το δεύτερο αφορά την πυρηνική σχάση και ακτινοπροστασία (315 εκατομμύρια ευρώ) και το τρίτο άμεσες δράσεις για δραστηριότητες του Κοινού Κέντρου Ερευνών της Επιτροπής (559 εκατομμύρια ευρώ). Στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας σχάσης, το 2007 δημιουργήθηκε μια τεχνολογική πλατφόρμα βιώσιμης πυρηνικής ενέργειας (SNETP), για τον καλύτερο συντονισμό της έρευνας και ανάπτυξης, καθώς και της επίδειξης και εγκατάστασης. Στον τομέα της ενέργειας σύντηξης, η ΕΕ αποτελεί ιδρυτικό μέλος και βασικό χρηματοδοτικό εταίρο του ITER, ένα διεθνές έργο για την έρευνα και τη μηχανική στον τομέα της σύντηξης, το οποίο κατασκευάζει σήμερα τον μεγαλύτερο πειραματικό πυρηνικό αντιδραστήρα σύντηξης του κόσμου στο Cadarache της Γαλλίας. Συγκροτήθηκε κοινή επιχείρηση για τον ITER και την ανάπτυξη της πυρηνικής σύντηξης, για την προαγωγή της επιστημονικής έρευνας και της ανάπτυξης τεχνολογίας στον τομέα της σύντηξης (απόφαση του Συμβουλίου 2007/198/Ευρατόμ). Στα μέλη περιλαμβάνονται η Ευρατόμ (η οποία εκπροσωπείται από την Επιτροπή), τα κράτη μέλη της ΕΕ και ορισμένες τρίτες χώρες, οι οποίες έχουν συνάψει συμφωνίες συνεργασίας με την Ευρατόμ.

Η οδηγία 2014/87/Ευρατόμ του Συμβουλίου καθορίζει όρους όσον αφορά τη διαφάνεια και την πληροφόρηση που διατίθεται στους εργαζομένους και στο ευρύ κοινό σε σχέση με την πυρηνική ασφάλεια των πυρηνικών εγκαταστάσεων.

- ΟΔΗΓΙΑ 2013/59/ΕΥΡΑΤΟΜ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ, της 5ης Δεκεμβρίου 2013, για τον καθορισμό βασικών προτύπων ασφαλείας για την προστασία από τους κινδύνους που προκύπτουν από ιοντίζουσες ακτινοβολίες :

Η παρούσα οδηγία θεσπίζει ομοιόμορφα βασικά πρότυπα ασφαλείας για την προστασία της υγείας των ατόμων, που υποβάλλονται σε επαγγελματική έκθεση, σε ιατρική έκθεση και στην έκθεση του κοινού, απέναντι στους κινδύνους που προκύπτουν από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες.

Γενικές αρχές ακτινοπροστασίας

Τα κράτη μέλη θεσπίζουν νομικές απαιτήσεις και ένα κατάλληλο καθεστώς κανονιστικού ελέγχου το οποίο αντανακλά, για κάθε κατάσταση έκθεσης, ένα σύστημα ακτινοπροστασίας βάσει των αρχών της αιτιολόγησης, της βελτιστοποίησης και των ορίων δόσεων:

α) Αιτιολόγηση: Οι αποφάσεις για την εισαγωγή μιας πρακτικής πρέπει να είναι αιτιολογημένες υπό την έννοια ότι οι εν λόγω αποφάσεις λαμβάνονται με πρόθεση να εξασφαλιστεί ότι το ατομικό ή κοινωνικό όφελος που προκύπτει από αυτές υπερέρχει της βλάβης που ενδέχεται να προκαλέσουν. Οι αποφάσεις για την εισαγωγή ή μεταβολή μιας οδούς έκθεσης για υφιστάμενες καταστάσεις έκθεσης και καταστάσεις έκθεσης έκτακτης ανάγκης, είναι αιτιολογημένες με την έννοια ότι θα πρέπει να έχουν περισσότερο ευεργετικό παρά δυσμενές αποτέλεσμα.

β) Βελτιστοποίηση: Η ακτινοπροστασία των ατόμων που υποβάλλονται σε έκθεση του κοινού ή σε επαγγελματική έκθεση βελτιστοποιείται με σκοπό τη διατήρηση του μεγέθους των ατομικών δόσεων, της πιθανότητας έκθεσης και του αριθμού των εκτιθέμενων ατόμων στα κατώτερα ευλόγως εφικτά επίπεδα, λαμβανομένων υπόψη της συγκεκριμένης κατάστασης των τεχνικών γνώσεων καθώς και των οικονομικών και κοινωνικών παραγόντων. Η βελτιστοποίηση της προστασίας των ατόμων που υποβάλλονται σε ιατρική έκθεση εφαρμόζεται στο μέγεθος των ατομικών δόσεων και είναι συναφής με τον ιατρικό σκοπό της έκθεσης, όπως περιγράφεται στο άρθρο 56. Η αρχή αυτή εφαρμόζεται όχι μόνον ως προς την ενεργό δόση, αλλά επίσης, κατά περίπτωση, ως προς τις ισοδύναμες δόσεις, ως μέτρο προφύλαξης που διατηρεί τις αβεβαιότητες σχετικά με τη βλάβη στην υγεία κάτω από το κατώφλι δόσης των ιστικών αντιδράσεων.

γ) Όρια δόσεων: σε καταστάσεις σχεδιασμένης έκθεσης, το σύνολο των δόσεων σε ένα άτομο δεν υπερβαίνει τα προβλεπόμενα όρια δόσεων για επαγγελματική έκθεση ή έκθεση του κοινού. Τα όρια δόσεων δεν ισχύουν στην περίπτωση ιατρικών εκθέσεων.

Μέτρα στους χώρους εργασίας

1. Τα κράτη μέλη εξασφαλίζουν ότι για την ακτινοπροστασία λαμβάνονται μέτρα αναφορικά με όλους τους χώρους εργασίας όπου οι εργαζόμενοι ενδέχεται να λαμβάνουν έκθεση ανώτερη μιας ενεργού δόσης της τάξης του 1 mSv ανά έτος ή ισοδύναμης δόσης ύψους 15 mSv ανά έτος για τους φακούς των οφθαλμών ή 50 mSv ανά έτος για το δέρμα και τα άκρα.

Τα μέτρα αυτά πρέπει να αντιστοιχούν στη φύση των εγκαταστάσεων και των πηγών και στο μέγεθος και τη φύση των κινδύνων.

2. Για τους χώρους εργασίας που προβλέπονται στο άρθρο 54 παράγραφος 3, και όπου η έκθεση εργαζομένων ενδέχεται να υπερβεί μια ενεργό δόση 6 mSv ετησίως ή μια αντίστοιχη χρονικά ολοκληρωμένη τιμή από το ραδόνιο που καθορίζεται από τα κράτη μέλη, αυτή αντιμετωπίζεται ως κατάσταση σχεδιασμένης έκθεσης και τα κράτη μέλη καθορίζουν ποιες απαιτήσεις του παρόντος κεφαλαίου είναι οι κατάλληλες. Για τους χώρους εργασίας που προβλέπονται στο άρθρο 54 παράγραφος 3, και όπου η ενεργός δόση στους εργαζομένους είναι μικρότερη ή ίση με 6 mSv ετησίως ή η έκθεση είναι μικρότερη από την αντίστοιχη χρονικά ολοκληρωμένη τιμή έκθεσης από το ραδόνιο, η αρμόδια αρχή απαιτεί να βρίσκονται συνεχώς οι εκθέσεις υπό έλεγχο.

Ταξινόμηση χώρων εργασίας

1. Τα κράτη μέλη εξασφαλίζουν ότι τα μέτρα στους χώρους εργασίας περιλαμβάνουν ταξινόμηση σε διάφορες περιοχές, κατά περίπτωση, βάσει της εκτίμησης των αναμενόμενων ετήσιων δόσεων και της πιθανότητας και του μεγέθους των πιθανών εκθέσεων.
2. Πρέπει να γίνεται διάκριση μεταξύ ελεγχόμενων και επιβλεπόμενων περιοχών. Τα κράτη μέλη εξασφαλίζουν ότι η αρμόδια αρχή θεσπίζει τις κατευθυντήριες γραμμές που είναι κατάλληλες υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες, για την ταξινόμηση των ελεγχόμενων και των επιβλεπόμενων περιοχών.
3. Τα κράτη μέλη εξασφαλίζουν ότι η επιχείρηση ελέγχει τις συνθήκες εργασίας στις ελεγχόμενες και τις επιβλεπόμενες περιοχές.

Ελεγχόμενες περιοχές

1. Τα κράτη μέλη εξασφαλίζουν ότι οι ελάχιστες απαιτήσεις για την ελεγχόμενη περιοχή είναι οι εξής:
 - α) να είναι οριοθετημένη και η πρόσβαση σ' αυτή να περιορίζεται στα άτομα που έχουν λάβει κατάλληλες οδηγίες και να ελέγχεται σύμφωνα με γραπτές διαδικασίες που παρέχει η επιχείρηση. Όταν υπάρχει υψηλός κίνδυνος εξάπλωσης ραδιενεργού ρύπανσης, πρέπει να λαμβάνονται συγκεκριμένα μέτρα, συμπεριλαμβανομένων μέτρων σχετικά με την είσοδο και έξοδο ατόμων και αγαθών και την παρακολούθηση της ρύπανσης εντός της ελεγχόμενης περιοχής και, κατά περίπτωση, στις παρακείμενες περιοχές.
 - β) Ανάλογα με τη φύση και την έκταση των κινδύνων από ακτινοβολίες στις ελεγχόμενες περιοχές, οργανώνεται επίβλεψη του χώρου εργασίας για ακτινοβολίες σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 39.
 - γ) Τοποθετείται σήμανση για τον τύπο της περιοχής, τη φύση των πηγών και τους κινδύνους που απορρέουν από αυτές.
 - δ) Εκδίδονται οδηγίες εργασίας ανάλογα με τον κίνδυνο από ακτινοβολίες που απορρέει από τις πηγές και τις αντίστοιχες εργασίες.

ε) Ο εργαζόμενος λαμβάνει ειδική εκπαίδευση σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του χώρου εργασίας και τις δραστηριότητες.

στ) Ο εργαζόμενος διαθέτει τον κατάλληλο εξοπλισμό ατομικής προστασίας.

2. Τα κράτη μέλη εξασφαλίζουν ότι η επιχείρηση είναι υπεύθυνη για την εκτέλεση των καθηκόντων αυτών λαμβάνοντας υπόψη τις συμβουλές που παρέχονται από τον εμπειρογνώμονα ακτινοπροστασίας.

- ΟΔΗΓΙΑ 2011/70/ΕΥΡΑΤΟΜ της 19ης Ιουλίου 2011, η οποία θεσπίζει κοινοτικό πλαίσιο για την υπεύθυνη και ασφαλή διαχείριση αναλωμένων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων

1. Τα κράτη μέλη καθορίζουν και διατηρούν εθνικές πολιτικές για τη διαχείριση των αναλωμένων καυσίμων και των ραδιενεργών αποβλήτων. Με την επιφύλαξη του άρθρου 2, παράγραφος 3, κάθε κράτος μέλος έχει την τελική ευθύνη για τη διαχείριση των αναλωμένων καυσίμων και των ραδιενεργών αποβλήτων που παράγονται εντός της επικράτειάς του.

2. Σε περίπτωση που ραδιενεργά απόβλητα μεταφέρονται για επεξεργασία ή επανεπεξεργασία σε κράτος μέλος ή σε τρίτη χώρα, το κράτος μέλος ή η τρίτη χώρα από το οποίο εστάλησαν τα απόβλητα διατηρεί την τελική ευθύνη για την ασφαλή και υπεύθυνη διάθεση αυτών των υλικών, συμπεριλαμβανομένων τυχόν αποβλήτων που παράγονται ως υποπροϊόντα.

3. Οι εθνικές πολιτικές βασίζονται σε όλες τις ακόλουθες αρχές:

α) η παραγωγή ραδιενεργών αποβλήτων τηρείται στο ελάχιστο επίπεδο που είναι λογικά δυνατό, ως προς τη δραστηριότητα και τον όγκο, μέσω κατάλληλων μέτρων σχεδιασμού και πρακτικών λειτουργίας και παροπλισμού, που περιλαμβάνουν την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση υλικών·

β) λαμβάνονται υπόψη οι αλληλεξαρτήσεις μεταξύ όλων των σταδίων της παραγωγής και διαχείρισης αναλωμένων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων·

γ) η διαχείριση αναλωμένων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων γίνεται με ασφάλεια, ακόμη και μακροπρόθεσμα, με χαρακτηριστικά παθητικής ασφαλείας·

δ) η εφαρμογή των μέτρων ακολουθεί σταδιακή προσέγγιση·

ε) το κόστος διαχείρισης αναλωμένων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων βαρύνει όσους δημιούργησαν τα συγκεκριμένα υλικά·

στ) εφαρμόζεται διαδικασία λήψης αποφάσεων βάσει αποδείξεων και τεκμηρίωσης όσον αφορά όλα τα στάδια της διαχείρισης αναλωμένων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων.

4. Η διάθεση των ραδιενεργών αποβλήτων πραγματοποιείται στο κράτος μέλος που τα παράγει, εκτός εάν, κατά τη στιγμή της μεταφοράς, έχει τεθεί σε ισχύ συμφωνία, λαμβανομένων υπόψη των κριτηρίων που έχει καθορίσει η Επιτροπή, βάσει του άρθρου 16 παράγραφος 2 της οδηγίας 2006/117/Ευρατόμ, μεταξύ του συγκεκριμένου κράτους μέλους και άλλου κράτους μέλους ή τρίτης χώρας για τη χρήση εγκατάστασης διάθεσης σε ένα εξ αυτών.

Για την Ελλάδα ο φορέας αυτής της παρακολούθησης είναι η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) η οποία είναι η αρμόδια αρχή για τον έλεγχο, τη ρύθμιση και την εποπτεία του τομέα πυρηνικής ενέργειας, πυρηνικής τεχνολογίας, ραδιολογικής, πυρηνικής ασφάλειας και ακτινοπροστασίας.

Είναι τεχνολογικός φορέας, έχει χαρακτήρα Νομικού Προσώπου Δημοσίου Δικαίου (ΝΠΔΔ) και απολαμβάνει πλήρους διοικητικής και οικονομικής αυτοτέλειας. Υπάγεται στον Υπουργό Ανάπτυξης και Επενδύσεων και εποπτεύεται από αυτόν.

Η ΕΕΑΕ:

θέτει τους κανόνες ασφαλείας μέσω:

- της έκδοσης κανονισμών
- της σύνταξης και προώθησης νομοθεσίας.

διασφαλίζει τη συμμόρφωση με το θεσμικό πλαίσιο κυρίως μέσω:

- της διενέργειας ελέγχων και μετρήσεων
- της παρακολούθησης των επιπέδων ραδιενέργειας στο περιβάλλον
- της παρακολούθησης των δόσεων των εργαζομένων με ακτινοβολίες
- της παροχής συνεχούς εκπαίδευσης και κατάρτισης
- της έγκυρης και συστηματικής ενημέρωσης της κοινής γνώμης και της Πολιτείας.

έχοντας ως προτεραιότητα την ασφάλεια:

- παρέχει υπηρεσίες υψηλού επιπέδου, διαθέτοντας προηγμένο υλικοτεχνικό εξοπλισμό και εργαστηριακή υποδομή
- είναι σε διαρκή ετοιμότητα για ανταπόκριση σε ραδιολογικά/πυρηνικά περιστατικά
- ενισχύει τη νοοτροπία ακτινοπροστασίας και ασφάλειας
- υπηρετεί την επιστημονική αριστεία στην έρευνα και τη γνώση.

Νομοθεσία για την πυρηνική ενέργεια στην Ελλάδα

- ΦΕΚ 2877/Β/26-10-2012. Αριθ. Π/112/305 Βασικές απαιτήσεις – αρχές πυρηνικής ασφάλειας και ρυθμιστικός έλεγχος ερευνητικών πυρηνικών αντιδραστήρων.

1. Διαχείριση πυρηνικής ασφάλειας

- Ο κάτοχος άδειας έχει την κύρια ευθύνη για τη διασφάλιση, τήρηση και εφαρμογή, σε όλα τα στάδια της ζωής της εγκατάστασης, των βασικών αρχών πυρηνικής ασφάλειας, σύμφωνα με την ελληνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία, καθώς και τα εφαρμοστέα πρότυπα ασφάλειας του.
- Θεσπίζεται κατάλληλο σχέδιο πρόληψης και αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, συμπεριλαμβανομένης της διασύνδεσής του με το εθνικό σχέδιο έκτακτης ανάγκης. Το σχέδιο έκτακτης ανάγκης πρέπει να επικαιροποιείται, σύμφωνα με το στάδιο της ζωής της εγκατάστασης, καθώς και με άλλους παράγοντες που λαμβάνουν υπόψη μεταβολές ή νέα γνώση. Η ετοιμότητα εφαρμογής του σχεδίου έκτακτης ανάγκης διατηρείται σε υψηλό επίπεδο, μέσω, μεταξύ άλλων, και της διεξαγωγής κατάλληλων ασκήσεων.
- Θεσπίζονται διαδικασίες για τη διαχείριση έκτακτων αναμενόμενων περιστατικών και την αντιμετώπιση συμβάντων ή ατυχημάτων.
- Συγκροτείται και λειτουργεί εσωτερική επιτροπή ασφάλειας, ανεξάρτητη από τον υπεύθυνο του αντιδραστήρα (reactor manager) με συμβουλευτικό ρόλο σε θέματα ασφάλειας.
- Συγκροτείται και λειτουργεί εσωτερική Ειδικευμένη Υπηρεσία Ακτινοπροστασίας
- Θεσπίζεται και εφαρμόζεται πρόγραμμα πυρηνικής προστασίας της εγκατάστασης και διασφάλισης των πυρηνικών υλικών

2. Αξιολόγηση τοποθεσίας εγκατάστασης

- Η τοποθεσία εγκατάστασης αξιολογείται, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους παράγοντες και τις παραμέτρους, που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας, όπως γεωλογικά, υδρολογικά, σεισμολογικά, πληθυσμιακά, οδικό δίκτυο καθώς και οποιαδήποτε άλλα, που ενδέχεται να έχουν επίδραση στην ασφάλεια της εγκατάστασης σε όλα τα στάδια της ζωής της
- Κατά την αξιολόγηση της τοποθεσίας εγκατάστασης αξιολογούνται οι πιθανές επιπτώσεις της εγκατάστασης στον πληθυσμό και στο περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένων

και αυτών σε συνθήκες ατυχήματος, καθώς επίσης και η δυνατότητα εφαρμογής του σχεδίου έκτακτης ανάγκης

3. Σχεδιασμός και κατασκευή

- Ο σχεδιασμός της εγκατάστασης περιλαμβάνει διαφορετικά, αξιόπιστα και ανεξάρτητα μεταξύ τους επίπεδα προστασίας και πολλαπλά φράγματα, για την αποφυγή διαφυγής ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον. Πρωταρχικός στόχος του σχεδιασμού είναι η πρόληψη ατυχήματος και σε περίπτωση που αυτό συμβεί, ο περιορισμός των επιπτώσεών του (Αρχή της άμυνας σε βάθος–Defense in depth)
- Ο σχεδιασμός της εγκατάστασης διασφαλίζει την αξιόπιστη, ομαλή και εύκολα διαχειρίσιμη λειτουργία
- Ο σχεδιασμός επιτυγχάνει ώστε η έκθεση σε ακτινοβολία των εργαζομένων και του πληθυσμού, καθώς και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον να είναι τόσο χαμηλές, όσον αυτό είναι λογικά εφικτό, σύμφωνα με την αρχή της βελτιστοποίησης, συμπεριλαμβανομένης της εφαρμογής των περιοριστικών επιπέδων δόσεων, όπως καθορίζονται στον Κανονισμό Ακτινοπροστασίας.

4. Θέση σε λειτουργία

- Η θέση σε λειτουργία πραγματοποιείται σύμφωνα με προκαθορισμένο πρόγραμμα θέσης σε λειτουργία, που περιλαμβάνει τον έλεγχο όλων των πτυχών ασφάλειας της εγκατάστασης, τεχνικής και διοικητικής φύσης.
- Σκοπός του προγράμματος θέσης σε λειτουργία είναι η επαλήθευση ότι η εγκατάσταση, όπως κατασκευάστηκε, ικανοποιεί τις απαιτήσεις ασφάλειας, καθώς και τις απαιτήσεις και τους στόχους του εγκεκριμένου σχεδιασμού.

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

1. Κατασκευή

Για την κατασκευή του ερευνητικού πυρηνικού αντιδραστήρα απαιτείται η χορήγηση άδειας ίδρυσης. Η άδεια ίδρυσης εκδίδεται με απόφαση του Υπουργού Παιδείας και Θρησκευμάτων, Πολιτισμού και Αθλητισμού, μετά από σύμφωνη γνώμη της ΕΕΑΕ. Σχετική αίτηση του ενδιαφερομένου κατατίθεται στη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας του Υπουργείου Παιδείας και Θρησκευμάτων, Πολιτισμού και Αθλητισμού, με αντίγραφο στην ΕΕΑΕ, και περιλαμβάνει τα παρακάτω:

- a) Τα στοιχεία του αιτούντος φυσικού ή νομικού προσώπου.
- b) Τη βασική αρχή λειτουργίας και γενική περιγραφή της εγκατάστασης
- c) Την τοποθεσία εγκατάστασης, με λεπτομερή και τεκμηριωμένη αξιολόγηση της καταλληλότητάς της, λαμβάνοντας υπόψη τα νεότερα επιστημονικά δεδομένα, και μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων και επιπτώσεων στον πληθυσμό.
- d) Ανάλυση σκοπιμότητας, στην οποία να καταδεικνύεται το όφελος στην κοινωνία από τη χρήση και την εκμετάλλευση της εγκατάστασης.
- e) Χρονοδιάγραμμα κατασκευής.
- f) Οικονομοτεχνική μελέτη, στην οποία να γίνεται εκτίμηση των οικονομικών πόρων, που απαιτούνται σε όλα τα στάδια της ζωής της εγκατάστασης, έως και την τελική αποξήλωση και απελευθέρωση της τοποθεσίας από το ρυθμιστικό έλεγχο, καθώς και η περιγραφή των διευθετήσεων για την εξασφάλισή τους
- g) Πολιτική και μεθόδους για τη διαχείριση των ραδιενεργών καταλοίπων και του πυρηνικού καυσίμου, σε όλα τα στάδια της ζωής της εγκατάστασης, έως και την τελική αποξήλωση

2. Λειτουργία

- Για τη λειτουργία του ερευνητικού πυρηνικού αντιδραστήρα απαιτείται άδεια λειτουργίας, που εκδίδεται από την ΕΕΑΕ.

3. Θέση σε λειτουργία

- Για την έναρξη της διαδικασίας θέσης σε λειτουργία, και σε κάθε περίπτωση, πριν την τοποθέτηση καυσίμου στην καρδιά του ερευνητικού πυρηνικού αντιδραστήρα, απαιτείται έγκριση θέσης σε λειτουργία που εκδίδεται από την ΕΕΑΕ.

4. Έκθεση Ανάλυσης Ασφάλειας

- Στην Έκθεση Ανάλυσης Ασφάλειας (ΕΑΑ) του ερευνητικού πυρηνικού αντιδραστήρα, ο κάτοχος άδειας τεκμηριώνει διεξοδικά, ως προς όλα τα στάδια ζωής της εγκατάστασης, την επίτευξη υψηλού επιπέδου ασφάλειας. Στην ΕΑΑ περιλαμβάνονται τουλάχιστον τα παρακάτω:

1. Γενική περιγραφή της εγκατάστασης.
2. Στόχοι ασφάλειας και απαιτήσεις ασφάλειας, που τέθηκαν στο σχεδιασμό.
3. Χαρακτηριστικά της τοποθεσίας.
4. Κτιριακές και άλλες ηλεκτρομηχανολογικές υποδομές και συστήματα.
5. Περιγραφή της εγκατάστασης, συμπεριλαμβανομένης κατάταξης των διάφορων υποδομών, συστημάτων και άλλων συνιστωσών, με βάση τη σημασία τους για την ασφάλεια.
6. Σύστημα ψύξης, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων που συνδέονται με αυτό. 7. Συστήματα ασφάλειας της εγκατάστασης.
8. Όργανα και συστήματα ελέγχου.
9. Περιγραφή της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.
10. Βοηθητικά συστήματα.
11. Χρήση αντιδραστήρα.
12. Πρόγραμμα ακτινοπροστασίας.
13. Περιγραφή της λειτουργίας της εγκατάστασης.
14. Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
15. Πρόγραμμα θέσης σε λειτουργία.
16. Ανάλυση ασφάλειας, στην οποία αναλύονται διεξοδικά οι πιθανοί κίνδυνοι και οι επιπτώσεις από τη λειτουργία και τη χρήση της εγκατάστασης, συμπεριλαμβανομένης της ανάλυσης της αλληλουχίας γεγονότων, κατά τη διάρκεια ατυχημάτων, καθώς και τα μέτρα και τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης για τον περιορισμό των συνεπειών τους.
17. Όρια και συνθήκες λειτουργίας.
18. Σύστημα διασφάλισης ποιότητας.
19. Διαχείριση ραδιενεργών υλικών, καταλοίπων και αναλωθέντος καυσίμου.
20. Πρόγραμμα αποξήλωσης, συμπεριλαμβανομένων των οικονομικών πτυχών της.
21. Σχέδιο έκτακτης ανάγκης

- Νόμος 2884/2001 - ΦΕΚ 19/Α/6-2-2001

Κύρωση του Κοινού Πρωτοκόλλου σχετικά με την εφαρμογή της Σύμβασης της Βιέννης και της Σύμβασης του Παρισιού περί αστικής ευθύνης σε περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος.

ΤΑ ΣΥΜΒΑΛΛΟΜΕΝΑ ΜΕΡΗ, έχοντας υπόψη τη Σύμβαση της Βιέννης σχετικά με την αστική ευθύνη ως προς τις πυρηνικές ζημίες, της 21ης Μαΐου 1963, έχοντας υπόψη τη Σύμβαση του Παρισιού για την αστική ευθύνη στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας, της 29ης Ιουλίου 1960, που τροποποιήθηκε από το πρόσθετο Πρωτόκολλο της 28ης Ιανουαρίου 1964 και από το Πρωτόκολλο της 16ης Νοεμβρίου 1982, επειδή η Σύμβαση της Βιέννης και η Σύμβαση του Παρισιού είναι ανάλογες στην ουσία και ότι καμία Χώρα δεν αποτελεί τώρα Μέλος στις δύο Συμβάσεις, αφού πείσθηκαν ότι η προσχώρηση στη μία από τις Συμβάσεις αυτές από τα Μέλη της άλλης Σύμβασης δυνατόν να άρει τις δυσκολίες ταυτόχρονης εφαρμογής των δύο Συμβάσεων σε ένα πυρηνικό ατύχημα, επειδή επιθυμούν να θέσουν ένα δεσμό μεταξύ της Σύμβασης της Βιέννης και της Σύμβασης του Παρισιού αναμένοντας αμοιβαία το ευεργέτημα του ειδικού συστήματος της αστικής ευθύνης για τις πυρηνικές ζημίες που συστήθηκε δυνάμει κάθε Σύμβασης και για εξάλειψη των διαφορών που θα προκύψουν από μία ταυτόχρονη εφαρμογή των δύο Συμβάσεων σε ένα πυρηνικό ατύχημα.

Άρθρο II

Για τους σκοπούς του παρόντος Πρωτοκόλλου:

α) Ο εκμεταλλευτής μίας πυρηνικής εγκατάστασης που ευρίσκεται στο έδαφος ενός Μέλους της Σύμβασης της Βιέννης είναι υπεύθυνος, σύμφωνα με τη Σύμβαση αυτή, για τις πυρηνικές ζημίες που έγιναν στο έδαφος ενός Κράτους συμβαλλόμενου συγχρόνως στη Σύμβαση του Παρισιού και στο παρόν Πρωτόκολλο.

β) Ο εκμεταλλευτής μίας πυρηνικής εγκατάστασης που ευρίσκεται στο έδαφος ενός Μέλους της Σύμβασης του Παρισιού είναι υπεύθυνος σύμφωνα με τη Σύμβαση αυτή για τις πυρηνικές ζημίες που έγιναν στο έδαφος ενός Κράτους συμβαλλόμενου συγχρόνως στη Σύμβαση της Βιέννης και στο παρόν Πρωτόκολλο.

Άρθρο III

1. Η Σύμβαση της Βιέννης ή η Σύμβαση του Παρισιού εφαρμόζεται σε ένα πυρηνικό ατύχημα αποκλεισμένης της άλλης.

2. Στην περίπτωση ενός πυρηνικού ατυχήματος, που έγινε μέσα στην πυρηνική εγκατάσταση, εφαρμοστέα σύμβαση είναι αυτή στην οποία είναι Μέλος το Κράτος στο έδαφος του οποίου ευρίσκεται η εγκατάσταση αυτή.

3. Στην περίπτωση ενός πυρηνικού ατυχήματος, που έγινε εκτός της πυρηνικής εγκατάστασης, θέτοντας σε κίνδυνο πυρηνικές ύλες κατά τη διάρκεια της μεταφοράς, εφαρμοστέα σύμβαση είναι αυτή στην οποία είναι Μέλος το Κράτος στο έδαφος του οποίου ευρίσκεται η πυρηνική εγκατάσταση, της οποίας είναι υπεύθυνος ο εκμεταλλευτής, κατ' εφαρμογή είτε των παραγράφων 1 β) και γ) του άρθρου II της Σύμβασης της Βιέννης είτε των παραγράφων α) και β) του άρθρου 4 της Σύμβασης του Παρισιού.

- ΠΡΟΕΔΡΙΚΟ ΔΙΑΤΑΓΜΑ ΥΠ' ΑΡΙΘΜ. 60

Προσαρμογή της ελληνικής νομοθεσίας στην Οδηγία 2009/71/Ευρατόμ του Συμβουλίου της 25ης Ιουνίου 2009 περί θεσπίσεως εθνικού πλαισίου για την πυρηνική ασφάλεια πυρηνικών εγκαταστάσεων (L 172/2.7.2009)

1. Το Προεδρικό Διάταγμα εφαρμόζεται στις μη στρατιωτικές πυρηνικές εγκαταστάσεις, όπως ορίζονται στην περίπτωση α του άρθρου 3, που λειτουργούν βάσει άδειας ή συνόλου αδειών, όπως ορίζεται στην περίπτωση δ του άρθρου 3.

2. Το Προεδρικό Διάταγμα συμπληρώνει και δεν θίγει, όσον αφορά την πυρηνική ασφάλεια των πυρηνικών εγκαταστάσεων, τις διατάξεις των Κανονισμών Ακτινοπροστασίας (ΚΥΑ Αριθ. 1014 (ΦΟΡ)94 τ. Β', ΦΕΚ 216, 6.3.2001) που προσαρμόζουν την ελληνική νομοθεσία στην Οδηγία 96/29/Ευρατόμ.

1. Η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) ορίζεται ως η Αρμόδια ρυθμιστική αρχή στο πεδίο της πυρηνικής ασφάλειας των πυρηνικών εγκαταστάσεων. Εποπτεύει την τήρηση των διατάξεων του παρόντος και μεριμνά ώστε, η τήρηση των εν λόγω διατάξεων να πραγματοποιείται, σύμφωνα με τα πρότυπα ασφάλειας του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας, της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, τους Εθνικούς Κανονισμούς Ακτινοπροστασίας, καθώς και τους λοιπούς Εθνικούς Κανονισμούς, που άπτονται της πυρηνικής ασφάλειας, προκειμένου να διασφαλίζεται η υγεία των εργαζομένων και του πληθυσμού, καθώς και η προστασία του περιβάλλοντος.

2. Η ΕΕΑΕ, ως η αρμόδια ρυθμιστική αρχή: α) διαθέτει τη δέουσα νομική ισχύ και τους ανθρώπινους και οικονομικούς πόρους, που απαιτούνται για την εκπλήρωση των υποχρεώσεών της, σε συνδυασμό με το εθνικό πλαίσιο, που περιγράφεται στο άρθρο 4 παράγραφος 1 του παρόντος Προεδρικού Διατάγματος,

3. Οι κάτοχοι αδειών υποχρεούνται να θεσπίζουν και να εφαρμόζουν σύστημα διαχείρισης με σαφή προτεραιότητα στην πυρηνική ασφάλεια, σύμφωνα με τις εγκεκριμένες κατευθυντήριες γραμμές. Τα συστήματα αυτά επαληθεύονται σε τακτά χρονικά διαστήματα από την ΕΕΑΕ

- ΦΕΚ 216, 6.3.2001 Αριθ. 1014 (ΦΟΡ) 93 Κανονισμός ακτινοπροστασίας

Ακτινοπροστασία

Ο κανονισμός ακτινοπροστασίας αποτελεί νόμο του κράτους (αριθ. 1014 (ΦΟΡ) 94) και αποσκοπεί στην προστασία ανθρώπων αγαθών και περιβάλλοντος από τις επιβλαβείς επιδράσεις των ιοντιζουσών ακτινοβολιών που προέρχονται από την ειρηνική τους χρήση. Πεδίο εφαρμογής των κανονισμών ακτινοπροστασίας είναι η παραγωγή, εισαγωγή,

επεξεργασία, χρησιμοποίηση, κατοχή, αποθήκευση, μεταφορά και απόρριψη, ραδιενεργών ουσιών, φυσικών και τεχνητών. Ακόμη αφορά στη χρήση μηχανημάτων παραγωγής ιοντίζουσών ακτινοβολιών, καθώς και οποιαδήποτε άλλη δραστηριότητα που εγκυμονεί κίνδυνο προερχόμενο από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες.

Αρμόδια Αρχή για θέματα ακτινοπροστασίας από τους κινδύνους που προκύπτουν από τις ιοντίζουσες και μη-ιοντίζουσες ακτινοβολίες στην Ελλάδα είναι η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ). Στο πλαίσιο των αρμοδιοτήτων της μεριμνά για την εφαρμογή των παρόντων Κανονισμών και εισηγείται πρόσθετα μέτρα, οποτεδήποτε κρίνει σκόπιμο, προκειμένου να υλοποιείται ο αντικειμενικός σκοπός των κανονισμών και να εξασφαλίζεται ο περιορισμός των ατομικών και συλλογικών δόσεων, που προκύπτουν ή μπορεί να προκύψουν από εκθέσεις που είναι δυνατόν να ελεγχθούν, εφαρμόζοντας τις παρακάτω γενικές αρχές.

Βασικές Αρχές Χρήσης Ιοντίζουσών Ακτινοβολιών

Οι βασικές αρχές που επιβάλλονται από τον κανονισμό ακτινοπροστασίας και εφαρμόζονται κατά την χρήση των ιοντίζουσών ακτινοβολιών ώστε να περιορίζονται οι ατομικές και συλλογικές δόσεις είναι:

Αρχή Αιτιολόγησης

Τα διάφορα είδη δραστηριοτήτων με ιοντίζουσες ακτινοβολίες προτού εγκριθούν για πρώτη φορά, πρέπει να κριθούν αιτιολογημένα βάσει των κοινωνικό-οικονομικών ή άλλων πλεονεκτημάτων που παρέχουν σε σχέση με την

βλάβη στην υγεία την οποία μπορεί να προκαλέσουν. Η αιτιολόγηση μπορεί να έχει γενικό και όχι ειδικό κατά περίπτωση χαρακτήρα.

Αρχή Βελτιστοποίησης

Κάθε έκθεση που οφείλεται σε μία αιτιολογημένη πρακτική ή μία πηγή, πρέπει να προγραμματίζεται ώστε το μέγεθος των συνεπαγομένων δόσεων, ο αριθμός των εκτιθεμένων ατόμων και η πιθανότητα να προκύψουν μη αναμενόμενες εκθέσεις, να διατηρηθούν τόσο χαμηλά όσο είναι λογικά εφικτό λαμβάνοντας υπ' όψη τις δυνατότητες της υπάρχουσας τεχνολογίας, τα πορίσματα της ανάλυσης κόστους-οφέλους και γενικά κάθε σχετικό κοινωνικό και οικονομικό παράγοντα. Η διαδικασία αυτή απαιτεί περιορισμό στις ατομικές εκθέσεις (εφαρμογή περιοριστικών επιπέδων δόσεων) καθώς και περιορισμό του ατομικού κινδύνου από δυνητικές εκθέσεις κατά τρόπον ώστε να περιορίζονται οι πιθανές ανισότητες που προκύπτουν από ενδογενείς, οικονομικούς και κοινωνικούς λόγους.

Αρχή Ορίων Δόσεων

Δεν επιτρέπεται υπέρβαση των ορίων δόσεων παρά μόνο σε ειδικές περιπτώσεις και αφού ληφθεί υπόψη η Αρχή της Αιτιολόγησης. Η αρχή αυτή δεν ισχύει για τις ιατρικές εφαρμογές στους ασθενείς.

Βασικές Αρχές για την Προστασία των Εργαζομένων

Οι ακόλουθες αρχές πρέπει να τηρούνται κατά την εργασία, για την προστασία των επαγγελματικά εκτιθεμένων εργαζομένων.

1. Προκαταρκτική αξιολόγηση

Προκαταρκτική αξιολόγηση για τον προσδιορισμό της φύσης και του μεγέθους του κινδύνου ακτινοβολίας για τους εκτιθέμενους εργαζόμενους, και εφαρμογή της βελτιστοποίησης της ακτινοπροστασίας σε όλες τις συνθήκες εργασίας.

2. Ταξινόμηση των χώρων εργασίας σε διάφορες ζώνες

Ταξινόμηση των χώρων εργασίας σε διάφορες ζώνες, με βάση, κατά περίπτωση, τον υπολογισμό των προβλεπόμενων ετήσιων δόσεων καθώς και της πιθανότητας και κλίμακας των δυνητικών εκθέσεων. Έτσι οι χώροι εργασίας για την προστασία των εργαζομένων ταξινομούνται στις ακόλουθες περιοχές:

A. Ελεγχόμενη ζώνη

Ελεγχόμενη ζώνη είναι κάθε περιοχή μέσα στην οποία ενδέχεται να γίνει υπέρβαση των 6 mSv ετησίως, ή αλλιώς, κάθε περιοχή που ενδέχεται να γίνει υπέρβαση των 3/10 των ετησίων δόσεων που καθορίζεται για τους επαγγελματικά εκτεθειμένους. Τέτοιες περιοχές είναι:

B. Επιβλεπόμενη ζώνη

Επιβλεπόμενη ζώνη θεωρείται κάθε περιοχή στην οποία ενδέχεται να γίνει υπέρβαση του 1 mSv ανά έτος, ή αλλιώς, κάθε περιοχή που ενδέχεται να γίνει υπέρβαση του 1/10 των ετησίων ορίων δόσεων που προβλέπονται για τους

Γ. Περιοχές χωρίς ειδική πρόβλεψη

Πρόκειται για περιοχές όπου δεν υπάρχει πιθανότητα να γίνει υπέρβαση του 1/10 του ετήσιου ορίου δόσεων. Όλες οι περιοχές του νοσοκομείου, εκτός αυτών που αναφέρθηκαν στις δύο προηγούμενες παραγράφους, ανήκουν σε περιοχές χωρίς ειδική πρόβλεψη.

3. Ταξινόμηση των εργαζομένων σε διάφορες κατηγορίες για λόγους επίβλεψης

Έχουμε τις εξής κατηγορίες εργαζομένων:

Κατηγορία Α: Οι εκτιθέμενοι εργαζόμενοι που ενδέχεται να δεχτούν ενεργό δόση μεγαλύτερη από 6 mSv ανά έτος ή ισοδύναμη δόση μεγαλύτερη από τα τρία δέκατα (3/10) των ορίων δόσης για τους φακούς των οφθαλμών, το δέρμα, τα άκρα κ.τ.λ.

Κατηγορία Β: Όσοι εκτιθέμενοι εργαζόμενοι δεν κατατάσσονται στους εκτιθέμενους εργαζόμενους της κατηγορίας Α.

4. Εφαρμογή κατάλληλων μέτρων ελέγχου και παρακολούθησης

Εφαρμογή κατάλληλων μέτρων ελέγχου και παρακολούθησης για τις διάφορες ζώνες και συνθήκες εργασίας, συμπεριλαμβανομένης, όπου αυτό απαιτείται, της ατομικής παρακολούθησης. Η εκτίμηση, η εφαρμογή των μέτρων και ο έλεγχος των οργάνων για την ακτινοπροστασία των εκτιθέμενων εργαζομένων, πρέπει να πραγματοποιούνται από τον υπεύθυνο ακτινοπροστασίας. Οι εξετάσεις και οι έλεγχοι των συσκευών προστασίας και των οργάνων μέτρησης, περιλαμβάνουν ειδικότερα:

Την προκαταρκτική αξιολόγηση και έλεγχο των σχεδίων εγκαταστάσεων από την άποψη προστασίας από την ακτινοβολία.

Την έγκριση λειτουργίας νέων ή τροποποιημένων πηγών από την άποψη προστασίας από την ακτινοβολία.

Τον περιοδικό έλεγχο της αποτελεσματικότητας των μέσων και των τεχνικών προστασίας.

Την τακτική βαθμονόμηση των οργάνων μέτρησης πεδίων ακτινοβολιών και ραδιενεργού ρύπανσης σε αναγνωρισμένο από την Ε.Ε.Α.Ε. υποπρότυπο εργαστήριο οργάνων μέτρησης ιοντιζουσών ακτινοβολιών και τον τακτικό έλεγχο της καλής κατάστασης λειτουργίας τους και της ορθής χρησιμοποίησής τους.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω ελέγχων καταχωρούνται σε ειδικό βιβλίο το οποίο θεωρείται από τον αδειούχο του εργαστηρίου και υπόκειται στον έλεγχο της ΕΕΑΕ.

5. Ιατρική παρακολούθηση

Οι παραπάνω αρχές εκτιμώνται και προτείνονται από τον υπεύθυνο ακτινοπροστασίας για κάθε πρακτική και διαβιβάζονται από τον αδειούχο στην ΕΕΑΕ, για τελική έγκριση.

Όρια Δόσεων για Εργαζομένους

Εργαζόμενοι κάτω των 18 ετών δεν πρέπει να απασχολούνται σε θέση εργασίας στην οποία θα καθίστανται επαγγελματικά εκτιθέμενοι σε ακτινοβολίες.

Μητέρες που γαλουχούν δεν πρέπει να απασχολούνται σε εργασίες που συνεπάγονται σημαντικό κίνδυνο ραδιενεργού ρύπανσης.

Το όριο της ενεργού δόσεως των επαγγελματικά εκτιθεμένων είναι 20 mSv κατά τη διάρκεια ενός έτους και 100 mSv κατά την περίοδο πέντε συνεχόμενων ετών. Είναι δυνατόν σε εξαιρετικές περιπτώσεις η ενεργός δόση κατά τη διάρκεια ενός μεμονωμένου έτους να φθάσει τα 50 mSv, με την προϋπόθεση ότι τα πέντε προηγούμενα συνεχόμενα έτη, συμπεριλαμβανομένου και του τρέχοντος, η ενεργός δόση δεν έχει υπερβεί τα 100 mSv. Η περίοδος των 5 συνεχόμενων ετών αρχίζει να προσμετράτε από το έτος 2000.

Μόλις δηλώνεται εγκυμοσύνη από την εργαζόμενη έγκυο γυναίκα, πρέπει να λαμβάνονται μέτρα ώστε η έκθεση της γυναίκας στο επαγγελματικό περιβάλλον να είναι τόση ώστε η προς το έμβρυο ισοδύναμη δόση που αθροίζεται κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ της δήλωσης της εγκυμοσύνης και του τοκετού να είναι τόσο χαμηλή όσο είναι λογικά εφικτό και να μην υπερβαίνει σε οποιαδήποτε περίπτωση το 1mSv.

Χωρίς να παραβιάζεται το όριο που καθορίζεται στην προηγούμενη παράγραφο το όριο της ισοδύναμης δόσης για το φακό των οφθαλμών καθορίζεται σε 150 mSv ανά έτος. Το όριο της ισοδύναμης δόσης για το δέρμα καθορίζεται σε 500 mSv κατά τη διάρκεια ενός έτους. Το όριο αυτό ισχύει για την κατά μέσο όρο δόση στην επιφάνεια 1cm² του δέρματος, ανεξαρτήτως της έκτασης της επιφάνειας του δέρματος που εκτίθεται. Το όριο ισοδύναμης δόσης για τις άκρες χείρες, τα αντιβράχια, το κάτω μέρος της κνήμης και τους άκρους πόδες, καθορίζεται σε 500 mSv κατά τη διάρκεια του έτους.

Μόνο εθελοντές εργαζόμενοι της κατηγορίας Α, επιτρέπεται να υποβληθούν σε εκθέσεις με ειδική έγκριση. Κάθε έκθεση με ειδική έγκριση πρέπει να αποτελεί αντικείμενο ειδικής έγκρισης, που χορηγείται από τον υπεύθυνο του εργαστηρίου ή ιδρύματος ή επιχείρησης, μετά σύμφωνη γνώμη του Υπεύθυνου Ακτινοπροστασίας και του εξουσιοδοτημένου ιατρού.

Η Δ/ση του Ιδρύματος, η επιχείρηση ή ο υπεύθυνος του εργαστηρίου θα πρέπει να δικαιολογήσει λεπτομερώς εκ των προτέρων κάθε έκθεση με ειδική έγκριση. Τέτοιου είδους εγκρίσεις θα πρέπει να δίνονται μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις, για περιορισμένο χρονικό διάστημα, κατά την κανονική λειτουργία, σε μία ορισμένη περιοχή, όταν εναλλακτικές τεχνικές που δεν περικλείουν τέτοια έκθεση δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ηλικία και η υγεία των εν λόγω εργαζομένων.

Τα περιοριστικά επίπεδα δόσεων ή δεσμευμένων δόσεων κατά τη διάρκεια εκθέσεων με ειδική έγκριση καθορίζονται από την ΕΕΑΕ και δεν πρέπει κατά τη διάρκεια κάθε έτους να υπερβαίνουν το διπλάσιο των ετησίων ορίων δόσεων και το πενταπλάσιο των ετήσιων ορίων δόσεων κατά τη διάρκεια της ζωής.

Ο εργαζόμενος, πριν υποβληθεί σε μία έκθεση με ειδική έγκριση, πρέπει να ενημερώνεται εκ των προτέρων, καταλλήλως και επαρκώς για τους κινδύνους και τις προφυλάξεις που πρέπει να λαμβάνει κατά τη διάρκεια αυτών των εργασιών. Η ενημέρωση γίνεται από τον Υπεύθυνο Ακτινοπροστασίας και τον εξουσιοδοτημένο ιατρό.

Όλες οι εκθέσεις που οφείλονται σε ατύχημα ή προκύπτουν από έκτακτη ανάγκη, πρέπει να καταχωρούνται στον ιατρικό φάκελο του εργαζομένου. Οι δόσεις και οι δεσμευμένες δόσεις που λαμβάνονται από εκθέσεις που οφείλονται σε ατύχημα ή προκύπτουν από έκτακτη ανάγκη εκτιμώνται κατά το μέτρο του δυνατού και καταχωρούνται χωριστά στο δελτίο έκθεσης. Σε εκθέσεις που προκύπτουν από έκτακτη ανάγκη υποβάλλονται μόνο εθελοντές, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να ανακαλούν την προσφορά τους. Οι εθελοντές ενημερώνονται προηγουμένως για τους κινδύνους που συνεπάγεται η επέμβασή τους. Η ενημέρωση αυτή παρέχεται από τον υπεύθυνο ακτινοπροστασίας και τον εξουσιοδοτημένο ιατρό. Μετά από εθελοντική έκθεση, που αυτή αποδεδειγμένα υπερβαίνει τα όρια του κανονισμού, ο εργαζόμενος υπόκειται σε ιατρική παρακολούθηση και προσφέρει προσωρινά ή μόνιμα, τις συνηθισμένες, ανάλογα με την ειδικότητά του, υπηρεσίες, χωρίς να εκτίθεται σε ακτινοβολία. Τα περιοριστικά επίπεδα δόσεων ή δεσμευμένων δόσεων κατά τις εκθέσεις για τους εθελοντές που μετέχουν στην αντιμετώπιση έκτακτης ανάγκης, καθορίζονται κατά περίπτωση από την ΕΕΑΕ και δύναται να υπερβαίνουν το διπλάσιο των ετησίων ορίων δόσεων. Δεν μπορούν να υπερβαίνουν το πενταπλάσιο των ετησίων ορίων δόσεων κατά τη διάρκεια της ζωής του εργαζομένου.

Όσον αφορά την έκθεση εξαιτίας της παρουσίας του ραδονίου και των θυγατρικών του σε εργασιακούς χώρους ισχύουν τα ακόλουθα:

Εργασιακοί χώροι στους οποίους η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου (που αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια εργασίας 2000 ωρών), είναι μικρότερη από 400Bq/m³, εξαιρούνται περαιτέρω ελέγχου και μέτρων ακτινοπροστασίας.

Σε εργασιακούς χώρους στους οποίους η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου (που αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια εργασίας 2000 ωρών), είναι μεγαλύτερη από 400 Bq/m³ και μικρότερη από 1000 Bq/m³, θα πρέπει να διερευνηθεί η δυνατότητα μείωσης των ανωτέρω συγκεντρώσεων με κατάλληλες τεχνικές. Οι χώροι αυτοί χαρακτηρίζονται ως επιβλεπόμενες περιοχές τα δε λαμβανόμενα μέτρα ακτινοπροστασίας εγκρίνονται από την ΕΕΑΕ.

Εργασιακοί χώροι στους οποίους η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου (που αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια εργασίας 2000 ωρών), είναι μεγαλύτερη από 1000Bq/m³

και μικρότερη από 3000Bq/m³, χαρακτηρίζονται ως ελεγχόμενες περιοχές και οι πρακτικές αδειοδοτούνται από τη ΕΕΑΕ, τα δε λαμβανόμενα μέτρα ακτινοπροστασίας εγκρίνονται από την ΕΕΑΕ.

Η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση του ραδονίου σε εργασιακούς χώρους, δεν μπορεί να υπερβαίνει τα 3000Bq/m³ λαμβανομένων υπ' όψη των 2000 ωρών διάρκειας εργασίας.

Οι δοσιμετρικές μετρήσεις και η δοσιμετρική παρακολούθηση των εργασιακών δραστηριοτήτων που ορίζονται στην προηγούμενη παράγραφο πραγματοποιούνται από την ΕΕΑΕ ή από εξουσιοδοτημένα από την ΕΕΑΕ φυσικά και νομικά πρόσωπα. Τα κριτήρια για την ανωτέρω εξουσιοδότηση καθορίζονται κατά περίπτωση από την ΕΕΑΕ.

Τα εξουσιοδοτημένα από την ΕΕΑΕ φυσικά και νομικά πρόσωπα που πραγματοποιούν τις ανωτέρω μετρήσεις πρέπει να κοινοποιούν στην ΕΕΑΕ τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Ιατρική Παρακολούθηση Εκτιθεμένων Εργαζομένων

Η Ιατρική παρακολούθηση των εκτιθέμενων εργαζομένων στηρίζεται στις αρχές που διέπουν την ιατρική της εργασίας και στις ειδικές αρχές που προκύπτουν από τις απαιτήσεις της ακτινοπροστασίας και περιλαμβάνει εξετάσεις πριν από την πρόσληψή του και περιοδικές εξετάσεις υγείας, των οποίων η φύση και η συχνότητα καθορίζονται από την κατάσταση της υγείας του εργαζόμενου, τις συνθήκες εργασίας του και τα περιστατικά που είναι δυνατό να έχουν σχέση με αυτές.

Αποκλείεται η απασχόληση οποιουδήποτε εργαζόμενου σε θέση στην οποία είναι πιθανόν να εκτεθεί σε ακτινοβολία λόγω της εργασίας του, εφόσον τα αποτελέσματα των ιατρικών εξετάσεων δεν το επιτρέπουν, σύμφωνα με γνωμοδότηση του αρμόδιου εξουσιοδοτημένου ιατρού ή των υγειονομικών υπηρεσιών εργασίας.

Ιατρική επίβλεψη των εργαζομένων της Κατηγορίας Α

Η ιατρική επίβλεψη των εργαζομένων της κατηγορίας Α είναι υποχρεωτική και αποτελεί ευθύνη των εξουσιοδοτημένων ιατρών ή εξουσιοδοτημένων υγειονομικών υπηρεσιών εργασίας και περιλαμβάνει:

1. Ιατρική εξέταση πριν από την πρόσληψη

Ο σκοπός της διεξοδικής αυτής εξέτασης είναι να διαπιστωθεί εάν ο εν λόγω εργαζόμενος είναι ικανός να απασχολείται ως εργαζόμενος της κατηγορίας Α στη θέση στην οποία πρόκειται να τοποθετηθεί.

Περιλαμβάνει:

Ιστορικό, στο οποίο αναφέρονται και όλες οι προηγούμενες γνωστές εκθέσεις σε ιοντίζουσα ακτινοβολία, που είναι αποτέλεσμα είτε των μέχρι τότε ενασχολήσεων του εργαζόμενου, είτε γνωστών ιατρικών εξετάσεων και θεραπειών

2. Γενική ιατρική επίβλεψη

Ο εξουσιοδοτημένος ιατρός ή οι υγειονομικές υπηρεσίες εργασίας δικαιούνται να έχουν πρόσβαση σε κάθε πληροφορία που θεωρείται αναγκαία για την εκτίμηση της καταστάσεως

της υγείας των υπό ιατρική παρακολούθηση εργαζομένων και για την αξιολόγηση των συνθηκών, του περιβάλλοντος στους χώρους εργασίας, στο μέτρο κατά το οποίο θα ήταν δυνατόν να επηρεάσουν την καταλληλότητα, από απόψεως υγείας, των εργαζομένων, για την άσκηση των καθηκόντων που τους ανατίθενται.

3. Περιοδική επίβλεψη της υγείας

Η υγεία των εργαζομένων πρέπει να αποτελεί αντικείμενο τακτικών εξετάσεων, για να διαπιστώνεται, αν αυτοί συνεχίζουν να είναι ικανοί για την άσκηση των καθηκόντων τους. Οι εξετάσεις αυτές εξαρτώνται από το είδος και την έκταση της έκθεσης σε ionίζουσες ακτινοβολίες και από την κατάσταση της υγείας του εργαζομένου. Οι περιοδικές εξετάσεις γίνονται κατά προτίμηση το πρώτο τρίμηνο κάθε ημερολογιακού έτους, εκτός αν οι υπηρεσιακές ανάγκες ορίζουν άλλη χρονική κατανομή.

Η κατάσταση της υγείας κάθε εργαζόμενου της κατηγορίας Α ελέγχεται τουλάχιστον μία φορά το χρόνο, προκειμένου να καθοριστεί εάν παραμένει ικανός να εκτελέσει τα καθήκοντά του. Η φύση των εν λόγω ελέγχων, οι οποίοι μπορούν να διενεργηθούν όσες φορές κρίνει αναγκαίο ο εξουσιοδοτημένος ιατρός, εξαρτάται από τον τύπο της εργασίας και από την κατάσταση υγείας του συγκεκριμένου εργαζομένου.

Ο εξουσιοδοτημένος ιατρός ή οι εξουσιοδοτημένες υγειονομικές υπηρεσίες εργασίας μπορούν να υποδείξουν την ανάγκη ιατρικής επίβλεψης και μετά την παύση της εργασίας για όσο διάστημα κρίνουν αναγκαίο για τη διαφύλαξη της υγείας του ενδιαφερόμενου ατόμου.

Ιατρικοί Φάκελοι

Για κάθε εργαζόμενο κατηγορίας Α τηρείται ιατρικός φάκελος, ο οποίος ενημερώνεται για όσο διάστημα ο εργαζόμενος παραμένει στην κατηγορία αυτή. Ο φάκελος φυλάσσεται στο αρχείο μέχρι το άτομο να φτάσει ή να είχε φτάσει στην ηλικία των 75 ετών, αλλά οπωσδήποτε όχι λιγότερο από 30 έτη μετά την οριστική διακοπή της εργασίας που συνεπάγεται έκθεση σε ionίζουσες ακτινοβολίες. Ο ιατρικός φάκελος περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τη φύση της απασχόλησης, τα αποτελέσματα των ιατρικών εξετάσεων πριν από την πρόσληψη ή την κατάταξή του ως εργαζόμενου της κατηγορίας Α, τις περιοδικές ιατρικές εξετάσεις και την καταγραφή των δόσεων.

Ειδική επίβλεψη εκτιθεμένων εργαζομένων

Ειδική ιατρική επίβλεψη πραγματοποιείται σε κάθε περίπτωση κατά την οποία έχει συμβεί υπέρβαση ή υπάρχει δικαιολογημένη υπόνοια ότι έχει συμβεί υπέρβαση ενός από τα όρια δόσης. Οι μετέπειτα συνθήκες έκθεσης υπόκεινται στην έγκριση του εξουσιοδοτημένου ιατρού ή των εξουσιοδοτημένων υγειονομικών υπηρεσιών εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

5.1 Η πυρηνική ενέργεια ως μέρος της ενεργειακής λύσης

Πολλοί περιβαλλοντολόγοι έχουν αντιταχθεί στην πυρηνική ενέργεια, επικαλούμενοι τους κινδύνους και τη δυσκολία διαχείρισης των ραδιενεργών αποβλήτων. Ωστόσο, αυτή η διπλωματική υποστηρίζει πως η πυρηνική ενέργεια είναι ο ασφαλέστερος και πιο “καθαρός” τρόπος, από τις περισσότερες πηγές ενέργειας για παραγωγή ενέργειας σε έναν κόσμο ο οποίος ελπίζει να μειώσει ριζικά τις εκπομπές άνθρακα.

Στα τέλη του 16ου αιώνα, όταν το αυξανόμενο κόστος του καυσόξυλου ανάγκασε τους απλούς Λονδρέζους να στραφούν απρόθυμα στον άνθρακα, οι ιεραπόστολοι της Ελισάβετ κινήθηκαν ενάντια σε αυτό το καύσιμο διότι πίστευαν ότι ήταν, κυριολεκτικά, τα κόπρανα του διαβόλου. Ο άνθρακας ήταν μαύρος, βρώμικος, και βρισκόταν σε στρώματα υπόγεια του εδάφους - προς την Κόλαση στο κέντρο της γης - και μύριζε έντονα θείο όταν καιγόταν. Η μετάβαση σε άνθρακα, σε σπίτια που συνήθως δεν είχαν καμινάδες, ήταν αρκετά δύσκολη, και η ειλικρινής καταδίκη των κληρικών, που ήταν σίγουρα δικαιολογημένη από περιβαλλοντικής άποψης, περιέπλεκε περαιτέρω την όλη κατάσταση και καθυστέρουσε την έγκαιρη επίλυση ενός επείγοντος προβλήματος στον ενεργειακό ανεφοδιασμό.

Για πάρα πολλούς περιβαλλοντολόγους που ασχολούνται με την υπερθέρμανση του πλανήτη, η πυρηνική ενέργεια είναι σήμερα αντίστοιχα τα κόπρανα του διαβόλου. Το καταδικάζουν για την παραγωγή και τη χρήση ραδιενεργών καυσίμων και για το υποτιθέμενο πρόβλημα διαχείρισης των αποβλήτων του. Κατά την άποψή μου, η καταδίκη τους για αυτήν την αποτελεσματική πηγή ενέργειας είναι λανθασμένη. Η πυρηνική ενέργεια, μπορεί να είναι και πρέπει να είναι ένα σημαντικό συστατικό της διάσωσής μας από έναν θερμότερο, πιο μετεωρολογικά καταστροφικό πλανήτη.

Όπως όλες οι πηγές ενέργειας, η πυρηνική ενέργεια έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ποια είναι τα οφέλη της πυρηνικής ενέργειας; Πρώτα απ' όλα, δεδομένου ότι παράγει ενέργεια μέσω πυρηνικής σχάσης και όχι καύσης χημικών, παράγει βασικό φορτίο ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς να απελευθερώνει διοξείδιο του άνθρακα, το “κακό” στοιχείο της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Η μετάβαση από το φυσικό αέριο είναι ένα βήμα προς την απελευθέρωση, καθώς η καύση φυσικού αερίου παράγει περίπου το μισό διοξείδιο του άνθρακα. Ωστόσο, η μετάβαση από τον άνθρακα σε πυρηνική ενέργεια είναι απόλυτα καθαρή, καθώς οι πυρηνικοί σταθμοί δεν επιβαρύνουν το πρόβλημα του θερμοκηπίου, παρά μόνο από τη βοηθητική χρήση ορυκτών καυσίμων κατά την κατασκευή, την εξόρυξη, την επεξεργασία καυσίμων, τη συντήρηση και τον παροπλισμό - περίπου όσο η ηλιακή ενέργεια, δηλαδή περίπου 4 έως 5 τοις εκατό όσο και ένας σταθμός ηλεκτροπαραγωγής με φυσικό αέριο. Επιπλέον, η πυρηνική ενέργεια απελευθερώνει λιγότερη ακτινοβολία στο περιβάλλον από οποιαδήποτε άλλη πηγή ενέργειας.

Δεύτερον, οι πυρηνικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας λειτουργούν με πολύ υψηλότερους συντελεστές δυναμικότητας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή τα ορυκτά καύσιμα. Ο συντελεστής χωρητικότητας είναι ένα μέτρο του ποσοστού του χρόνου παραγωγής ενός σταθμού παραγωγής ενέργειας. Είναι πρόβλημα για όλες τις διαλείπουσες πηγές ενέργειας. Ο

ήλιος δεν λάμπει πάντα, ούτε ο άνεμος φυσάει, ούτε το νερό πέφτει πάντα μέσα από τις τουρμπίνες ενός φράγματος.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες το 2016, οι πυρηνικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας, οι οποίοι παρήγαγαν σχεδόν το 20% της ηλεκτρικής ενέργειας των ΗΠΑ, είχαν μέσο συντελεστή χωρητικότητας 92,3%, που σημαίνει ότι λειτουργούσαν με πλήρη ισχύ σε 336 από 365 ημέρες ετησίως. (Οι άλλες 29 ημέρες αφαιρέθηκαν από το δίκτυο για συντήρηση.) Αντίθετα, τα αμερικανικά υδροηλεκτρικά συστήματα παρέδωσαν ισχύ 38,2 τοις εκατό του χρόνου (138 ημέρες το χρόνο), ανεμογεννήτριες 34,5 τοις εκατό του χρόνου (127 ημέρες το χρόνο) και ηλιακή ηλεκτρικές συστοιχίες μόνο 25,1 τοις εκατό του χρόνου (92 ημέρες το χρόνο). Ακόμη και τα εργοστάσια που τροφοδοτούνται με άνθρακα ή φυσικό αέριο παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μόνο περίπου το μισό χρόνο για λόγους όπως το κόστος καυσίμων και οι εποχιακές και νυκτερινές διακυμάνσεις της ζήτησης. Η πυρηνική ενέργεια είναι σαφής νικητής στην αξιοπιστία.

Τρίτον, η πυρηνική ενέργεια απελευθερώνει λιγότερη ακτινοβολία στο περιβάλλον από οποιαδήποτε άλλη σημαντική πηγή ενέργειας. Αυτή η δήλωση θα φαίνεται παράδοξο σε πολλούς αναγνώστες, καθώς δεν είναι κοινώς γνωστό ότι οι μη πυρηνικές πηγές ενέργειας απελευθερώνουν οποιαδήποτε ακτινοβολία στο περιβάλλον. Ο χειρότερος παραβάτης είναι ο άνθρακας, ένα ορυκτό του φλοιού της γης που περιέχει σημαντικό όγκο ραδιενεργών στοιχείων ουράνιο και θόριο. Ο καύσιμος άνθρακας αεριοποιεί τα οργανικά του υλικά, συγκεντρώνοντας τα ορυκτά του συστατικά στα εναπομείναντα απόβλητα, που ονομάζεται fly ash. Τόσο πολύς άνθρακας καίγεται στον κόσμο και παράγεται τόση ιπτάμενη τέφρα που ο άνθρακας είναι στην πραγματικότητα η κύρια πηγή ραδιενεργών απελευθερώσεων στο περιβάλλον.^[68]

Από την άλλη τα μειονεκτήματα της πυρηνικής ενέργειας, κατά την αντίληψη του κοινού, είναι δύο. Αυτά που σχετίζονται με την ακτινοβολία, δηλαδή ο κίνδυνος ατυχημάτων, και το ζήτημα της διαχείρισης πυρηνικών αποβλήτων.

Υπήρξαν τρία ατυχήματα μεγάλης κλίμακας που αφορούσαν πυρηνικούς αντιδραστήρες από την έναρξη της εμπορικής πυρηνικής ενέργειας στα μέσα της δεκαετίας του 1950: Νησί Three-Mile στην Πενσυλβάνια, Τσερνομπίλ στην Ουκρανία και Φουκουσίμα στην Ιαπωνία.

5.2 Μία σύντομη ανασκόπηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των επιπτώσεων στην υγεία από τα ατυχήματα στα πυρηνικά εργοστάσια

Ένας σεισμός μεγέθους 9,0 ρίχτερ και επακόλουθο τσουνάμι σημειώθηκαν στον Ειρηνικό Ωκεανό βόρεια της πόλης Honshu της Ιαπωνίας, στις 11 Μαρτίου 2011, ο οποίος προκάλεσε σοβαρές ζημιές στον πυρηνικό σταθμό Fukushima Daiichi (F-1NPP). Αυτό το ατύχημα είχε ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση ραδιενεργών υλικών στην ατμόσφαιρα και τον ωκεανό και προκάλεσε εκτεταμένη μόλυνση του περιβάλλοντος^[22-25]. Το ατύχημα αξιολογήθηκε προσωρινά ως επιπέδου 7, το υψηλότερο επίπεδο, στη Διεθνή κλίμακα πυρηνικών και ακτινολογικών γεγονότων. Αυτό το επίπεδο είναι το ίδιο με το ατύχημα του πυρηνικού

σταθμού του Τσερνομπίλ (CNPP) το 1986. Το 1979, το πιο σοβαρό ατύχημα που είχε συμβεί στην εμπορική λειτουργία πυρηνικού σταθμού στις ΗΠΑ συνέβη στο πυρηνικό εργοστάσιο του Three Mile Island (TMINPP) και είχε ως αποτέλεσμα σε απελευθερώσεις ραδιενεργών υλικών.

Σε αυτό το υποκεφάλαιο, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και οι επιπτώσεις στην υγεία εξετάζονται εν συντομία για αυτά τα τρία ατυχήματα, συμπεριλαμβανομένης της αιτίας των ατυχημάτων και των εκτιμήσεων των κύριων ραδιονουκλεϊδίων που απελευθερώθηκαν κατά τη διάρκεια κάθε ατυχήματος.

5.2.1 Το ατύχημα στο Three Mile Island

Το TMINPP κατασκευάστηκε σε μια αμμουδιά του ποταμού Susquehanna, νότια του Χάρισμπουργκ, της Πενσυλβάνια, των ΗΠΑ και είχε δύο αντιδραστήρες τύπου PWR. Το ατύχημα στη Μονάδα 2 ξεκίνησε περίπου στις 4 π.μ. στις 28 Μαρτίου 1979. Η αιτία του ατυχήματος ήταν η αποτυχία κλεισίματος μιας βαλβίδας πίεσης, η οποία οδήγησε σε σοβαρή ζημιά του μη ψυχρού καυσίμου. Μια σειρά γεγονότων οδήγησε στη συνέχεια στην τήξη του πυρήνα και στην απελευθέρωση προϊόντων σχάσης μέσω της βαλβίδας απελευθέρωσης στο πρωτεύον σύστημα δημιουργίας νερού^[69]. Περίπου 45% του πυρήνα έλιωσε και περίπου 19.000 κιλά λωμένου πυρηνικού υλικού μεταφέρθηκε στην κάτω κεφαλή του δοχείου πίεσης. Παρά την τήξη του καυσίμου, το δοχείο του αντιδραστήρα διατήρησε την ακεραιότητά του και το κατεστραμμένο καύσιμο που εμπεριέχεσθε σε αυτό

- Η ραδιενεργή μόλυνση του περιβάλλοντος

Το ατύχημα απελευθέρωσε μεγάλες ποσότητες ραδιενεργών υλικών από το κατεστραμμένο καύσιμα έως τον περιορισμό, αλλά οι περιβαλλοντικές εκλύσεις ήταν σχετικά μικρές. Τα περισσότερα προϊόντα σχάσης συγκρατήθηκαν στο νερό του πυρήνα του αντιδραστήρα. Τα κύρια ραδιονουκλεΐδια που απελευθερώνονται στο περιβάλλον ήταν από ξένον και ιώδιο. Περίπου 370 PBq ευγενών αερίων, κυρίως ^{133}Xe (ξένον), και περίπου 550 GBq από ^{131}I (ιώδιο) απελευθερώθηκαν στην ατμόσφαιρα^[70]. Το Xenon-133 (χρόνος ημιζωής: 5,3 ημέρες) είναι χημικά μη αντιδραστικό και δεν παραμένει στο περιβάλλον αφού διασκορπιστεί στην ατμόσφαιρα.

- Επίπτωσης στην υγεία

Οι μεμονωμένες δόσεις ήταν κατά μέσο όρο 15 μSv εντός 80 χλμ. από το TMINPP, και η μέγιστη επιδιωκόμενη δόση που θα μπορούσε να είχε λάβει κάποιο μέλος του κοινού εκτιμήθηκε ότι ήταν 850 μSv από εξωτερική ακτινοβολία^[71]. Υπολογίστηκε ότι η συνολική δόση που προέκυψε από τη ραδιενέργεια που απελευθερώθηκε στον πληθυσμό που ζούσε σε απόσταση 80 χλμ. από τον πυρηνικό σταθμό παραγωγής ήταν περίπου 20 άτομα Sv μεταξύ 28 Μαρτίου και 15 Απριλίου^[72] ή μέση τιμή 30 manSv (με εύρος 16 manSv έως 53 manSv)

για το χρονικό διάστημα από 28 Μαρτίου έως 7 Απριλίου^[73]. Η εκτιμώμενη ετήσια συνολική δόση σε αυτόν τον πληθυσμό από φυσική ακτινοβολία είναι περίπου 2.400 manSv. Η αύξηση της δόσης ακτινοβολίας σε άτομα που ζουν εντός 80 χλμ. λόγω του ατυχήματος ήταν κάπως μικρότερη από το ένα τοις εκατό του ετήσιου επιπέδου^[74]. Οι δόσεις ακτινοβολίας που έλαβε ο γενικός πληθυσμός ως αποτέλεσμα της έκθεσης στη ραδιενέργεια που απελευθερώθηκε κατά τη διάρκεια του ατυχήματος ήταν τόσο μικρές που δεν ανιχνεύθηκαν πρόσθετες περιπτώσεις καρκίνου, αναπτυξιακών ανωμαλιών ή γενετικής κακής υγείας ως συνέπεια αυτού του ατυχήματος^[75].

5.2.2. Το ατύχημα στο Chernobyl

Το CNPP κατασκευάστηκε στη βόρεια Ουκρανία, περίπου 20 χλμ νότια των συνόρων με τη σημερινή Λευκορωσία και 140 χλμ δυτικά των συνόρων με τη σημερινή Ρωσική. Το ατύχημα στη μονάδα 4 ξεκίνησε λίγο μετά τα μεσάνυχτα στις 26 Απριλίου 1986. Ήταν το πιο σοβαρό που συνέβη ποτέ στην πυρηνική βιομηχανία. Ο αντιδραστήρας Τσερνομπίλ ήταν ένας αντιδραστήρας υπό πίεση νερού που χρησιμοποιεί ελαφρύ νερό ως ψυκτικό και γραφίτη στις ράβδους ελέγχου. Ο αντιδραστήρας είχε λειτουργήσει για πολλές ώρες σε μη προγραμματισμένες ώρες λειτουργίας, για την προετοιμασία ενός πειράματος σχετικά με την ανάκτηση της ενέργειας στην τουρμπίνα σε περίπτωση μη προγραμματισμένης διακοπής λειτουργίας. Η αιτία του ατυχήματος μπορεί να θεωρηθεί ως έξοδος από τη στάθμη ισχύος που προκάλεσε την εξάτμιση του ψυκτικού νερού μέσα στον αντιδραστήρα. Αυτό προκάλεσε περαιτέρω αύξηση του επιπέδου ισχύος, που προκάλεσε την έκρηξη, λόγω συμπιεσμένου ατμού, που κατέστρεψε τον αντιδραστήρα. Μετά την αρχική έκρηξη, ο γραφίτης στον αντιδραστήρα έπιασε φωτιά και καιγόταν για πολλές ημέρες και οι εκλύσεις ραδιενεργών στοιχείων συνεχίστηκαν μέχρι τις 6 Μαΐου 1986.^[76]

- Επιπτώσεις στο Περιβάλλον

Το ατύχημα του CNPP οδήγησε σε σημαντική απελευθέρωση ραδιενεργών στοιχείων στην ατμόσφαιρα και προκάλεσε εκτεταμένη μόλυνση του περιβάλλοντος. Η απελευθέρωση ραδιενεργών στοιχείων από τον κατεστραμμένο αντιδραστήρα συνέβαινε για μία περίοδο 10 ημερών και εναποτέθηκαν με τη μεγαλύτερη πυκνότητα στις περιοχές που περιβάλλουν τον αντιδραστήρα.

Οι εκτιμήσεις των κύριων ραδιονουκλεϊδίων που απελευθερώθηκαν κατά τη διάρκεια αυτού του ατυχήματος δίνονται στον παρακάτω πίνακα 1. Τα περισσότερα από τα ραδιονουκλεϊδία που απελευθερώθηκαν σε μεγάλες ποσότητες έχουν μικρό χρόνο ημιζωής και τα ραδιονουκλίδια με μακρά ημιζωή γενικά απελευθερώθηκαν σε μικρές ποσότητες. Οι κυκλοφορίες των ¹³¹I, ¹³⁴Cs και ¹³⁷Cs εκτιμήθηκαν ότι ήταν 1.760 PBq, 47 PBq και 85PBq, αντίστοιχα^[26]. Επειδή τα ¹³¹I και ¹³⁷Cs είναι υπεύθυνα για το μεγαλύτερο μέρος της έκθεσης σε ακτινοβολία, είναι τα πιο σημαντικά ραδιονουκλίδια. Οι εκτιμώμενες απελευθερώσεις των ¹³¹I και ¹³⁷Cs ήταν περίπου 50% και 30%, αντίστοιχα, του βασικού αποθέματος. Οι εκτιμώμενες ημερήσιες απελευθερώσεις του ¹³¹I από τον αντιδραστήρα

Τσερνομπίλ φαίνονται στο Σχήμα 1. Η απελευθέρωση του ¹³¹I στις 26 Απριλίου (πρώτη ημέρα απελευθέρωσης) εκτιμήθηκε ότι ήταν 704 PBq, περίπου το 40% αυτού κατά τις πρώτες 10 ημέρες μετά το ατύχημα. Οι εκτιμώμενες κυκλοφορίες των ¹³²Te, ¹³²I, ¹³³I, ¹³⁴I και ¹³⁵I ήταν 1.040 PBq, 1.040 PBq, 910 PBq, 25 PBq και 250 PBq, αντίστοιχα, και ήταν σημαντικά χαμηλότερες από εκείνες του ¹³¹I. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα περισσότερα από τα βραχύβια ραδιονουκλίδια αποσυντέθηκαν στον κατεστραμμένο αντιδραστήρα και δεν απελευθερώθηκαν^[77]

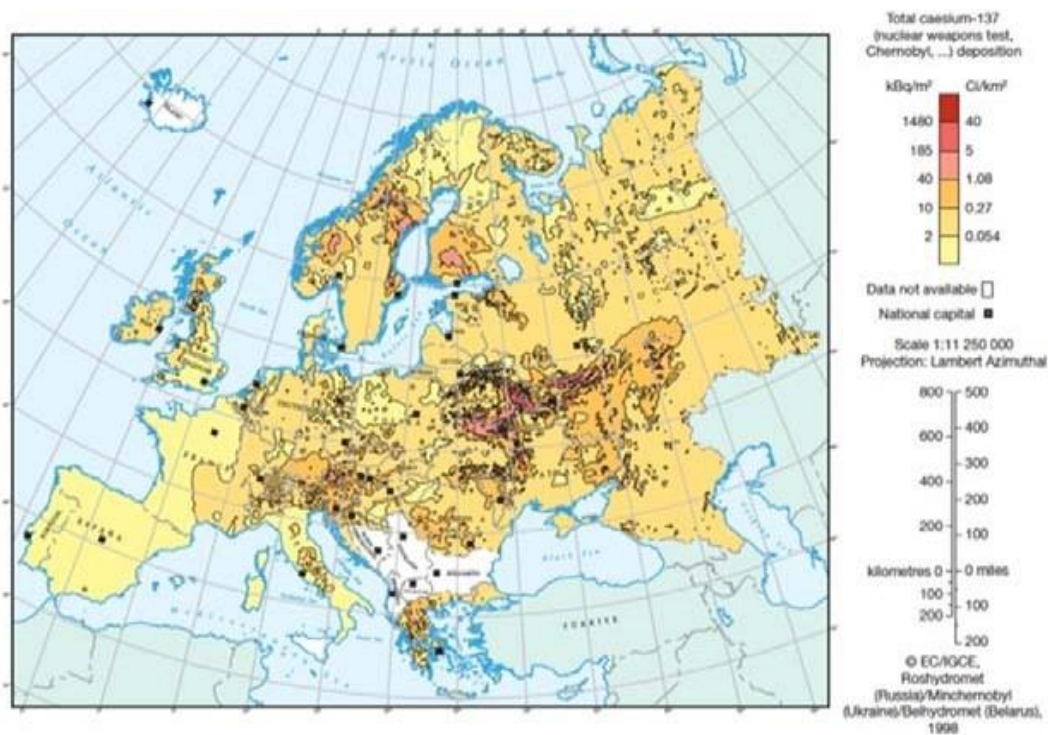
Πίνακας 3: Εκτιμήσεις των κύριων ραδιονουκλεϊδίων που απελευθερώθηκαν κατά τη διάρκεια του ατυχήματος στο Τσερνομπίλ ^[78]

Radionuclide	Half-life	Activity released (PBq)
Inert gases		
Kr-85	10.72 y	33
Xe-133	5.25 d	6,500
Volatile elements		
Te-129m	33.6 d	240
Te-132	3.26 d	~ 1,150
I-131	8.04 d	~ 1,760
I-133	20.8 h	910
Cs-134	2.06 y	~ 47
Cs-136	3.1 d	36
Cs-137	30.0 y	~ 85
Elements with intermediate volatility		
Sr-89	50.5 d	~ 115
Sr-90	29.12y	~ 10
Ru-103	39.3 d	>168
Ru-106	368 d	>73
Ba-140	12.7 d	240
Refractory elements (including fuel particles)		
Zr-95	64.0 d	84
Mo-99	2.75 d	>72
Ce-141	32.5 d	84
Ce-144	284 d	~ 50
Np-239	2.35 d	400
Pu-238	87.74 y	0.015
Pu-239	24,065 y	0.013
Pu-240	6,537 y	0.018
Pu-241	14.4 y	~ 2.6
Pu-242	376,000 y	0.00004
Cm-242	18.1 y	~ 0.4

Πηγή : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ijc.22037>

- Ραδιενεργές μολύνσεις

Οι ραδιενεργές μολύνσεις βρέθηκαν σε κάθε χώρα του βόρειου ημισφαιρίου^[30]. Υπάρχει παρακάτω ένας χάρτης πυκνότητας εναπόθεσης ¹³⁷Cs σε όλη την Ευρώπη. Κατά τη διάρκεια των πρώτων 10 ημερών μετά το ατύχημα, τα ραδιενεργά αέρια και τα σωματίδια μεταφέρθηκαν αρχικά από τον άνεμο σε δυτικές και βόρειες κατευθύνσεις, αλλά στη συνέχεια, οι άνεμοι προερχόμενοι από όλες τις κατευθύνσεις, μετέφεραν τα ραδιενεργά αέρια και προς τις υπόλοιπες χώρες. Η μέση πυκνότητα εναπόθεσης ¹³⁷Cs που υπερβαίνει τα 37 kBq / m² (1 Ci / km²) επιλέχθηκε ως ελάχιστο επίπεδο μόλυνσης. Αυτό το επίπεδο ήταν περίπου δέκα φορές υψηλότερο από την πυκνότητα εναπόθεσης ¹³⁷Cs στην Ευρώπη από την παγκόσμια πτώση και σε αυτό το επίπεδο η ανθρώπινη δόση κατά το πρώτο έτος μετά το ατύχημα ήταν περίπου 1 mSv. Οι χώρες που πλήττονται περισσότερο από το ατύχημα ήταν η Λευκορωσία, η Ρωσική Ομοσπονδία και η Ουκρανία. Υπήρχαν επίσης μολυσμένες περιοχές στις τρεις σκανδιναβικές χώρες (Σουηδία, Φινλανδία και Νορβηγία), Αυστρία, Βουλγαρία, Ελβετία, Ελλάδα, Σλοβενία, Ιταλία και Δημοκρατία της Μολδαβίας. Η συνολική έκταση με πυκνότητα εναπόθεσης ¹³⁷Cs άνω των 555 kBq / m² (15 Ci / km²) το 1986 ήταν 10.300 km², συμπεριλαμβανομένων 6.400 km² στη Λευκορωσία, 2.400 km² στη Ρωσική Ομοσπονδία και 1.500 km² στην Ουκρανία^[79].



Εικόνα 20 Πηγή: M. Yamada “Radiation Emergency Medicine” 2012 Vol. 1 No.1-2 page: 33-39

- Επιπτώσεις στην υγεία

Οι εκτιμήσεις των μέσων ατομικών και συλλογικών δόσεων που έλαβαν οι ομάδες πληθυσμού που εκτέθηκαν ως αποτέλεσμα του ατυχήματος του Τσερνομπίλ ενημερώθηκαν στην έκθεση UNSCEAR 2008. Σύμφωνα με το UNSCEAR 2008, οι ενημερωμένες εκτιμήσεις συνοψίζονται ως εξής.

Υπολογίζεται πως η μέση δόση που έλαβαν οι εργαζόμενοι στην επιχείρηση αποκατάστασης του εργοστασίου μεταξύ 1986 και 1990, κυρίως λόγω εξωτερικής ακτινοβολίας, εκτιμήθηκε ότι ήταν 117 mSv. Η συνολική δόση στους 530.000 εργαζόμενους στην επιχείρηση αυτή εκτιμήθηκε ότι ήταν 61.200 Sv.

Για τους περισσότερους από έξι εκατομμύρια κατοίκους των μολυσμένων περιοχών της πρώην Σοβιετικής Ένωσης που δεν εκκενώθηκαν, η μέση δόση ήταν 102 mGy. Η μέση δόση στα παιδιά προσχολικής ηλικίας ήταν περίπου 2 έως 4 φορές μεγαλύτερη από τον μέσο όρο του πληθυσμού. Οι υψηλές δόσεις μεταξύ του γενικού πληθυσμού οφείλονταν σχεδόν εξ ολοκλήρου στην κατανάλωση φρέσκου γάλακτος που περιείχε ¹³¹I τις πρώτες εβδομάδες μετά το ατύχημα. Για τα 98 εκατομμύρια κατοίκους ολόκληρης της Λευκορωσίας και της Ουκρανίας και 19 περιφέρειες της Ρωσικής Ομοσπονδίας, η μέση δόση ήταν πολύ χαμηλότερη, περίπου 16 mGy. Η μέση δόση στους κατοίκους των άλλων ευρωπαϊκών χωρών ήταν περίπου 1,3 mGy.

Τα έξι εκατομμύρια κάτοικοι των περιοχών της πρώην Σοβιετικής Ένωσης που θεωρήθηκαν μολυσμένα έλαβαν μέσες αποτελεσματικές δόσεις για την περίοδο 1986-2005 περίπου 9 mSv, ενώ για τα 98 εκατομμύρια άτομα που εξετάστηκαν στη Λευκορωσία, τη Ρωσική Ομοσπονδία και την Ουκρανία, η μέση αποτελεσματική δόση ήταν 1,3 mSv, το ένα τρίτο των οποίων ελήφθη το 1986.

5.2.3 Το ατύχημα στην Fukushima

Το F-1NPP κατασκευάστηκε στην περιοχή Futaba στην ακτή του Ειρηνικού στο Νομό Fukushima της Ιαπωνίας. Ένας τεράστιος σεισμός μεγέθους 9,0 ρίχτερ σημειώθηκε στις 2:46 μ.μ. στις 11 Μαρτίου 2011, ακολουθούμενος από τσουνάμι περίπου 1 ώρα μετά τον σεισμό. Οι μονάδες του αντιδραστήρα που ήταν σε λειτουργία κλείνουν αυτόματα. Ωστόσο, η απώλεια τροφοδοτικών έκτακτης ανάγκης οδήγησε σε αστοχίες των συστημάτων ψύξης. Μερική τήξη των πυρηνικών καυσίμων οδήγησε σε εκρήξεις υδρογόνου και έτσι πραγματοποιήθηκε ουσιαστική απελευθέρωση ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον.

- Εκτιμήσεις ραδιενεργής μόλυνσης του περιβάλλοντος

Το Υπουργείο Παιδείας, Πολιτισμού, Αθλητισμού, Επιστήμης και Τεχνολογίας, της Ιαπωνία, συγκέντρωσε δείγματα εδάφους σε περίπου 2.200 τοποθεσίες σε απόσταση περίπου 100 χλμ. από το F-1NPP για να αναλύσει τα εναποτιθέμενα ραδιονουκλίδια. α δείγματα του εδάφους συλλέχθηκαν από ένα επιφανειακό στρώμα 5 cm σε περίπου πέντε σημεία σε κάθε

τοποθεσία, πριν από την περίοδο των βροχών (αρχές του καλοκαιριού), πριν εμφανιστούν οποιεσδήποτε αλλαγές στην επιφάνεια του εδάφους.

Η πυκνότητα εναπόθεσης ^{137}Cs άνω των $1.000 \text{ kBq} / \text{m}^2$ παρατηρήθηκε στις περιοχές Namie και Iitate. Η μέση αναλογία πυκνότητας εναπόθεσης ^{131}I προς εκείνη των ^{137}C ήταν περίπου 0,0059 για σημεία που βρίσκονται βόρεια του πυρηνικού σταθμού και περίπου 0,024 για σημεία παρακολούθησης που βρίσκονται νότια και σε απόσταση 34 χλμ. δυτικά από το εργοστάσιο^[80]

Ραδιενεργά υλικά απελευθερώθηκαν επίσης και στον ωκεανό. Υπήρχαν οι δύο κύριες οδοί: άμεση απόρριψη ραδιενεργών υγρών αποβλήτων στον ωκεανό και ατμοσφαιρική πτώση των αερομεταφερόμενων ραδιενεργών υλικών στην επιφάνεια του ωκεανού. Τα επίπεδα στο σημείο απόρριψης του εργοστασίου ήταν υπερβολικά υψηλά, με κορυφή για ^{137}Cs τα $68 \text{ MBq} / \text{m}^3$. Σημειώθηκε μια σταθερή, αν και χαμηλότερη, συνεχόμενη ρήψη από ^{137}Cs που συνέχισε να εναπόθετε στον ωκεανό τουλάχιστον μέχρι τα τέλη Ιουλίου. Ο Buessler διαπίστωσε επίσης ότι τα επίπεδα των ^{137}Cs στο θαλασσινό νερό 30 χλμ. από το F-1NPP ήταν περίπου 3 έως 4 τάξεις μεγέθους υψηλότερα από αυτά που υπήρχαν πριν από το ατύχημα του F-1NPP. Ο Tsumune χρησιμοποίησαν ένα περιφερειακό μοντέλο ωκεανού για την προσομοίωση των συγκεντρώσεων ^{137}Cs που προέκυψαν από την άμεση απόρριψη στον ωκεανό στα ανοικτά του Νομού Fukushima διαπίστωσε ότι οι συνολικές ποσότητες των ^{137}C που απελευθερώθηκαν άμεσα ήταν $3,5 \pm 0,7 \text{ PBq}$ από τις 26 Μαρτίου έως τα τέλη Μαΐου. Οι εκτιμώμενες ατμοσφαιρικές εναποθέσεις στην επιφάνεια του ωκεανού ήταν περίπου 10 PBq των ^{137}Cs ^[81]

- Επιπτώσεις στην υγεία

Προς το παρόν δεν μπορούν να γίνουν αξιολογήσεις των επιπτώσεων στην υγεία από εκλύσεις ραδιενεργών υλικών από το F-1NPP. Ωστόσο, οι εθνικές και νομαρχιακές κυβερνήσεις έχουν αρχίσει να παρακολουθούν την υγεία των κατοίκων του νομού Φουκουσίμα και των εργαζομένων της αποκατάστασης του εργοστασίου.^[82]

5.3 Διαχείριση πυρηνικών αποβλήτων

Η μακροχρόνια αποθήκευση των πυρηνικών αποβλήτων απαιτεί την εκ των προτέρων στερεοποίηση των αποβλήτων για να διασφαλιστεί ότι αυτά δεν θα αντιδρούν ούτε θα υποβιβάζονται για εκτεταμένο χρονικό διάστημα. Ένας τρόπος για να γίνει αυτό είναι μέσω της υαλοποίησης. Αυτό που γίνεται είναι η πρόσμειξη ζάχαρης στο μίγμα αποβλήτων και στην συνέχεια η ασβεστοποίηση του. Η ασβεστοποίηση του γίνεται παίρνοντας το μίγμα από ένα περιστρεφόμενο και θερμαινόμενο σωλήνα. Σκοπός της ασβεστοποίησης είναι η εξάτμιση του νερού από το μίγμα και η αφαίρεση του νιτρικού οξέος από τα προϊόντα της διάσπασης, με τελικό αποτέλεσμα την στερεοποίηση του μίγματος. Όλη αυτή η διαδικασία δίνει τη μορφή γυαλιού στο μίγμα το οποίο αποθηκεύεται σε ένα κυλινδρικό ανοξειδωτό κιβώτιο.

Στη συνέχεια οι κύλινδροι αυτοί σφραγίζονται, καθαρίζονται, ελέγχονται για εξωτερικές μολύνσεις και αποθηκεύονται σε επιλεγμένους υπόγειους χώρους. Σε αυτή την μορφή τα απόβλητα αναμένεται να είναι αδρανή για μεγάλο χρονικά διάστημα. Το χρονικό πλαίσιο το οποίο αναφέρεται ανέρχεται στα 10.000 με 1.000.000 χρόνια^[84]. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να μελετάται και να εξετάζεται αυστηρά η επίδραση της ραδιενέργειας στην υγεία του ανθρώπου και του περιβάλλοντος στα δεδομένα αυτά χρονικά διαστήματα. Πρακτικές μελέτες λαμβάνουν υπόψη τους τα 100 πρώτα χρόνια στο πλαίσιο αποτελεσματικού προγραμματισμού και υπολογισμού κόστους. Η μακροχρόνια συμπεριφορά των ραδιενεργών στοιχείων είναι ένα υπό μελέτη θέμα για τα τρέχοντα ερευνητικά προγράμματα.

5.3.1 Μέτρα για την ασφαλή αποθήκευση των πυρηνικών αποβλήτων

Για την ασφαλή αποθήκευση των πυρηνικών αποβλήτων είναι καθοριστικής σημασίας η τήρηση συγκεκριμένων κανόνων, ώστε να προστατεύεται η δημόσια υγεία καθώς και η ασφάλεια του περιβάλλοντος. Η δυνατότητα διάθεσης των πυρηνικών αποβλήτων πρέπει να τοποθετείται, να διεξάγεται και να ελέγχεται μετά την αποπεράτωση της με τρόπο τέτοιο ώστε να διασφαλίζει ότι η έκθεση κάθε τομέα στα πυρηνικά απόβλητα βρίσκεται στα επιτρεπτά και προκαθορισμένα όρια ασφαλείας. Η συγκέντρωση ραδιενεργού υλικού η οποία ελευθερώνεται στο γενικότερο περιβάλλον, δηλαδή στα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα, στον αέρα, στο έδαφος στα φυτά και στα ζώα θα πρέπει να περιορίζεται ετησίως στα 25 millirems στο σύνολο του σώματος, 75 millirems στο θυροειδή και 25 millirems σε κάθε άλλο όργανο οποιουδήποτε οργανισμού. Η ελευθέρωση ραδιενέργειας στο περιβάλλον θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν σε λογικά πλαίσια, τα οποία καθορίζει η διεθνής κοινότητα και να τηρούνται τα ισχύοντα πρότυπα.

Η επιλογή της τοποθεσίας για την αποθήκευση χαμηλού επιπέδου ραδιενεργών αποβλήτων είναι άμεσα συνδεδεμένη με την διασφάλιση της δημόσιας υγείας, την διαφύλαξη του περιβάλλοντος καθώς και με κοινωνικούς και οικονομικούς παράγοντες. Οι προϋποθέσεις για την επιλογή της τοποθεσίας αφορούν σαφείς εκτιμήσεις για την υγεία και την ασφάλεια των πολιτών, τα δημογραφικά στοιχεία, τα μέσα μεταφοράς, την ποιότητα του αέρα, την τοπογραφία της περιοχής, εκτιμήσεις για πλημμύρες, πυρκαγιές και υδρογεωλογικούς παράγοντες, τα τεκτονικά γεγονότα, την προστασία του εδάφους που να διασφαλίζει την προστασία και την εκμετάλλευση των φυσικών πόρων, αλλά και την άγρια ζωή και την οικολογία.

Η διαδικασία για την εύρεση κατάλληλης τοποθεσίας για την δημιουργία αποθηκευτικών υποδομών για πυρηνικά απόβλητα ξεκινά αποκλείοντας αρχικά τις ακατάλληλες περιοχές. Στη συνέχεια επανεξετάζονται συγκριτικά οι υπόλοιπες περιοχές για την δημιουργία αποθηκευτικών χώρων. Αρχικά όλες οι περιοχές αυτές θεωρούνται κατάλληλες και στη συνέχεια κατά την πρώτη φάση εξετάζονται μια προς μια οι απαιτήσεις για την απόδοση της καταλληλότητας και επιλέγονται οι καταλληλότερες και προτιμητέες περιοχές έκτασης περίπου 500 στρεμμάτων η κάθε μία. Κατά την δεύτερη φάση μελετώνται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια και χαρακτηρίζονται συγκριτικά οι περιοχές αυτές και η διαδικασία καταλήγει

στην πρόταση μιας από αυτές για να δοθεί άδεια ώστε να αποτελέσει χώρο για την αποθήκευση των αποβλήτων.

5.3.2 Φυσικές ιδιότητες πυρηνικών αποβλήτων

Η ραδιενέργεια από τα πυρηνικά απόβλητα μειώνεται και εξαλείφεται τελικά σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα . Όλα τα ραδιοϊσότοπα που περιέχονται στα πυρηνικά απόβλητα έχουν χαρακτηριστικό χρόνο ημιζωής, ο χρόνος ο οποίος απαιτείται για ένα ραδιονουκλεΐδιο για να χάσει το μισό της ραδιενέργειάς του. Τελικά όλα τα ραδιενεργά απόβλητα αποσυντίθενται σε μη-ραδιενεργά στοιχεία (σταθερά ισότοπα). Συγκεκριμένα ραδιενεργά στοιχεία (όπως το πλουτόνιο-239) που βρίσκεται σε χρησιμοποιημένα πυρηνικά καύσιμα παραμένουν επιβλαβή για τον άνθρωπο και άλλα πλάσματα για εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια. Άλλα ραδιοϊσότοπα ακόμα παραμένουν επιβλαβή για εκατομμύρια χρόνια γι' αυτό πρέπει να προστατεύονται για αιώνες και να παραμένουν απομονωμένα από το περιβάλλον διαβίωσης για χιλιετίες. Στους δύο πίνακες αναγράφονται μερικά από τα βασικά ραδιοϊσότοπα, ο χρόνος ημιζωής τους και η ραδιενέργειά τους σαν ο λόγος ως προς την διάσπαση του ουρανίου-235. Όσο πιο γρήγορα αποσυντίθεται ένα ραδιοϊσότοπο τόσο πιο ραδιενεργό είναι και αντίθετα όσο πιο αργά αποσυντίθεται ένα ραδιοϊσότοπο τόσο λιγότερο ραδιενεργό είναι. Για παράδειγμα το 96% του στοιχείου Ίνδιο που υπάρχει στην φύση είναι στην μορφή ραδιοϊσοτόπου Ίνδιο -115 αλλά θεωρείται μη-τοξικό στην καθαρή μορφή μετάλλου όπως ένα σταθερό στοιχείο γιατί έχει χρόνο ημιζωής πολλά τρισεκατομμύρια έτη κάτι που συνεπάγεται ότι μια σχετικά μικροσκοπική αναλογία των ατόμων του διασπάται ανά μονάδα χρόνου. Η ενέργεια και ο τύπος της ιονίζουσας ραδιενέργειας που εκπέμπεται από μια καθαρή ραδιενεργό ουσία είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να εξετάζεται και ο οποίος επίσης καθορίζει την επικινδυνότητα της ακτινοβολίας . Οι χημικές ιδιότητες ενός ραδιενεργού στοιχείου καθορίζουν την κινητικότητα του παράγωγου και την πιθανότητα εξάπλωσης του στο περιβάλλον και την μόλυνση του ανθρώπου. Η δράση τους περιπλέκεται ακόμα περισσότερο καθώς πολλά ραδιοϊσότοπα δεν αποπίπτουν αμέσως σε σταθερή κατάσταση αλλά μεταπίπτουν σε άλλα παράγωγα, διαδικασία που δημιουργεί πολύπλοκες αλυσίδες απόπτωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πυρηνική ενέργεια είναι μία μορφή ενέργειας που υπάρχει μέσα στον πυρήνα του ατόμου. Περιγράφεται ως η δυναμική ενέργεια που είναι εγκλωβισμένη στους πυρήνες των ατόμων εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων που τα συνιστούν (νετρόνια, πρωτόνια , ηλεκτρόνια) . Η πυρηνική ενέργεια απελευθερώνεται με δύο τρόπους: τη σχάση ή τη σύντηξη των πυρήνων. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος είναι η σχάση καθώς η σύντηξη δεν έχει πλήρως αναπτυχθεί επιστημονικά λόγω της πολυπλοκότητας που τη χαρακτηρίζει ως διαδικασία ^[87].

6.1 Η πυρηνική ενέργεια σε αριθμούς

Σε παγκόσμια κλίμακα, το 14% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από πυρηνική ενέργεια. Το 2017 υπήρχαν 454 πυρηνικοί αντιδραστήρες σε λειτουργία και 54 υπό κατασκευή παγκοσμίως. Οι περισσότεροι από αυτούς βρίσκονται στις ΗΠΑ και ακολουθούν η Γαλλία, η Κίνα και η Ιαπωνία. Στις ΗΠΑ η πυρηνική ενέργεια καλύπτει το 20% των αναγκών σε ηλεκτρισμό. Αποτελεί το μεγαλύτερο προμηθευτή προσφέροντας το 40% της διαθέσιμης ενέργειας από πυρηνικά. Αξιοσημείωτη είναι η περίπτωση της Γαλλίας όπου πάνω από το 70% των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια προέρχονται από πυρηνικά εργοστάσια.

Μετά το ατύχημα της Φουκουσίμα το 2011, πολλές χώρες αποφάσισαν να κλείσουν τα πυρηνικά εργοστάσια. Πιο συγκεκριμένα, η Γερμανία έχει θέσει ως στόχο την κατάργηση της πυρηνικής ενέργειας μέχρι το 2022 ενώ το Βέλγιο έως το 2025. Στην Ινδία γίνεται προσπάθεια να αυξηθεί το ποσοστό που κατέχει στην ενεργειακή προσφορά σε 25% μέχρι το 2050. Η Κίνα λόγω του τεράστιου πληθυσμού και των συνεπαγόμενων αυξημένων ενεργειακών αναγκών σκοπεύει στην αύξηση της παραγόμενης -από πυρηνικά εργοστάσια- ενέργειας, ενώ παράλληλα στρέφεται και προς διάφορες μορφές ανανεώσιμων πηγών με πρωταγωνιστές την αιολική, ηλιακή και την υδροηλεκτρική ^[91].

6.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της πυρηνικής ενέργειας

Τα πλεονεκτήματα της πυρηνικής ενέργειας είναι πολυάριθμα και αφορούν κατά κύριο λόγο την μεγάλη ποσότητα του ουρανίου στη φύση, το χαμηλό κόστος παραγωγής και λειτουργίας του πυρηνικού αντιδραστήρα, τη μικρή επίδρασή της στο περιβάλλον, την ενεργειακή ανεξαρτησία που προσφέρει στις χώρες που τη διαθέτουν, καθώς και την μικρή πιθανότητα ατυχήματος αν ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα προστασίας . Πιο αναλυτικά, τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα παρουσιάζονται παρακάτω:

- Αφθονία Ουρανίου: Το ουράνιο (U92) είναι ένα χημικό στοιχείο που προσφέρεται σε τεράστιες ποσότητες στη φύση. Χαρακτηριστικά εκτιμάται ότι η ποσότητά του είναι χίλιες φορές μεγαλύτερη από το χρυσό. Το γεγονός αυτό δεν το καθιστά ανανεώσιμη

αλλά εναλλακτική πηγή ενέργειας. Για να αξιοποιηθεί και να μετατραπεί σε ενέργεια το ουράνιο, λαμβάνει χώρα ο κύκλος του πυρηνικού καυσίμου, με την εξής σειρά: εξόρυξη, συμπύκνωση και εμπλουτισμός για τη μετατροπή του ουρανίου σε καύσιμο, κατασκευή ράβδων καυσίμου και χρήση τους στον πυρηνικό αντιδραστήρα για την παραγωγή ενέργειας, απόσυρση, προσωρινή αποθήκευση, ανακύκλωση ή τελική επεξεργασία. Παρόλο που είναι ορυκτό στοιχείο, η αφθονία του ουρανίου του δίνει πλεονέκτημα σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα και κυρίως το πετρέλαιο του οποίου οι αποδεδειγμένες πηγές δεν ξεπερνούν τα 40 χρόνια.

- **Αξιοπιστία:** Λόγω της υψηλής διαθεσιμότητά του ως στοιχείο, το ουράνιο χαρακτηρίζεται ως αξιόπιστο προς μετατροπή καύσιμο σε αντίθεση με τη διαλείπουσα φύση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Πράγματι, για να είναι αποδοτική η ηλιακή ενέργεια χρειάζεται να έχει ήλιο. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και με την αιολική ενέργεια, όπου η ύπαρξη του ανέμου είναι απαραίτητη προϋπόθεση *sine qua non* για να κινηθεί η τουρμπίνα και να παραχθεί ενέργεια από τη μετατροπή της κινητικής σε ηλεκτρική. Επειδή κανένας από τους δύο παράγοντες δεν μπορεί να προβλεφθεί εκ των προτέρων, η πυρηνική ενέργεια κερδίζει έδαφος.
- **Περιβαλλοντική Ασφάλεια:** Σε αντίθεση με τα συμβατικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν καύσιμα, όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και το κάρβουνο, οι πυρηνικοί σταθμοί έχουν μικρή περιβαλλοντική επίδραση. Αρχικά, από τον πυρηνικό αντιδραστήρα δεν εκλύονται τα επιβλαβή αέρια του θερμοκηπίου, δηλαδή διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του θείου, του αζώτου και μεθάνιο, που συμβάλλουν στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη και συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή. Οι μόνες εκπομπές αερίων, που σχετίζονται με την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας, λαμβάνουν χώρα κατά το πρώτο και δεύτερο στάδιο του κύκλου πυρηνικού καυσίμου, δηλαδή την εξόρυξη και συμπύκνωση του ουρανίου καθώς και την κατασκευή πυρηνικών αντιδραστήρων. Συνολικά, οι εκπομπές αερίων από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικούς αντιδραστήρες υπολογίζονται στο 16% αυτών που εκπέμπονται από συμβατικά εργοστάσια που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα.

Πέρα από τη χαμηλή ρύπανση του αέρα, τα πυρηνικά εργοστάσια κατά τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δε ρυπαίνουν το νερό της θάλασσας. Τα ύδατα που εκχέονται από πυρηνικούς σταθμούς είναι ασφαλή αφού λειτουργούν ως ψυκτικό μέσο στον κύκλο παραγωγής ενέργειας χωρίς ωστόσο να έρχονται σε επαφή με το νερό που χρησιμοποιείται εντός του πυρηνικού αντιδραστήρα. Το γεγονός αυτό τα καθιστά απαλλαγμένα από ακτινοβολία και λοιπούς επιβλαβείς ρύπους. Τέλος, δεν τίθεται σε κίνδυνο η τοπική υδρόβια ζωή ενώ παράλληλα διατηρούνται η πανίδα και η χλωρίδα της εκάστοτε περιοχής.

Για τους παραπάνω λόγους, οι υποστηρικτές της πυρηνικής ενέργειας την χαρακτηρίζουν ως πράσινη και καθαρή. Παρουσιάζεται δε, ως αποτελεσματικό μέσο για την επίτευξη των στόχων της Συμφωνίας του Παρισιού για την κλιματική αλλαγή, δηλαδή τη διατήρηση της αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη στους 2 βαθμούς Κελσίου μέσω της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

- Χαμηλό κόστος: Οι υποστηρικτές της πυρηνικής ενέργειας τονίζουν το μειωμένο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με πυρηνικό καύσιμο. Το κόστος του πυρηνικού καυσίμου ανά KWh, δηλαδή ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας, είναι πολύ χαμηλό συγκριτικά με το αντίστοιχο κόστος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικά καύσιμα. Χαρακτηριστικά, σύμφωνα με έρευνα της Βασιλικής Ακαδημίας της Βρετανίας για το 2014, η ενέργεια που παράγουν τα πυρηνικά εργοστάσια κοστίζει 0,156 ευρώ ανά KWh. Η ενέργεια που παράγουν εργοστάσια με φυσικό αέριο κοστίζει 0,249 ευρώ και με άνθρακα 0,228 ευρώ ανά KWh. Λαμβάνοντας υπόψη μόνο το κόστος παραγωγής της, χωρίς τις εξωτερικότητες ^[92], η πυρηνική ενέργεια δύναται να συγκριθεί με το αντίστοιχο κόστος στις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας. Ακόμη, το κόστος λειτουργίας σε αντίθεση με το κόστος συντήρησης ή αποκατάστασης ενός ατυχήματος στην πυρηνική ενέργεια είναι χαμηλό σε σχέση με τις τεχνολογίες ανανεώσιμων μορφών ενέργειας όπως τα φωτοβολταϊκά συστήματα.
- Ενεργειακή ανεξαρτησία: Η πυρηνική ενέργεια διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην αύξηση της ενεργειακής ασφάλειας της χώρας που την παράγει. Πέρα από τη γεωπολιτική της σημασία, η πυρηνική ενέργεια προσφέρει αυτονομία έναντι των ενεργειακών κρίσεων που εμφανίζονται διαρκώς και οδηγεί σε απεξάρτηση από τρίτες χώρες για εισαγωγή ορυκτών καυσίμων. Όπως είναι γνωστό, η πλειονότητα των συμβατικών καυσίμων όπως το κάρβουνο, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο βρίσκονται σε χώρες που χαρακτηρίζονται από πολιτική αστάθεια. Έτσι λοιπόν, η διασφάλιση της προσφοράς ενέργειας από πόρους προερχόμενους από το εσωτερικό, αποτελεί μία πρόκληση με στόχο όχι μόνο τη μείωση εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα, αλλά και από εισαγωγές από τρίτες χώρες.
- Χαμηλή πιθανότητα ατυχήματος: Στη σημερινή εποχή με την εξέλιξη της τεχνολογίας, τη βελτίωση της τεχνογνωσίας και την κατανόηση των λαθών και κυρίως ατυχημάτων του παρελθόντος, οι καινούριοι πυρηνικοί σταθμοί φέρουν μια σειρά από αυστηρά μέτρα ασφαλείας που αποτελούν ισχυρό μέσο αποτροπής ατυχημάτων, αλλά παράλληλα διασφαλίζουν και την προστασία των ανθρώπων και του περιβάλλοντος σε περίπτωση που αυτά συμβούν.

Μειονεκτήματα της πυρηνικής ενέργειας

Οι πολέμιοι της πυρηνικής ενέργειας αν και αναγνωρίζουν εν μέρει τα οφέλη που μπορεί να προσφέρει υπογραμμίζουν τα μειονεκτήματα της. Οι αρνητικές πτυχές της σχετίζονται με το κόστος κατασκευής και συντήρησης του πυρηνικού εργοστασίου, τη διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων, τις ανεξέλεγκτες περιβαλλοντικές συνέπειες από πιθανό ατύχημα, όπως επίσης και τον κίνδυνο εξάπλωσης των πυρηνικών όπλων ^[93]. Με περισσότερες λεπτομέρειες:

- Κόστος: Η διεθνής βιβλιογραφία σχετικά με το κόστος της πυρηνικής ενέργειας είναι αμφίσημη. Όταν γίνεται αναφορά στο γεγονός ότι η πυρηνική ενέργεια είναι φτηνή

αναφερόμαστε στο κόστος καυσίμου ανά κιλοβατώρα. Τι γίνεται όμως με το κόστος διάλυσης, απόσυρσης και θέσης εκτός λειτουργίας ενός πυρηνικού αντιδραστήρα; Με τη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων; Τα ασφάλιστρα για τη μεταφορά του φορτίου είναι υπέρογκα. Ένα μεγάλο ποσοστό του κόστους της πυρηνικής ηλεκτρικής ενέργειας οφείλεται στα επιπρόσθετα μέτρα πρόληψης πιθανών κινδύνων, στην ελαχιστοποίηση της πιθανότητας ατυχήματος, όπως επίσης και στην ετοιμότητα αντιμετώπισης των συνεπειών σε περίπτωση ατυχήματος από τυχόν σεισμό ή άλλη φυσική καταστροφή.

Όλα τα παραπάνω μπορούν να φτάσουν στο 50% της τιμής κατασκευής ενός νέου πυρηνικού εργοστασίου. Γι' αυτό πολλά πυρηνικά εργοστάσια επειδή εκ των πραγμάτων δεν μπορούν να κλείσουν εγκαταλείπονται ανενεργά και κατασκευάζονται νέα. Λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής και συντήρησης τους, τα πυρηνικά εργοστάσια χρειάζονται διαρκείς επιχορηγήσεις για να διατηρήσουν την ανταγωνιστικότητά τους στην αγορά.

- **Πυρηνικά απόβλητα:** Το πιο σημαντικό πρόβλημα της πυρηνικής ενέργειας είναι η παραγωγή ραδιενεργών αποβλήτων στην προτελευταία φάση του κύκλου του πυρηνικού καυσίμου. Η διαχείριση και εναπόθεση τους αποτελεί τη μεγαλύτερη πρόκληση για την πυρηνική βιομηχανία. Σε μη ελεγχόμενες καταστάσεις μπορούν να προκαλέσουν αρκετά προβλήματα στο ανθρώπινο είδος και στο φυσικό περιβάλλον λόγω της τοξικότητας της ραδιενέργειας. Η δράση τους ποικίλλει και γι' αυτό διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες χαμηλής, μέσης και υψηλής ραδιενέργειας. Τα πυρηνικά κατάλοιπα στους πυρηνικούς αντιδραστήρες πρέπει να αποθηκευτούν με ασφάλεια έτσι ώστε να μην υπάρχει περίπτωση περιβαλλοντικής ρύπανσης. Οι επιλογές διαχείρισης των πυρηνικών αποβλήτων συνοψίζονται ως εξής: προσωρινή αποθήκευση, ταφή σε υπόγειους χώρους ή κάτω από τη θάλασσα ή εναπόθεση τους στο διάστημα όπως και επεξεργασία και ανακύκλωση για δημιουργία σχάσιμου υλικού. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος είναι αφού περιβληθούν με γυαλί και στρώματα χάλυβα και τσιμέντου να ταφούν στο έδαφος σε βάθος μεγαλύτερο από χίλια μέτρα. Επίσης, υπάρχουν περιπτώσεις που είτε βυθίζονται στον πάτο της θάλασσας είτε αποστέλλονται στο διάστημα. Όλες οι μέθοδοι ενέχουν κινδύνους και θα πρέπει να πληρούν τα πρότυπα της Κοινής Σύμβασης για την ασφαλή διαχείριση αναλωθέντων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας.
- **Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από πιθανό πυρηνικό ατύχημα:** Σε παλιά πυρηνικά εργοστάσια τα οποία δεν έχουν κατασκευασθεί με τις προβλεπόμενες – απαραίτητες υποδομές ασφαλείας ή δεν συντηρούνται σωστά, ενδέχεται να σημειωθούν ατυχήματα με καταστροφικές συνέπειες, τόσο μεγάλες που καταρρίπτουν όλα τα προαναφερθέντα οφέλη της πυρηνικής ενέργειας. Συνεπώς, δημιουργούνται σοβαρότατες ανησυχίες για την ασφαλή λειτουργία των πυρηνικών εργοστασίων, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το απαιτούμενο κόστος για τα συστήματα αποτροπής ατυχημάτων.

Από τα ατυχήματα που έχουν λάβει χώρα, τα τρία με το σοβαρότερο κόστος σε ανθρώπινες ζωές και τις δυσμενέστερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, από την απελευθέρωση ραδιενέργειας ήταν: Three Mile Island (1979), Chernobyl (1986) και Fukushima (2011) ^[94].

Διάδοση όπλων και εκμετάλλευσή τους από τρομοκρατικές ομάδες: Τα πυρηνικά όπλα λειτουργούν με βάση την πυρηνική σχάση ή την πυρηνική σύντηξη. Στα πυρηνικά όπλα σχάσης, που λέγονται και ατομικές βόμβες, η αλυσιδωτή αντίδραση είναι ανεξέλεγκτη. Πιο καταστροφικά όμως, θεωρούνται τα πυρηνικά όπλα σύντηξης, δηλαδή οι βόμβες υδρογόνου.

Λόγω της σημαντικής στρατιωτικής ισχύος που μπορούν να προσδώσουν τα πυρηνικά όπλα σε όποιον τα κατέχει, ο έλεγχός τους αποτελεί υψίστης σημασίας ζήτημα. Σε κάθε περίπτωση, θεωρείται κρίσιμο η τεχνογνωσία κατασκευής τους να μην περιέλθει στα χέρια των τρομοκρατικών οργανώσεων, ενδεχόμενο που θα είχε ολέθριες συνέπειες.

6.3 Τελικά συμπεράσματα

Είναι λοιπόν η πυρηνική ενέργεια η πιο πράσινη επιλογή; Συμβάλλει στην απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και στη μετάβαση σε μία πιο καθαρή οικονομία; Ή μήπως αποτελεί ένα επικίνδυνο μονοπάτι και μία τρικλοποδιά στην πορεία προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας; Η δυσκολία της απάντησης στα παραπάνω ερωτήματα αποδεικνύει τον αμφίσημο χαρακτήρα της. Από τη μία οι σχεδόν μηδενικοί ρύποι και από την άλλη τα ραδιενεργά απόβλητα. Πιθανόν να μην αποτελεί το «καύσιμο» του μέλλοντος αλλά μπορεί να αποτελέσει ένα βήμα για τα σενάρια του αποκαρβουνισμού μέχρι τη επίτευξη της μετάβασης στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Είναι ασφαλέστερη και καθαρότερη από τα ορυκτά καύσιμα και σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη προτεραιότητα δεν έχει αυτό καθ' εαυτό το καύσιμο που χρησιμοποιείται αλλά η μείωση των ενεργειακών αναγκών και η διατήρηση της ενέργειας για την επίτευξη των στόχων της βιώσιμης ανάπτυξης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Ben Gales, Astrid Kander, Paolo Malanima and Mar Rubio (2007) – North versus South: Energy transition and energy intensity in Europe over 200 years. *European Review of Economic History* Vol. 11, No. 2 (August 2007), pp. 219-253. Cambridge University

[2] These commitments were made based on the submission of so-called “intended nationally determined contributions” (INDCs), whereby countries submitted their long-term targets for climate change mitigation. These targets can be explored and tracked at the World Resource Institute’s CAIT Climate Data Explorer.

[3,4] Chontanawat, J., Hunt, L. C., & Pierse, R. (2008). Does energy consumption cause economic growth?: Evidence from a systematic study of over 100 countries. *Journal of Policy Modeling*, 30(2), 209-220

[5] Akinlo, A. E. (2008). Energy consumption and economic growth: Evidence from 11 Sub-Sahara African countries. *energy economics*, 30(5), 2391-2400. Available online.

[6] Lai, Chun Sing; Locatelli, Giorgio; Pimm, Andrew; Tao, Yingshan; Li, Xuecong; Lai, Loi Lei (October 2019). "A financial model for lithium-ion storage in a photovoltaic and biogas energy system". *Applied Energy*. 251

[7] Lai, Chun Sing; Jia, Youwei; Xu, Zhao; Lai, Loi Lei; Li, Xuecong; Cao, Jun; McCulloch, Malcolm D. (December 2017). "Levelized cost of electricity for photovoltaic/biogas power plant hybrid system with electrical energy storage degradation costs". *Energy Conversion and Management*. 153: 34–47.

[8] <https://www.irena.org/statistics>

[9] IRENA (2017), *Rethinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

[11] U.S. Energy Information Administration (EIA), (May – June 2006), *Independent Statistics & Analysis: International Energy Annual 2004*

[12] WHO (2014) – *Frequently Asked Questions – Ambient and Household Air Pollution and Health*

[13] FAO and UNEP. *The State of the World’s Forests 2020. Forests, biodiversity and people.*

[14] IEA *World Energy Balance 2020*

[16] Ivanova D, Wood R (2020). The unequal distribution of household carbon footprints in Europe and its link to sustainability. *Global Sustainability* 3, e18, 1–12

[17] Άρθρο 2 από την Συμφωνία των Παρισίων (Paris Agreement) δηλώνει τον στόχο στην ενότητα 1a.

[18] IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp

- [19] Lacis, A. A., Schmidt, G. A., Rind, D., & Ruedy, R. A. (2010). Atmospheric CO₂: Principal control knob governing Earth's temperature. *Science*, 330(6002), 356-359.
- [20] Delworth, T. L., Zeng, F., Vecchi, G. A., Yang, X., Zhang, L., & Zhang, R. (2016). The North Atlantic Oscillation as a driver of rapid climate change in the Northern Hemisphere. *Nature Geoscience*, 9(7), 509-512.
- [21] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151.
- [22,23] Berkeley Earth. Global Temperature Report for 2019.
- [24] IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- [25] Mitchell, J. F. B., Johns, T. C., Ingram, W. J., & Lowe, J. A. (2000). The effect of stabilising atmospheric carbon dioxide concentrations on global and regional climate change. *Geophysical Research Letters*, 27(18), 2977-2980.
- [26] Samset, B.H., Fuglestad, J.S. & Lund, M.T. Delayed emergence of a global temperature response after emission mitigation. *Nature Communications*, 11, 3261 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17001-1>.
- [27] Bernhard Bereiter, Sarah Eggleston, Jochen Schmitt, Christoph Nehrbass-Ahles, Thomas F. Stocker, Hubertus Fischer, Sepp Kipfstuhl and Jerome Chappellaz. 2015. Revision of the EPICA Dome C CO₂ record from 800 to 600 kyr before present. *Geophysical Research Letters*. . doi: 10.1002/2014GL061957.
- [28] The underlying data for this chart is sourced from the Climate Action Tracker – based on policies and pledges as of December 2019.
- [29] Rogelj, J., D. Shindell, K. Jiang, S. Ffifita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Kheshgi, S. Kobayashi, E. Kriegler, L. Mundaca, R. Séférian, and M.V. Vilariño, 2018: Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.
- [30] Raupach, M. R., Davis, S. J., Peters, G. P., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Ciais, P., ... & Le Quere, C. (2014). Sharing a quota on cumulative carbon emissions. *Nature Climate Change*, 4(10), 873-879.
- [31] United Nations Environment Programme (2019). Emissions Gap Report 2019. UNEP, Nairobi.
- [32] IRENA (2017), Rethinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [33] Lelieveld, J., Klingmüller, K., Pozzer, A., Burnett, R. T., Haines, A., & Ramanathan, V. (2019). Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(15), 7192-7197

- [34] In a study published in the Proceedings of the National Academy of Sciences, Jos Lelieveld et al. (2019)
- [35] Markandya, A., & Wilkinson, P. (2007). Electricity generation and health. *The Lancet*, 370(9591), 979-990.
- [36] Sovacool, B. K., Andersen, R., Sorensen, S., Sorensen, K., Tienda, V., Vainorius, A. & Bjørn-Thygesen, F. (2016). Balancing safety with sustainability: assessing the risk of accidents for modern low-carbon energy systems. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3952-3965.
- [37] Sovacool, B. K., Kryman, M., & Laine, E. (2015). Profiling technological failure and disaster in the energy sector: A comparative analysis of historical energy accidents. *Energy*, 90, 2016-2027.
- [41] Schlömer S., T. Bruckner, L. Fulton, E. Hertwich, A. McKinnon, D. Perczyk, J. Roy, R. Schaeffer, R. Sims, P. Smith, and R. Wiser, 2014: Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [42] The IPCC AR5 report was published in 2014, and relies on studies conducted several years prior to its publication. For technologies which have been developing rapidly – namely solar, wind and other renewables, production technologies and intensities have changed significantly since then, and will continue to change as energy systems decarbonize. Life-cycle figures for nuclear, solar, wind and hydropower have therefore been adopted by the more recent publication by Pehl et al. (2017), published in *Nature Energy*.
- Pehl, M., Arvesen, A., Humpenöder, F., Popp, A., Hertwich, E. G., & Luderer, G. (2017). Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling. *Nature Energy*, 2(12), 939-945.
- [43] Burgherr, P., & Hirschberg, S. (2014). Comparative risk assessment of severe accidents in the energy sector. *Energy Policy*, 74, S45-S56. McCombie, C., & Jefferson, M. (2016). Renewable and nuclear electricity: Comparison of environmental impacts. *Energy Policy*, 96, 758-769. Hirschberg, S., Bauer, C., Burgherr, P., Cazzoli, E., Heck, T., Spada, M., & Treyer, K. (2016). Health effects of technologies for power generation: Contributions from normal operation, severe accidents and terrorist threat. *Reliability Engineering & System Safety*, 145, 373-387.
- [44,45] Jarvis S., Deschenes O. & Jha A. (2019). The Private and External Costs of Germany's Nuclear Phase-Out (No. w26598). National Bureau of Economic Research
- [46] Karecha P. A. & Hansen J. E. (2013) Prevented mortality and greenhouse gas emissions from historical and projected nuclear power. *Environmental Science & Technology*, 47(9) 4889-4895.
- [47] van der Marwe A. (2019) Nuclear energy saves lives. *Natura*, 570(7759), 36 .
- [48] NEA, OECD (2002). Chernobyl: Assessment of Radiological and Health Impacts. Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-operation and Development
- [49] IAEA, WHO (2005/06). Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts
- [50] Special Report: Counting the dead. *Nature* 440, 982-983 (20 April 2006)

- [51] Cardis et al. (2006) Estimates of the cancer burden in Europe from radioactive fallout from the Chernobyl accident. "International Journal of Cancer"
- [52] Farlie & Sumner (2006). An independent scientific evaluation of health and environmental effect 20 years after the nuclear disaster providing critical analysis of a recent report by the International Atomic Energy Agency (IAEA) and the World Health Organization(WHO)
- [53,57] UNSCEAR (2008). Sources and effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes
- [54] World Health Organisation (2013). Health risk assessment from nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami based on preliminary dose estimation
- [55] World Health Organization (2016). FAQs: Fukushima Five Years On.
- [56] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2015). Report of the United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiation to the general assembly.
- [58] Reich, M. R., & Goto, A. (2015). Towards long-term responses in Fukushima. *The Lancet*, 386(9992), 498-500.
- [59] Νικόλαος Πατρώνης, Σύγχρονη Φυσική, (2012), Πυρηνική Φυσική και Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων, Διάλεξη 3: Ενέργεια Σύνδεσης και Πυρηνικά Πρότυπα
- [60] Μ. Αντωνόπουλος Ντόμης (1995) , Πυρηνική τεχνολογία εισαγωγή στις εφαρμογές
- [61] W.N. Cottingham & D.A. Greenwood (2003) An Introduction to Nuclear Physics
- [62] Μαρία Καφεσαάκη, Εισαγωγή στην σύγχρονη φυσική: Σημειώσεις Διαλέξεων, Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών
- [63] Αθηνά Πάκου (1999) Πειραματικές μέθοδοι στην πυρηνική φυσική
- [64,66] World Nuclear Association
- [67] John R. Lamarsh, Anthony J. Baratta (2001) Introduction to Nuclear Engineering
- [69] UNSCEAR (1993) Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations
- [70] Kemeny JG (1979) Report of the President's Commission on the accident at Three Mile Island. Government Printing Office. Washington, DC.
- [71,74,75] Kemeny JG (1979) Report of the President's Commission on the accident at Three Mile Island. Government Printing Office. Washington, DC.
- [72] Battist L et al (1979) Population dose and health impact of the accident at Three Mile Island nuclear station. A report of the ad Hoc population dose assessment group. NUREG-0558. U. S. Nuclear Regulatory Commission (May 10, 1979).
- [73] IAEA (2006) Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Environment". International Atomic Energy Agency. Vienna.
- [74] UNSCEAR (2008) Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2008 Report to the General

- Assembly, with scientific annexes. Annex D: Health effects due to radiation from the Chernobyl accident. United Nations.
- [75] UNSCEAR (2000) Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations.
- [76] UNSCEAR (1988) Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR 1988 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations.
- [77] De Cort M et al (1998) Atlas of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident
- [78] Muramatsu Y et al (2000) Concentration of ^{239}Pu and ^{240}Pu and their isotopic ratios determined by ICP-MS in soils collected from the Chernobyl 30-km zone. *Environ Sci Technol* 34: 2913- 2917.
- [79] Hirose K (1995) Geochemical studies on the Chernobyl radioactivity in environmental samples. *J Radioanal Nucl Chem* 197: 331-342.
- [80] NSC (2011a) A testing estimates for the amount of ^{131}I and ^{137}Cs released from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere.
- [81] NISA (2011a) INES (the International Nuclear and Radiological Event Scale) Rating on the Events in Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station by the Tohoku District - off the Pacific Ocean Earthquake.
- [82] MEXT (2011a) Preparation of Distribution Map of Radiation Doses, etc. (Map of Radioactive Cesium Concentration in Soil) by MEXT.
- [83] Aoyama M et al (1986) High level radioactive nuclides in Japan in May. *Nature* 321: 819-820.
- [84] Muramatsu Y, Sumiya M and Ohmomo Y (1987) Iodine-131 and other radionuclides in environmental samples collected from Ibaraki/Japan after the Chernobyl accident. *Sci Total Environ* 67: 149-158.
- [85] Michael I. Ojavan , William E. Lee & Stepan N. Kalmykov (2019) An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation. Third Edition p. 81-106
- [86] Miller, G. (2017). *Living in the environment*. 19th ed. pp. 386-397.
- [87] Kelly C. (2007). *Manhattan Project: the birth of the atomic bomb in the words of its creators, eyewitnesses and historian*. Black Dog and Leventhal Publishers. Pp. 10-13.
- [88] OECD. (2016). *Nuclear Energy Today*. pp. 10-12. (online). Available here. [Accessed 20 Dec 2018].
- [89] O' Keefe, Ph. (2010). *The future of energy use*. 2nd ed. pp. 139-169.
- [90] *Nuclear power in the 21st century*. (2017). German Institute for Economic Research. pp. 3-6. Available here. [Accessed 22 Dec 2018].
- [91] IAEA. 2015. *Nuclear Power and the Paris Agreement*. (online). Pp. 3-5. (online). Available here. [Accessed 26 Dec 2018].

- [92] Levitan D. (2016). Is nuclear power our energy future – or a dinosaur in a death spiral?. Climate Central. (online). Available here. [Accessed 16 Dec 2018].
- [93] Nephew R. (2017). The geopolitics of nuclear power and technology. Columbia SIPA. (online). Available here. [Accessed 26 Dec 2018].
- [94] Mukerjee, M. (2016). Crippled Fukushima Reactors Are Still a Danger, 5 Years after the Accident. Scientific American. (online). Available here. [Accessed 28 Dec 2018].

Ηλεκτρονικές πηγές

- [10] Energy Special, Part 3: Energy Crisis in Roman Empire:
<https://publicaddress.net/southerly/energy-special-part-3-energy-crisis-in-the/>
- [15] <https://web.archive.org/web/20201109025203/https://thelede.blogs.nytimes.com/2007/07/20/squinting-at-the-future-in-an-airport-parking-lot/>
- [38] <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- [39] [World Health Organization https://www.who.int/news/item/05-09-2005-chernobyl-the-true-scale-of-the-accident](https://www.who.int/news/item/05-09-2005-chernobyl-the-true-scale-of-the-accident)
- [40] <https://www.nrc.gov/docs/ML1234/ML12340A564.pdf>
- [65] <https://antigoldgr.org/blog/2015/04/07/eva-kaili/>
- [68] <https://www.scientificamerican.com/article/coal-ash-is-more-radioactive-than-nuclear-waste>

