



ΤΜΗΜΑ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

***‘Η ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΕ ΤΩΝ 27’***

Μιχαλόπουλος Αναστάσιος
bio2028

Επιβλέπων: Δρίβας Κυριάκος

ΠΕΙΡΑΙΑΣ 2022



Department
of Economics
University
of Piraeus

***‘THE ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY OF NUCLEAR
POWER IN THE EU-27’***

Michalopoulos Anastasios

bio2028

Supervisor: Drivas Kyriakos

PIRAEUS 2022

Στους γονείς μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πρόοδος της τεχνολογίας, η ανάπτυξη των οικονομιών και η αύξηση του βιοτικού επιπέδου στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έχει οδηγήσει και στην αύξηση των ενεργειακών αναγκών, με άμεσες επιπτώσεις στο περιβάλλον, κυρίως σε επίπεδο αερίων ρύπων, αλλά και μόλυνσης του εδάφους και των υδάτων από δραστηριότητες που σχετίζονται με την παραγωγή ενέργειας. Στο εισαγωγικό κεφάλαιο τη παρούσα διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας ενός πυρηνικού εργοστασίου καθώς και μια ιστορική αναδρομή της πυρηνικής ενέργειας στην ΕΕ. Έπειτα γίνεται αναφορά στους παράγοντες λειτουργίας μια πυρηνικής μονάδας, όπως τα ορυκτά καύσιμα και το νερό που χρησιμοποιείται για ψύξη, και σε τι βαθμό αυτά επηρεάζουν χερσαία και θαλάσσια βιοποικιλότητα αντίστοιχα. Στο κύριο μέρος της, αναλύεται η σχέση της πυρηνικής ενέργειας με τις εκπομπές και την ένταση του διοξειδίου του άνθρακα σε 14 χώρες της ΕΕ που διαθέτουν τουλάχιστον ένα λειτουργικό πυρηνικό εργοστάσιο τις τελευταίες δεκαετίες. Στη συνέχεια η εργασία εμβαθύνει στο πρόβλημα της διαχείρισης των ραδιενεργών αποβλήτων υψηλού επιπέδου, αναλύοντας τους τρόπους αποθήκευσης και προτείνοντας νέες τοποθεσίες για ασφαλή μόνιμη μελλοντική εναπόθεση. Τέλος, η προσοχή εστιάζεται στο μέλλον της πυρηνικής ενέργειας στην ΕΕ, η οποία συμπερασματικά καθίσταται από τις πιο βιώσιμες καθαρές πηγές ενέργειας. Παρουσιάζονται ορισμένοι νέοι εξελιγμένοι τύποι αντιδραστήρων και γίνονται προτάσεις αναθεώρησης πολιτικών και θεσμικών πλαισίων, προκειμένου η πυρηνική ενέργεια να τύχει κοινής αποδοχής από το σύνολο της Ευρωπαϊκής Κοινότητας, ώστε αυτή να μπορέσει να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά την εντεινόμενη κλιματική κρίση.

ABSTRACT

The technological progress, the economical growth and the increased life standards inside the European Union, has led in increased energy needs, with direct environmental impact, especially on greenhouse gases level, but also in earth and water pollution due to activities related to generating power. On the introductory chapter of this M.Sc. thesis, we present how a nuclear power plant is operating, as well as the chronicles of nuclear power in today's EU-27. Then, a reference is made about the factors that make a nuclear power plant functional, such as mineral fuel and the water used for cooling, and in what degree do they affect the land and sea biodiversity respectively. In the main part, we analyze the relationship between nuclear energy, and carbon dioxide emissions and intensity of the 14 EU member states that are operating at least one nuclear power plant in the last decades. Subsequently, the thesis deepens into the high level radioactive waste management problem, analyzing the ways those are stored and suggesting new locations for safe future deposition. Finally, we focus on the future of nuclear energy in the EU, which in conclusion is one of the most sustainable clean energy sources. We present some new advanced nuclear reactors and suggestions are made about policy and institutional framework revisions, in order for nuclear power to be accepted commonly by the European Community as a whole, in order to face up efficiently the ever growing climate crisis.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1. ΟΡΙΣΜΟΣ.....	9
1.2. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΩΝ	9
1.3. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΑ	13
2.1. Η ΠΡΩΤΗ ΥΛΗ – ΟΥΡΑΝΙΟ	13
2.2. ΟΙ ΕΞΟΡΥΞΕΙΣ ΟΥΡΑΝΙΟΥ ΤΑ ΕΠΟΜΕΝΑ ΧΡΟΝΙΑ	15
2.3. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΝΕΡΟΥ	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ CO₂ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	19
3.1. ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΤΟΥ ΚΙΟΤΟ	19
3.2. ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO ₂ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (1997-2014)*	20
3.3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΤΑΣΕΩΣ CO ₂ *	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΥΨΗΛΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ	36
4.1. ΤΥΠΟΙ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	36
4.2. ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	37
4.3. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	39
4.4. ΕΡΕΥΝΕΣ ΓΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΕΛΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΕ	44
5.1. ΝΕΟΙ ΤΥΠΟΙ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ	45
5.2. ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΘΕΣΜΙΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ	48
5.3. ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΜΙΑΣ ΝΕΑΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ	51
5.4. ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	53
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ	56

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

- Πίνακας 1:** Nuclear Power in the EU (Eurostat, 2019).....σελ.12
- Πίνακας 2:** Παραγωγή ουρανίου σε χώρες της ΕΕ (tU/year) (OECD, 2019).....σελ.15
- Πίνακας 3:** Απαιτήσεις σε ουράνιο για τη λειτουργία πυρηνικών μονάδων στην ΕΕ (tU/year) (OECD, 2020).....σελ.16
- Πίνακας 4:** Εξέλιξη συνολικού όγκου ραδιενεργών αποβλήτων και αναλωμένων καυσίμων την περίοδο 2004-2013 στην ΕΕ (Εκθεση Ευρωπαϊκής Επιτροπής - SWD, 2017).....σελ.37
- Πίνακας 5:** Generation IV Reactors Under Development (GIF - Technology roadmap update for Gen. IV nuclear energy systems, 2014).....σελ.45
- Πίνακας 6:** Median LCOE in Europe (IEA - Projected Costs of Generating Electricity 2020).....σελ.51

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Correlation between electricity production shares and CO2 intensity over time

- Διάγραμμα 1:** Βέλγιο (1972-2015)σελ.22
- Διάγραμμα 2 :** Βουλγαρία (1974-2015)σελ.23
- Διάγραμμα 3:** Γαλλία (1972-2015)σελ.24
- Διάγραμμα 4:** Γερμανία (1990-2015)σελ.25
- Διάγραμμα 5:** Ισπανία (1972-2015)σελ.26
- Διάγραμμα 6:** Ολλανδία (1972-2015)σελ.27
- Διάγραμμα 7:** Ουγγαρία (1983-2015)σελ.28
- Διάγραμμα 8:** Ρουμανία (1996-2015)σελ.29
- Διάγραμμα 9:** Σλοβακία (1993-2015)σελ.30
- Διάγραμμα 10:** Σλοβενία (1991-2015)σελ.31
- Διάγραμμα 11:** Σουηδία (1972-2015)σελ.32
- Διάγραμμα 12:** Τσεχία (1993-2015)σελ.33
- Διάγραμμα 13:** Φινλανδία (1977-2015)σελ.34
- Διάγραμμα 14:** Λιθουανία (1990-2014)σελ.35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΟΡΙΣΜΟΣ

Πυρηνική ονομάζεται η ενέργεια που απελευθερώνεται όταν μετασχηματίζονται και διασπώνται οι ατομικοί πυρήνες. Είναι δηλαδή η δυναμική ενέργεια που είναι εγκλωβισμένη στους πυρήνες των ατόμων λόγω της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων που τα συνιστούν. Η πυρηνική ενέργεια απελευθερώνεται κατά τη σχάση ή σύντηξη των πυρήνων και εφόσον οι πυρηνικές αντιδράσεις είναι ελεγχόμενες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει ενεργειακές ανάγκες.

1.2. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΩΝ

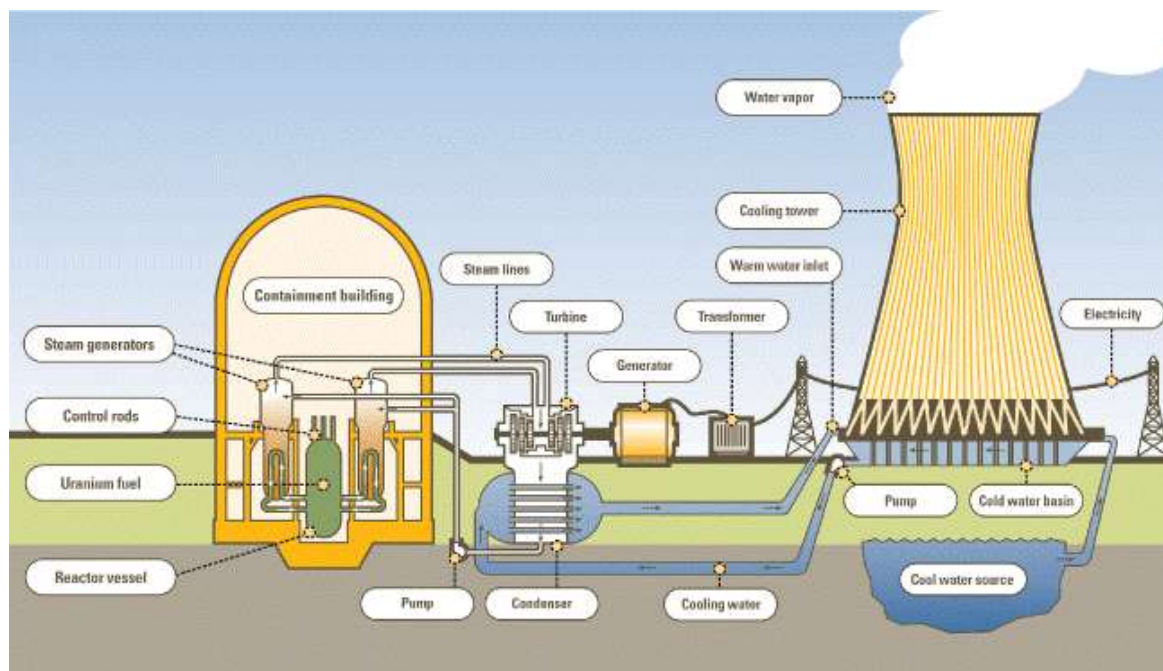
Το βασικό και πιο κοινό είδος πυρηνικού αντιδραστήρα που θα περιγραφεί, είναι αυτός της σχάσης πυρήνων ουρανίου (U-235) ή αλλιώς αντιδραστήρας πεπιεσμένου νερού. Η σχάση των πυρήνων του U-235 παράγει 2-3 νετρόνια. Η αντίδραση συντηρείται μόνον όταν ο αριθμός των νετρονίων που προκαλούν σχάση παραμένει σταθερός με τον χρόνο, και συγκεκριμένα όταν, από τα νετρόνια που προκύπτουν από τη σχάση, μόνο ένα προκαλεί νέα σχάση, συναντώντας έναν άλλο πυρήνα U-235. Όμως πέρα από τη διατήρηση αυτού του ισοζυγίου, πρέπει τα νετρόνια να επιβραδυνθούν, καθώς η σχάση είναι πιο αποδοτική με νετρόνια χαμηλής ενέργειας. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται επιβραδυντής των νετρονίων που είναι το νερό. Το νερό αυτό ονομάζεται πρωτεύον, κυκλοφορεί μέσα στον αντιδραστήρα και λειτουργεί ταυτόχρονα ως ρυθμιστής της θερμοκρασίας του, δηλαδή ως ψυκτικό μέσο.

Στη 2^η φάση, το θερμαινόμενο από το πυρηνικό καύσιμο πρωτεύον νερό, κυκλοφορεί μέσω σωληνώσεων στο χώρο της γεννήτριας υδρατμών, όπου υπάρχει το δευτερεύον νερό. Αυτό με τη σειρά του θερμαίνεται και εξατμίζεται παράγοντας υδρατμούς οι οποίοι μεταβιβάζονται σε μια τεράστια ηλεκτρογεννήτρια και έτσι έχουμε την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι υδρατμοί εν συνεχεία δεν αποβάλλονται στο περιβάλλον αλλά έρχονται σε επαφή με ένα σύστημα ψύξης και υγροποιούνται. Το συγκεκριμένο σύστημα τροφοδοτείται από μια πηγή κρύου νερού (τριτεύον νερό), συνήθως προερχόμενη από τη θάλασσα ή από κάποιο παρακείμενο ποτάμι. Γι αυτό το λόγο οι περισσότερες πυρηνικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής κατασκευάζονται κοντά στη θάλασσα (Grovelines – Γαλλία, Borselle – Ολλανδία, DOEL – Βέλγιο, Vendellos – Ισπανία, Ringhals – Σουηδία, κλπ) ή σε ποτάμια.

Το νερό ανακυκλώνεται στο κάθε κύκλωμα. Το τριτεύον νερό επιστρέφει στη θάλασσα ή στο ποτάμι, το δευτερεύον νερό επιστρέφει στη γεννήτρια ατμού και το πρωτεύον στην καρδιά του αντιδραστήρα. Αυτά τα τρία κυκλώματα ανταλλάσσουν θερμότητα,

αλλά ποτέ, υπό κανονικές συνθήκες, νερό. Έτσι μειώνονται οι πιθανότητες ρύπανσης του περιβάλλοντος με ραδιενέργεια, αφού μόνο το πρωτεύον νερό είναι ραδιενεργό και έρχεται σε επαφή με τα στοιχεία του πυρηνικού καυσίμου. [1]



Εικόνα 1. Η Λειτουργία ενός Πυρηνικού Αντιδραστήρα

1.3. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η πρώτη εργαστηριακή σχάση πυρήνων πραγματοποιήθηκε στο Βερολίνο το 1938 από τους Otto Frisch, Fritz Strassmann και Lise Meitner. Κατά τη διαδικασία της σχάσης παρατηρήθηκε έκκληση τεραστίων ποσών ενέργειας, καθώς επίσης και η απελευθέρωση 2-3 νετρονίων, μέσω της σχάσης, τα οποία προκαλούσαν αλυσιδωτές αντιδράσεις. Τα δύο αυτά νετρόνια που απελευθερώνονται κατά τη σχάση του πυρήνα ουρανίου, προκαλούν με τη σειρά τους τη σχάση 2 πρόσθετων πυρήνων απελευθερώνοντας 4 νετρόνια κ.ο.κ..

Η ιστορία της ηλεκτροπαραγωγής μέσω της πυρηνικής ενέργειας στην Ευρώπη ξεκινά ήδη από το 1953 με Γαλλία και Ηνωμένο Βασίλειο να αναπτύσσουν το ενεργειακό πυρηνικό τους πρόγραμμα με γνώμονα το ήδη υπάρχον αμυντικό. Το εμπάργκο του 1973 και ο μετέπειτα τετραπλασιασμός των τιμών του πετρελαίου ώθησε την παγκόσμια κοινότητα στις εναλλακτικές πηγές ενέργειας μεταξύ αυτών και την πυρηνική.

Η πυρηνική ενέργεια στην ΕΕ καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη συνθήκη EURATOM, μια από τις πρώτες συνθήκες που θεσπίστηκαν στην Ένωση. Η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας (EURATOM) ιδρύθηκε το Μάρτιο του

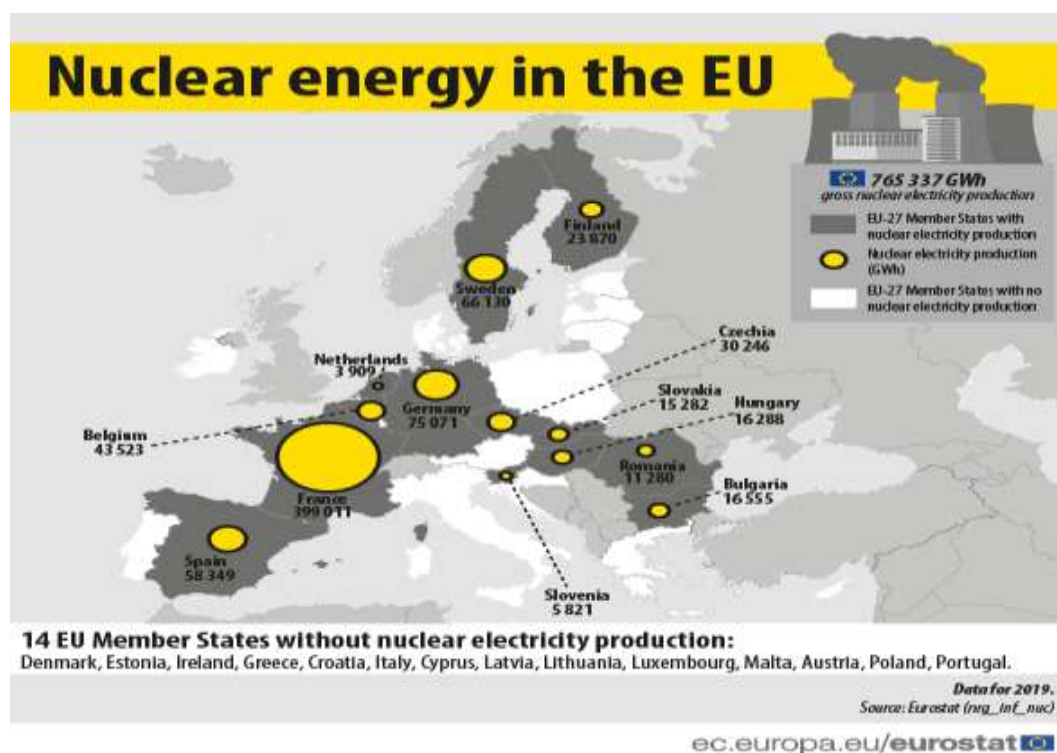
1957 και εν συνεχεία με τη συνθήκη της Ρώμης το 1958, έθεσε τα πλαίσια της ανάπτυξης ειρηνικών χρήσεων της ατομικής ενέργειας.

Η Γαλλία ήταν η χώρα με την πιο αλματώδη αύξηση στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας τη δεκαετία του '70 με το πρώτο εργοστάσιο, εξολοκλήρου γαλλικής τεχνογνωσίας, να κατασκευάζεται και να λειτουργεί το 1977. Συγκεκριμένα από το 8% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το 1974, έχει μεταπηδήσει στο εντυπωσιακό 78% (2005). Τη Γαλλία ακολούθησαν και άλλες ευρωπαϊκές χώρες, όπως η Δ. Γερμανία, η οποία την περίοδο 1975-1984 κατασκεύασε και έθεσε σε λειτουργία 17 εργοστάσια. Μέχρι το τέλος της δεκαετίας του '70 στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας εισήλθαν και άλλες χώρες της σημερινής Ένωσης όπως η Ισπανία, η Τσεχοσλοβακία (πλέον Τσέχικη Δημοκρατία και Σλοβακία), η Ολλανδία και η Ιταλία.

Το 1986 το διάσημο ατύχημα στον πυρηνικό σταθμό του Chernobyl στην Ουκρανία, θα αναγκάσει την Ιταλία να τερματίσει το πυρηνικό της πρόγραμμα κλείνοντας τους 4 αντιδραστήρες που είχε σε λειτουργία, υπό τον φόβο νέου ατυχήματος. Η Γερμανία επίσης, μετά το ατύχημα στη Φουκουσίμα το 2011, αποφασίζει τη σταδιακή απεξάρτησή της από την πυρηνική ενέργεια, με ό,τι αυτό συνεπάγεται.

Παρόλες τις αντιξοότητες και τα εμπόδια του '80 και του '90, η πυρηνική ενέργεια δεν έφυγε ποτέ εξολοκλήρου. Συγκεκριμένα στη Γαλλία μετά από τη συνεργασία της Flamatome και της Siemens το 2004 αναπτύχθηκε ένα νέο είδος αντιδραστήρα, ο European Pressurized Water Reactor (EPR). Ακόμα και πριν από αυτό, το 2002 η Φινλανδία είχε παραγγείλει έναν EPR, σηματοδοτώντας την επανέναρξη των εργασιών για πυρηνικά εργοστάσια μετά το ατύχημα στο Chernobyl. [2]

Σήμερα, βρίσκονται σε λειτουργία 106 αντιδραστήρες με ισχύ 104 GWe (ή 765.337 GWh), σε 13 από τις 27 χώρες που απαρτίζουν την Ευρωπαϊκή Ένωση. Αυτοί παράγουν το 26% της ηλεκτρικής ενέργειας της ΕΕ. Η μεγαλύτερη παραγωγός ηλεκτρισμού από πυρηνική ενέργεια στην ΕΕ είναι η Γαλλία με 399.011 GWh (52% of the EU total), ακολουθεί η Γερμανία με 75.071 GWh (9,8% of the EU total), η Σουηδία με 66.130 GWh (8,6% of the EU total) και η Ισπανία με 58.349 GWh (7,6% of the EU total). [3]



Εικόνα 2: Nuclear energy statistics in the EU (Eurostat, 2019)

Τον Οκτώβριο του 2015, η Ευρωπαϊκή Βιομηχανία Πυρηνικής Ενέργειας (FORATOM) πρότεινε την κατασκευή 100 νέων αντιδραστήρων μεταξύ 2025 και 2045 (με ισχύ 122 GWe), με σκοπό τη διατήρηση της σημερινής παραγωγής τουλάχιστον μέχρι και το 2050 σε 14 μέλη της ΕΕ. [4]

Πίνακας 1: Nuclear Power in the EU (Eurostat, 2019)

Κράτη-Μέλη της ΕΕ των 27 με ενεργές πυρηνικές μονάδες	Πληθυσμός (σε εκ. κατοίκους)	Λειτουργικά Πυρηνικά Εργοστάσια	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικά εργοστάσια (TWh)
Βέλγιο	11,46	7	41,4
Βουλγαρία	7,01	2	15,9
Γαλλία	67,06	56	382,4
Γερμανία	83,02	6	71,9
Ισπανία	46,94	7	55,9
Ολλανδία	17,28	1	3,7
Ουγγαρία	9,77	4	15,4
Ρουμανία	19,41	2	10,4
Σλοβακία	5,45	4	14,2
Σλοβενία	2,08	1	5,5
Σουηδία	10,23	6	64,4
Τσεχία	10,65	6	28,6
Φινλανδία	5,52	4	22,9
Σύνολο	295,88	106	732,6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΑ

ΠΩΣ Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥΣ ΕΠΗΡΕΑΖΕΙ ΧΕΡΣΑΙΑ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

2.1. Η ΠΡΩΤΗ ΥΛΗ - ΟΥΡΑΝΙΟ

Βασική πρώτη ύλη για τη λειτουργία ενός σύγχρονου πυρηνικού εργοστασίου είναι το απεμπλουτισμένο ουράνιο (U-235) σε ράβδους. Αυτό προέρχεται, μετά από επεξεργασία, από το κοινό στον πλανήτη μας στοιχείο (μετάλλευμα) του ουρανίου U, το οποίο μπορεί να βρεθεί σε πετρώματα ή ακόμα και στη θάλασσα σε χαμηλές συγκεντρώσεις.

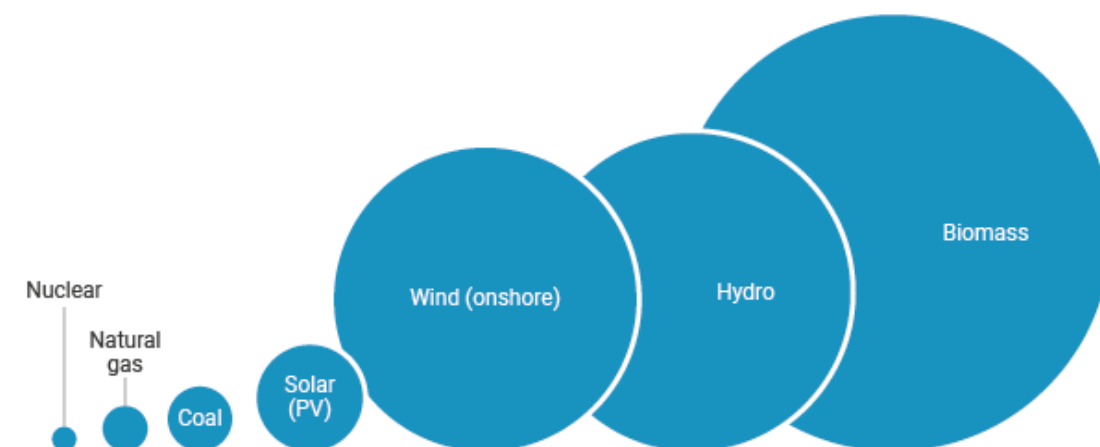
Η ακριβής ποσότητα ουρανίου στον πλανήτη δεν μπορεί να προσδιοριστεί. Το καλύτερο μέτρο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι τα τρέχοντα αποθέματα που μπορούν να εξορυχθούν (6.142.200 τόνοι σύμφωνα με στοιχεία του 2017). Παρόλο που κάθε πόρος στον πλανήτη (πλην της ηλιακής ακτινοβολίας) είναι μη ανανεώσιμος, το ουράνιο λόγω του πεπερασμένου αριθμού εργοστασίων που το χρησιμοποιούν ως καύσιμη ύλη, της αναμενόμενης μείωσης του σταδιακά στην Ευρώπη λόγω γήρανσης του στόλου αλλά και της δυνατότητας ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης μετά από επεξεργασία, μπορεί να θεωρηθεί και ως δυνητικά μη ανανεώσιμος. [1]

Οι εξορύξεις ουρανίου ξεκινούν επιτυχώς τη δεκαετία του '40. Σύμφωνα με στοιχεία του WNA, τα μεγαλύτερα κοιτάσματα βρίσκονται κυρίως σε Καναδά, Καζακστάν, Ουζμπεκιστάν και ΗΠΑ. Στην Ευρώπη, οι χώρες με τη μεγαλύτερη συνολική παραγωγή ουρανίου από το 1945 μέχρι και σήμερα είναι η (Δυτική) Γερμανία (η οποία και σταμάτησε τις εξορύξεις το 1990) με 217.161 τόνους, η Τσεχία (πρώην Τσεχοσλοβακία) με 111.214 τόνους και η Γαλλία με 77.015 τόνους. Αξίζει να σημειωθεί ότι η Γαλλία έπαυσε τις εξορύξεις ουρανίου το 2000, κρατώντας σημαντικά αποθέματα από τα συνολικά 250(!) ορυχεία της. [2]

Σήμερα, οι μεγαλύτερες ποσότητες ουρανίου που εφοδιάζουν τις πυρηνικές μονάδες στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι είτε εισαγόμενες είτε προέρχονται από την ανακύκλωση του καυσίμου (ακόμα και από στρατιωτικά προγράμματα). Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει επαρκής αριθμός ορυχείων στην Ευρώπη για να παραχθούν οι ποσότητες αποβλήτων και ραδιενέργειας από αυτά, για να επηρεαστεί η χερσαία βιοποικιλότητα. Συγκεκριμένα η Τσεχία που σήμερα είναι από τις λίγες ευρωπαϊκές χώρες παραγωγούς ουρανίου, με 2 ορυχεία σε λειτουργία, με το νέο Κρατικό Ενεργειακό Σχέδιο της Τσεχικής Δημοκρατίας, έθεσε όλες τις πηγές της σε καθεστώς πλήρους προστασίας για την αποφυγή περιβαλλοντικών επιμολύνσεων (κυρίως υπόγειων ρευμάτων νερού). Επίσης μια ακόμα χώρα, η Σλοβενία, τερμάτισε και αυτή τις εξορύξεις ουρανίου το

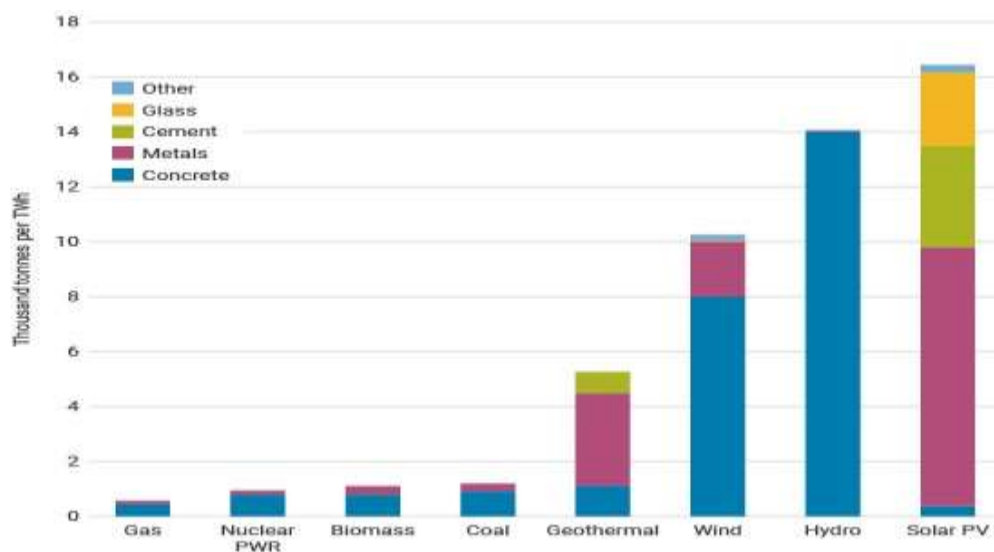
1990 παύοντας τη λειτουργία του μοναδικού ορυχείου της για περιβαλλοντικούς λόγους. [3]

Μια μεγάλη πυρηνική μονάδα με 2 αντιδραστήρες μπορεί να παράσχει ηλεκτρική ενέργεια για 4-5 εκ. ανθρώπους με γεωγραφικό αποτύπωμα που δεν υπερβαίνει τα 2 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Σε αυτό το αποτύπωμα περιλαμβάνεται, φυσικά, εκτός από τη χρήση γης για την εγκατάσταση του εργοστασίου, και η χρήση γης για διαδικασίες εξόρυξης του καυσίμου που χρησιμοποιεί (ορυχεία). [4]



Εικόνα 3: Relative land use (fuel mining and generating footprint) of electricity generation options per unit of electricity (Brook and Bradshaw, 2015)

Επίσης, σύμφωνα με μελέτη του Αμερικανικού Υπουργείου Ενέργειας, ανάμεσα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η πυρηνική έχει τις μικρότερες απαιτήσεις κύκλου ζωής κατασκευαστικών υλικών. Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψη, η πυρηνική ενέργεια έχει το μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σχέση με τις υπόλοιπες ανανεώσιμες και μη πηγές ενέργειας. [5]



Εικόνα 4: Απαιτήσεις κατασκευαστικών υλικών διαφόρων πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (thousand tonnes/TWh) (Πηγή: US Dpt. Of Energy, 2015)

Τέλος, όσον αφορά το κλείσιμο ενός ορυχείου ουρανίου, τα χαμηλής ραδιενέργειας απόβλητα που παρήχθησαν, καλύπτονται από ένα παχύ στρώμα (2μ) αργίλου και χόματος, έτσι ώστε να περιοριστεί η ραδιενέργεια στις αρχικές τις τιμές, πριν τη διάνοιξη του. [6]

Πίνακας 2: Παραγωγή ουρανίου σε χώρες της ΕΕ (tU/year) (OECD, 2019)

Κράτη-μέλη της ΕΕ των 27	2017	2018	2020	2025	2030	2035
Γαλλία**	2	2	0	0	0	0
Γερμανία**	40	40	0	0	0	0
Ουγγαρία**	5	5	0	0	0	0
Τσεχία	70	70	50	50	50	30
Φινλανδία*	0	0	250	250	250	250
Σύνολο	117	117	300	300	300	280

* παραπροϊόντα παραγωγής νικελίου από πηγές σχιστόλιθου χαμηλών συγκεντρώσεων

** προϊόντα από δραστηριότητες περιβαλλοντικών καθαρισμών

2.2. ΟΙ ΕΞΟΥΡΞΕΙΣ ΟΥΡΑΝΙΟΥ ΤΑ ΕΠΟΜΕΝΑ ΧΡΟΝΙΑ

Η τεράστια ενεργειακή πυκνότητα του ουρανίου που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μεταφράζεται σε μειούμενες ροές καυσίμου κάθε χρόνο προς τα εργοστάσια. Αυτό με τη σειρά του σημαίνει λιγότερες εξορύξεις της πρώτης ύλης, κάτι το οποίο είναι υπέρ της προστασίας της χερσαίας βιοποικιλότητας. Συνακόλουθα, μειώνονται και οι ανάγκες μεταφοράς των ορυκτών για επεξεργασία και χρήση, με ό,τι αυτό συνεπάγεται για τους παραγόμενους ρύπους από τον κύκλο ζωής του καυσίμου (χερσαίες ή θαλάσσιες μεταφορές από τα ορυχεία στα κέντρα επεξεργασίας, μετά στα εργοστάσια και τέλος στους χώρους αποθήκευσης αναλωμένων καυσίμων).

Σύμφωνα με την ανακοίνωση υπ. Αριθ. 52006DC0844 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής προς το Συμβούλιο και το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, η οποία στηρίζεται στο άρθρο 40 της Συνθήκης EURATOM, στο άμεσο μέλλον δεν προβλέπεται έλλειψη ουρανίου. Οι εύλογα ασφαλείς και ανακτήσιμοι πόροι ουρανίου σε ανταγωνιστικές τιμές μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις της πυρηνικής βιομηχανίας τουλάχιστον μέχρι και το 2090 με τα τρέχοντα επίπεδα κατανάλωσης, με τον ορίζοντα αυτόν να επεκτείνεται αφού, τουλάχιστον στην Ευρώπη, τα εργοστάσια που θα παροπλιστούν τα επόμενα έτη είναι περισσότερα από αυτά που κατασκευάζονται.

Ακόμα, η γεωπολιτική κατανομή των πηγών ουρανίου, που προμηθεύουν την ΕΕ, είναι αρκετά διαφοροποιημένη, σε βαθμό που οι προαναφερθείσες πηγές βρίσκονται σε πολιτικά σταθερές χώρες του κόσμου (Καναδάς και Αυστραλία καλύπτουν το 45% των αναγκών της ΕΕ). Έτσι δε συντρέχει κίνδυνος κακοδιαχείρισης με άμεσες περιβαλλοντικές ή οικονομικές επιπτώσεις. [7]

Με βάση τα τρέχοντα αποθέματα ουρανίου που κατέχουν οι χώρες της ΕΕ από εξορύξεις προηγούμενων δεκαετιών και τα ανακυκλωθέντα καύσιμα, αποκλείοντας τις

εξωκοινοτικές εισαγωγές, η πλειοψηφία των εργοστασίων, ειδικά στις χώρες με μικρό δυναμικό, μπορούν να είναι ενεργειακά αυτόνομα για τουλάχιστον μια δεκαετία ακόμα.

Πίνακας 3: Απαιτήσεις σε ουράνιο για τη λειτουργία πυρηνικών μονάδων στην ΕΕ (tU/year) (OECD, 2020)

Κράτη-μέλη της ΕΕ των 27	2017	2018	2020	2025	2030	2035	2040
Βέλγιο	955	630	815	N/A	N/A	N/A	N/A
Βουλγαρία	327	327	331	334	N/A	N/A	N/A
Γαλλία	8.300	7.370	7.400	6.900	>5.400	>4.500	N/A
Γερμανία	2.022	1.419	1.264	0	0	0	0
Ισπανία	1.291	906	944	1.600	400-500	N/A	N/A
Ολλανδία	82	82	83	33-65	65-76	0	0
Ουγγαρία	394	324	345	342	807	615	466
Πολωνία	0	0	0	200	250	350	350
Ρουμανία	183	183	185	185	185	185	185
Σλοβακία	317	322	515	N/A	N/A	N/A	N/A
Σλοβενία	149	149	119-179	119-179	119-179	119-179	119-179
Σουηδία	1.200	1.200	1.100<	900-1.050	900-1.050	900-1.050	500-1.050
Τσεχία	432	793	635-645	685-700	685-700	685-700	685-895
Φινλανδία	446	430	690-750	590-760	700-780	700-780	450-530
Σύνολο	16.098	14.135					

2.3. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΝΕΡΟΥ

Κατά κοινή ομολογία, το νερό, και κυρίως το καθαρό, αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους και πολυτιμότερους πόρους στον πλανήτη. Κάθε εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σε οποιοδήποτε στάδιο (εγκατάστασης, εφοδιασμού ή λειτουργίας) της ζωής του, καταναλώνει νερό. Έτσι και οι πυρηνικές μονάδες χρειάζονται μεγάλες ποσότητες, κυρίως για την ομαλή λειτουργία των συστημάτων ψύξης.

Η πλειοψηφία των πυρηνικών εργοστασίων στην ΕΕ χρησιμοποιεί το σύστημα άμεσης ψύξης (direct or once-through cooling system) καθώς η εγκατάστασή τους κοντά στη θάλασσα ή σε όχθες ποταμών είναι συχνό φαινόμενο. Η κατανάλωση νερού από εργοστάσια με το συγκεκριμένο σύστημα ψύξης είναι στατιστικώς αμελητέα, παρότι χρειάζονται μεγάλες ποσότητες νερού για να ομαλοποιείται η λειτουργία τους. Έτσι δεν επηρεάζονται πηγές καθαρού νερού (blue water), όπως ποτάμια ή λίμνες στις όχθες των οποίων εγκαθίστανται πυρηνικές μονάδες. Εδώ πρέπει να διευκρινιστεί ότι η κατανάλωση (consumption) και η άντληση (withdrawal) του νερού είναι δύο διαφορετικές έννοιες, καθώς στην πρώτη γίνεται λόγος για εξάτμιση ή επιμόλυνση και στη δεύτερη για απλή χρήση και επιστροφή στην αρχική πηγή. Όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 1.2, το νερό που διέρχεται μέσα από τους ψυκτήρες, μπορεί να είναι καθαρό, υφάλμυρο, ανακυκλωμένο ή ακόμα και προερχόμενο από λήμματα χωρίς να

επηρεάσει τη λειτουργία τους ενώ δεν έρχεται καθόλου σε επαφή με το ραδιενεργό καύσιμο, διότι διοχετεύεται μέσω ξεχωριστών σωλήνων. Έτσι δεν υπάρχει κίνδυνος επιμόλυνσης των παρακείμενων υδάτων ούτε επηρεάζεται η θαλάσσια ή η παραποτάμια βιοποικιλότητα. [8]

Στον παρακάτω χάρτη απεικονίζονται οι πυρηνικές μονάδες που λειτουργούν στην ΕΕ. Παρατηρείται ένα μοτίβο εγκατάστασης κατά μήκος των ακτογραμμών (Γαλλία, Βέλγιο, Ολλανδία, Ισπανία, Σουηδία, Φινλανδία), αλλά και πλησίον των μεγάλων ευρωπαϊκών ποταμών (Ροδανός, Δούναβης, Τάγος, Έλβας, Ρήνος).



Εικόνα 5: Map of Nuclear Power Plants in Europe (Πηγή: Secrétariat Général de la Défense et de la Sécurité Nationale, 2014)

Σύμφωνα με τους Mekonnen et al. (2015), το συνολικό μέσο αποτύπωμα νερού (για τη λειτουργία και την εφοδιαστική αλυσίδα) που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ηλεκτρισμού από πυρηνικές μονάδες στην Ευρωπαϊκή Ένωση, άγγιξε περίπου τα 2.908 εκ. m^3/TJ την περίοδο 2008-2012, τη στιγμή που τα αντίστοιχα λιγνιτικά εργοστάσια κατανάλωναν περί τα 3.191 εκ. m^3/TJ καθαρού νερού τη συγκεκριμένη περίοδο. Στην περίπτωση των εργοστασίων άμεσης ψύξης η κατανάλωση μειώνεται κατά περίπου 40% αυξάνοντας τη βιωσιμότητα των πυρηνικών εργοστασίων στην Ευρώπη, αφού η πλειοψηφία λειτουργεί με αυτό το σύστημα. [9]

Τέλος, διενεργούνται έρευνες και βρίσκονται λύσεις για το πρόβλημα της προσρόφησης στο σύστημα ψύξης, μικρών ψαριών και λοιπών οργανισμών που κατοικούν στους υδροβιότοπους κοντά στις μονάδες. Συγκεκριμένα, στα συστήματα άμεσης ψύξης (once-through) ένα ελάχιστο ποσοστό της τάξης του 0,02-1,4% των υποθαλάσσιων ειδών εγκλωβίζεται εντός αυτών χωρίς όμως αυτό το γεγονός να έχει δυσμενή αντίκτυπο στην παρακείμενη βιοποικιλότητα. Έτσι υπάρχει μέριμνα και για την προστασία της θαλάσσιας και παραποτάμιας βιοποικιλότητας, με την ανάπτυξη φραγμάτων, συστημάτων εκτροπής ροών νερού, λεπτών πλεγμάτων κλπ. [10]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ CO₂ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΤΑΣΕΩΣ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΙΣ ΧΩΡΕΣ ΤΗΣ ΕΕ ΜΕ ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΑ

3.1. ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΤΟΥ ΚΙΟΤΟ

Με την αλματώδη εξέλιξη της τεχνολογίας και της βιομηχανίας, ήδη από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα παρατηρήθηκε εξίσου μεγάλη αύξηση των εκπομπών αερίων, τα οποία είναι υπεύθυνα για την υπερθέρμανση του πλανήτη και συνακόλουθα για τη γενικότερη κλιματική αλλαγή.

Ήδη τις τελευταίες 3 δεκαετίες γίνεται μια συνειδητοποιημένη και συντονισμένη προσπάθεια για τη μείωση των εν λόγω ρύπων. Πρόδρομος αυτής της προσπάθειας ήταν η σύμβαση των Ηνωμένων Εθνών για τις κλιματικές μεταβολές η οποία παρουσιάστηκε το 1992, και επικυρώθηκε το 1993. Τέσσερα χρόνια αργότερα θεσπίζεται το πρωτόκολλο του Κιότο (11 Δεκ. 1997) και υπογράφεται από την Ευρωπαϊκή Κοινότητα τον Απρίλιο του 1998.

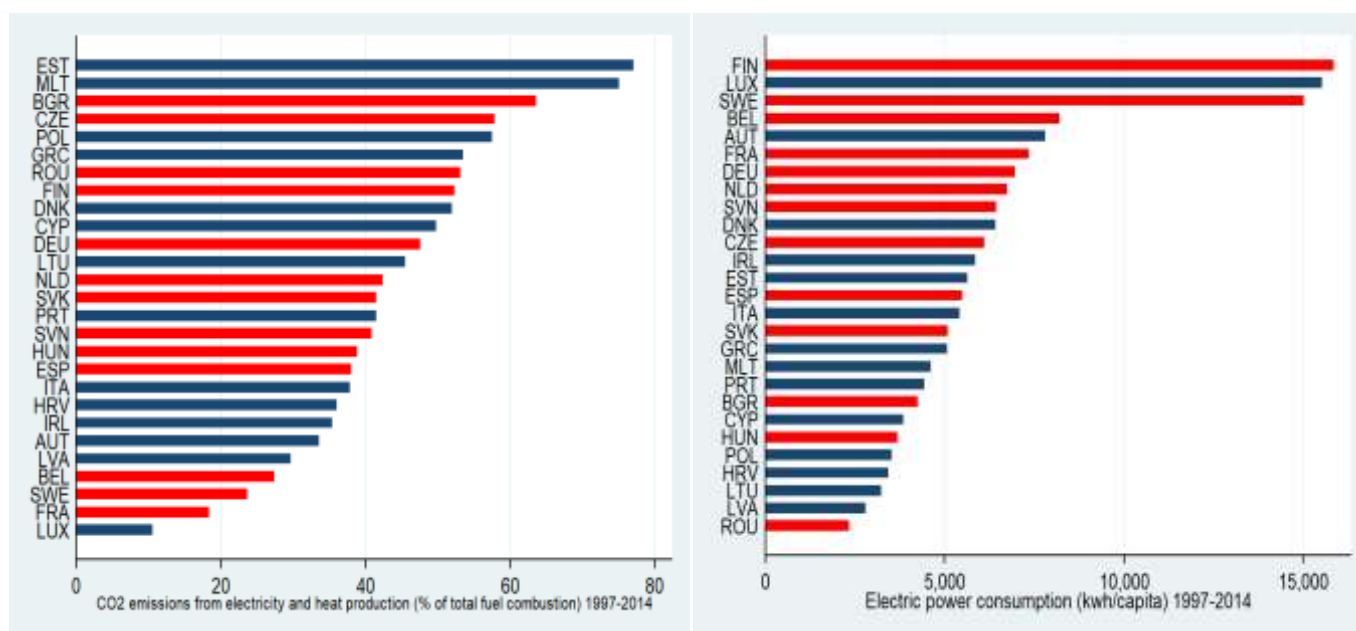
Το πρωτόκολλο του Κιότο, συνιστά ένα σημαντικό βήμα στην καταπολέμηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη, καθώς περιλαμβάνει δεσμευτικούς και ποσοτικοποιημένους στόχους περιορισμού των έξι (6) συνολικά αερίων του θερμοκηπίου, με σημαντικότερο αυτών το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Συγκεκριμένα αναφέρεται ότι τα κράτη-μέλη της ΕΕ, οφείλουν να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 8% μεταξύ 2008-2012. [1]

Η ανάγκη μείωσης των εκπομπών CO₂ από την παραγωγή ενέργειας έχει οδηγήσει πολλές χώρες εντός της ΕΕ να διατηρήσουν τα πυρηνικά τους προγράμματα και να επενδύσουν, εκτός από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στη δημιουργία νέων τύπων πυρηνικών εργοστασίων, ακόμα πιο φιλικών στο περιβάλλον. Η πυρηνική καθίσταται η σημαντικότερη μη ρυπογόνα πηγή ενέργειας όσο αναφορά τους αέριους ρύπους (ακολουθούν η υδροηλεκτρική και οι λοιπές ανανεώσιμες). [2]

3.2. ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO₂ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (1997-2014)*

Σύμφωνα με τους K.Saidi και A.Omri, βραχυχρόνια, η κατανάλωση ενέργειας που προέρχεται από την πυρηνική, παίζει σημαντικό ρόλο στη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, αφού ένα πυρηνικό εργοστάσιο παράγει αμελητέες ποσότητες καθόλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του (<15g of CO₂-eq/kWh). Ειδικότερα στη Γαλλία, αυτό αποδεικνύεται και από την ανάλυση της περιβαλλοντικής καμπύλης Kuznets. Επίσης, η ανάλυση των Saidi και Omri δείχνει ότι η κατανάλωση πυρηνικής ενέργειας μειώνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο τόσο στη Γαλλία, η οποία κατέχει τη μεγαλύτερη παραγωγή, όσο και σε άλλες χώρες της ΕΕ με μικρότερη, όπως η Ολλανδία, η Ισπανία και η Τσεχία. [3]

Στα παρακάτω διαγράμματα, παρουσιάζονται ο κυλιόμενος μέσος όρος των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, στον ενεργειακό τομέα (CO₂ emissions from electricity and heat production, % of total fuel combustion) καθώς και ο κυλιόμενος μέσος όρος κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ανά κάτοικο (electric power consumption, kwh per capita) σε κάθε ένα από τα κράτη-μέλη της ΕΕ, από το 1997, οπότε και θεσπίζεται το πρωτόκολλο του Κιότο, μέχρι και το 2014, οπότε και υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα.



Αυτό που παρατηρείται στα συγκεκριμένα διαγράμματα είναι ότι χώρες με μεγάλη ενεργειακή κατανάλωση όπως η Φινλανδία, η Σουηδία, το Βέλγιο και η Γαλλία βρίσκονται πολύ χαμηλά σε επίπεδο εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Η περίπτωση της Γαλλίας, η οποία βρίσκεται στην προτελευταία θέση, είναι εύλογη καθώς έχει επενδύσει σε μεγάλο βαθμό στην πυρηνική ενέργεια (>70% της παραγωγής ήδη από το 1986). Οι περιπτώσεις της Φινλανδίας και της Σουηδίας βασίζονται κατά κύριο λόγο στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, κρατώντας παράλληλα την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας σταθερή και μειώνοντας την παραγωγή από συμβατικές πηγές. Στο άλλο άκρο βρίσκονται χώρες όπως Βουλγαρία, Τσεχία και Ρουμανία. Οι δύο πρώτες αν και

χαμηλά σε ενεργειακή κατανάλωση, βρίσκονται ψηλά στη λίστα των εκπομπών καθώς εκτός από την πυρηνική ενέργεια, οι συμβατικές πηγές κατέχουν ακόμα ποσοστό μεγαλύτερο του 50% της συνολικής παραγωγής ενέργειας. Όσο αναφορά τη Ρουμανία, έχει σημειώσει πρόοδο με την προσπάθεια που γίνεται για αύξηση των ποσοστών παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε βάρος των συμβατικών που όμως δε φαίνεται να είναι αρκετή για να τη ρίξει από την 7^η θέση της λίστας των εκπομπών παρόλο που έχει τη μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση από όλα τα κράτη-μέλη της ΕΕ των 27. Και αυτό γιατί μέχρι το 2007 το ποσοστό παραγωγής ηλεκτρισμού από πυρηνική ενέργεια στη χώρα δεν υπερέβαινε το 11% της συνολικής και από το 2010 που έφτασε τη μέγιστη τιμή του (20,35%), ξεκίνησε μια σταδιακή μείωση.

Στον αντίποδα, τα κράτη-μέλη που δε διαθέτουν πυρηνικά εργοστάσια ή σημαντική παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές, παρουσιάζουν αυξημένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ακόμα και αν αυτές δεν έχουν μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις και αυξημένη κατανάλωση, με πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα τις Εσθονία, Μάλτα, Πολωνία, Ελλάδα και Κύπρο. Αυτές οι χώρες βασίζονται το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτροπαραγωγής τους (80-100%) σε συμβατικές πηγές ενέργειας.

Τέλος, χώρες όπως η Αυστρία, η Κροατία και η Λετονία έχουν αποφασίσει να επενδύσουν κατά κύριο λόγο στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με τα μέσα ποσοστά παραγωγής από αυτές να φτάνουν το 69% , 63% και 54% αντίστοιχα τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο με ανοδικές τάσεις καθόλη τη διάρκειά της. Ειδικότερα η Αυστρία είναι και η μόνη χώρα η οποία κρατάει χαμηλά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, παρά τη μεγάλη ενεργειακή κατανάλωση, βασιζόμενη αποκλειστικά χάρη στις ανανεώσιμες πηγές.

Συνεπώς, η παραγωγή ηλεκτρισμού από την πυρηνική ενέργεια σε μεγάλα ποσοστά (άνω του 40%) ενδείκνυται για χώρες με υψηλή και μέση ενεργειακή κατανάλωση υπό την προϋπόθεση το υπόλοιπο ποσοστό να μην περιλαμβάνει αποκλειστικά συμβατικές πηγές ενέργειας αλλά ένα μίγμα συμβατικών και ανανεώσιμων. Σε χώρες με μικρή ενεργειακή κατανάλωση (<5500 kWh/capita), αρκεί ένα πλήρως διαφοροποιημένο χαρτοφυλάκιο, το οποίο θα περιλαμβάνει και τους 3 τύπους ενέργειας, με το βάρος να δίνεται στην υποκατάσταση των συμβατικών πηγών με ανανεώσιμες (πχ. Ισπανία).

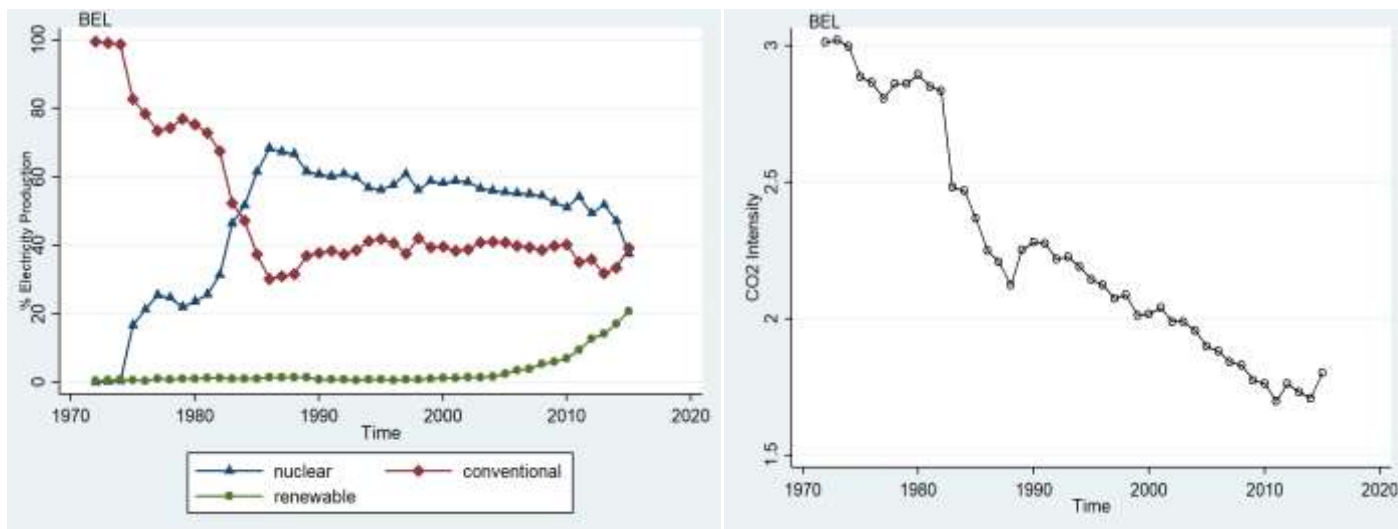
3.3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΤΑΣΕΩΣ CO₂*

Στο παρόν υποκεφάλαιο, θα αναλυθεί η διαχρονική σχέση της έντασης του διοξειδίου του άνθρακα (kg per kg of oil equivalent energy use), με το ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικές μονάδες (% of total electricity production) για κάθε ένα από τα 13 κράτη-μέλη της ΕΕ που διαθέτουν τέτοιες. Ένταση διοξειδίου του άνθρακα καλείται το ποσοστό διοξειδίου του άνθρακα ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας, ή αλλιώς, η ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα που εκλύεται από μια μονάδα ενέργειας για οποιονδήποτε σκοπό. Στα διαγράμματα που ακολουθούν, συμπεριλαμβάνονται και τα ποσοστά παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες και από συμβατικές πηγές συμπεριλαμβανομένων και των αντίστοιχων συντελεστών συσχέτισης για την ασφαλέστερη εξαγωγή συμπερασμάτων.

Τα διαγράμματα και οι συντελεστές συσχέτισης έχουν κατασκευαστεί και υπολογιστεί αντίστοιχα με τη χρήση του οικονομετρικού προγράμματος STATA.

BELGIO

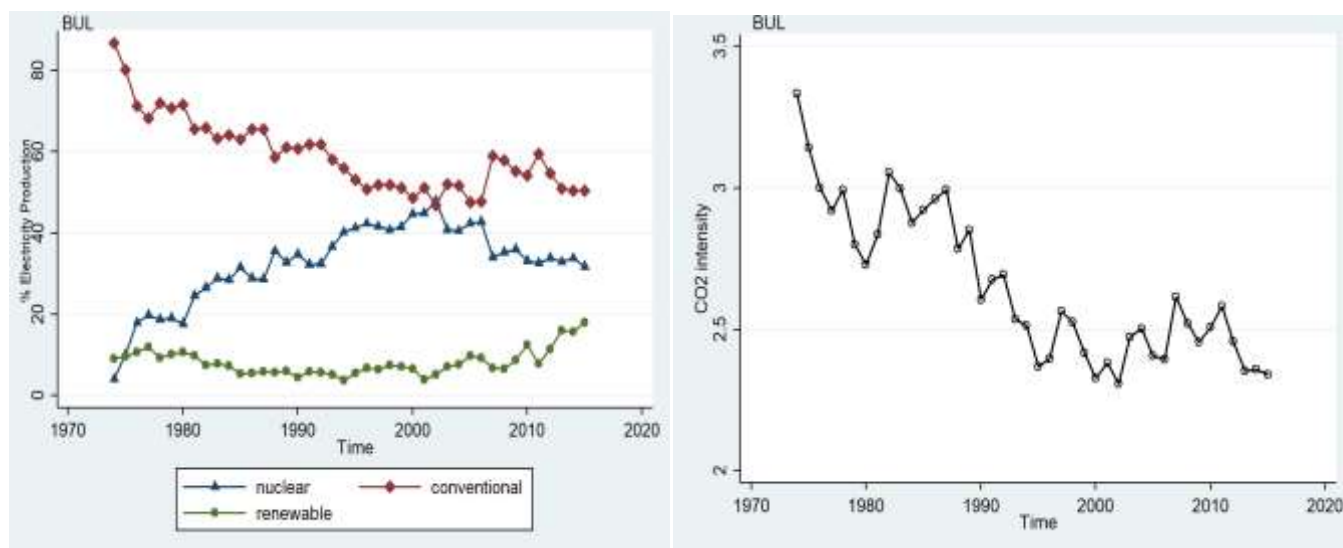
Διάγραμμα 1: Correlation between electricity production shares and CO2 intensity over time (1972-2015) - Belgium



Το Βέλγιο, όπως μαρτυρούν τα διαγράμματα, από τις αρχές της δεκαετίας του '70 έως τα μέσα των '00, βασίστηκε σε μεγάλο βαθμό στην πυρηνική ενέργεια και κατάφερε δραστική μείωση της έντασης του διοξειδίου του άνθρακα. Από το 2015 και εξής, οπότε και αρχίζει μια σταδιακή υποχώρηση της παραγωγής των πυρηνικών εργοστασίων, η προσπάθεια για υποκατάστασή τους με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δείχνει να έχει τα αντίθετα αποτελέσματα αφού ο δείκτης εντάσεως CO2 έχει ανοδική τάση. (συντ. συσχ. %nuclear-CO2 intensity: -0.7738, %renewable-CO2 intensity: -0.5527)

ΒΟΥΛΓΑΡΙΑ

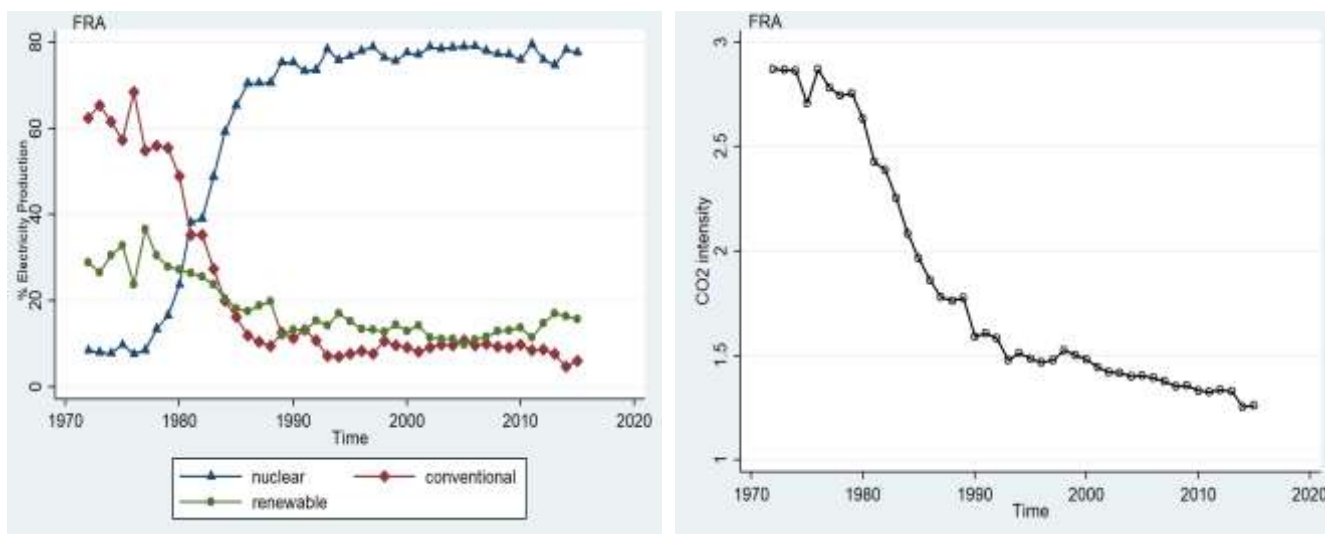
Διάγραμμα 2: Correlation between electricity production shares and CO2 intensity over time (1974-2015) - Bulgaria



Η περίπτωση της Βουλγαρίας ακολουθεί κατά κανόνα την αρνητική σχέση μεταξύ ποσοστού ηλεκτροπαραγωγής από πυρηνική ενέργεια και εντάσεως διοξειδίου του άνθρακα και μάλιστα με τον συντελεστή συσχέτισης να είναι κατά πολύ υψηλότερος από τον αντίστοιχο των ανανεώσιμων οι οποίες αν και τα τελευταία χρόνια έχουν ανοδικές τάσεις, διαχρονικά δεν ξεπερνούν σε ποσοστό το 15% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής. Ο λόγος που η ένταση των εκπομπών είναι σε υψηλά επίπεδα σε σχέση με άλλα κράτη-μέλη, έγκειται στα υψηλά ποσοστά ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικές πηγές ειδικά μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '90. (συντ. συσχ. %nuclear-CO2 intensity: -0.8342, %renewable-CO2 intensity: -0.0939)

ΓΑΛΛΙΑ

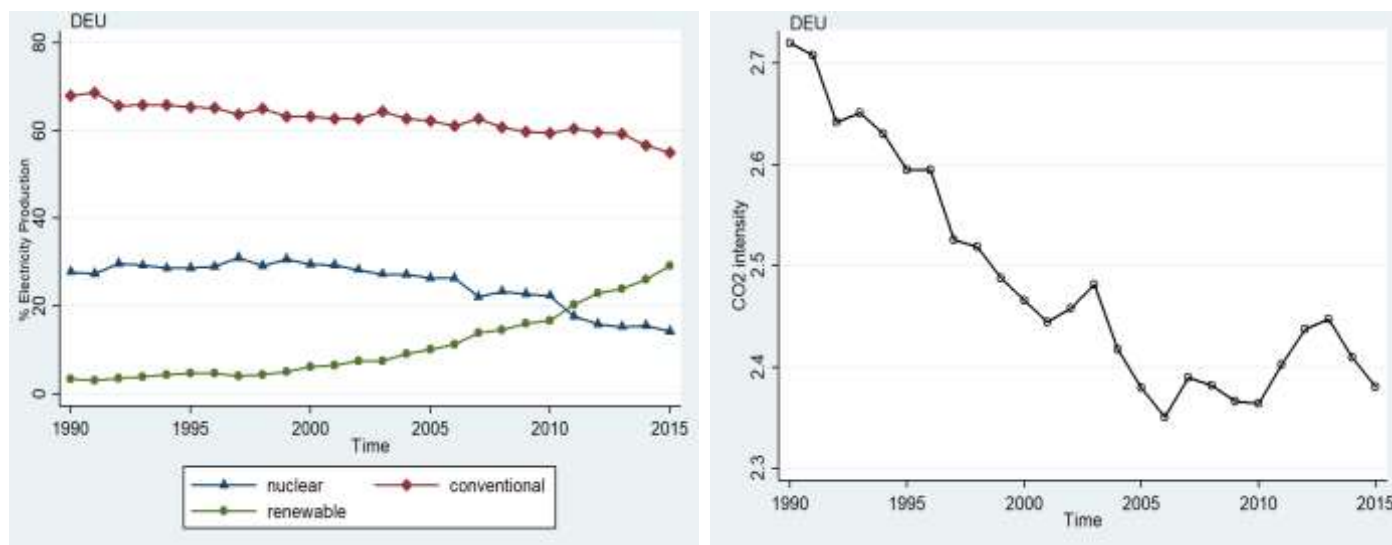
Διάγραμμα 3: Correlation between electricity production shares and CO2 intensity over time (1972-2015) - France



Η Γαλλία, ως πρωτοπόρος στην πυρηνική ενέργεια στην ΕΕ, σημειώνει τις καλύτερες επιδόσεις όσο αναφορά την ένταση του διοξειδίου του άνθρακα, αφού από το 2000 οι τιμές είναι σταθερά κάτω από 1,5 kg/kg of oil eq. of energy use ενώ το ποσοστό παραγωγής ηλεκτρισμού από πυρηνικά, διατηρείται και αυτό σταθερό λίγο χαμηλότερα από το 80%. Από το 1980 που η χώρα αποφάσισε να επενδύσει μαζικά στην πυρηνική ενέργεια, υπήρξε κατακόρυφη πτώση του δείκτη εντάσεως, που φτάνει μέχρι και τα μέσα της δεκαετίας του '90 και τη σταδιακή σταθεροποίησή του. (συντ. συσχ. %nuclear-CO2 intensity: -0.9755, %renewable-CO2 intensity: 0.9247)

ΓΕΡΜΑΝΙΑ

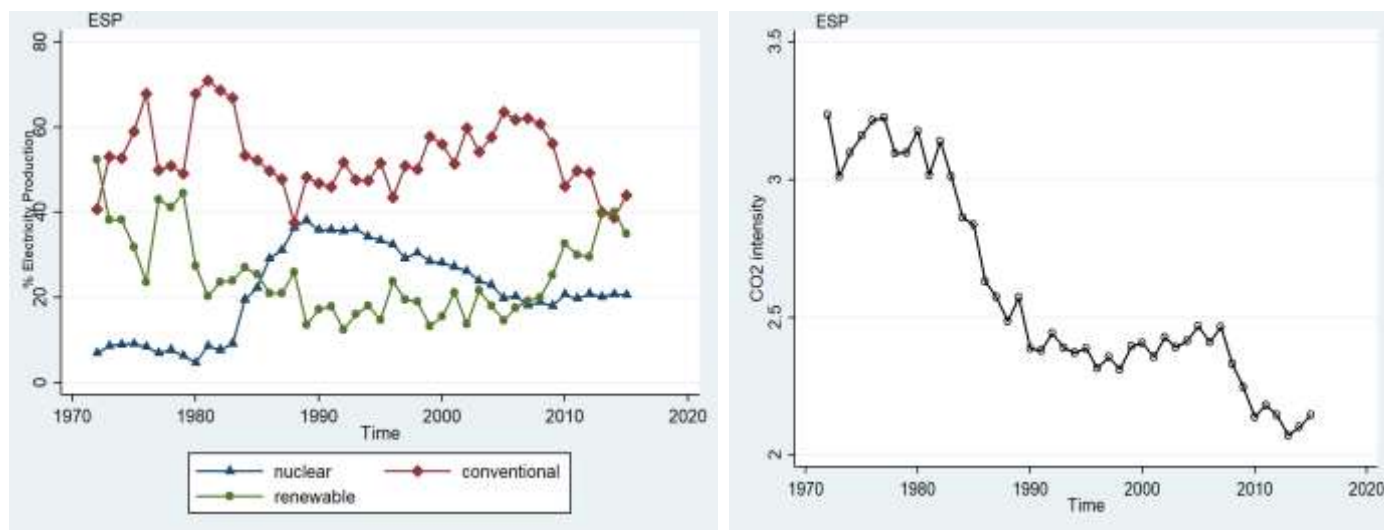
Διάγραμμα 4: Correlation between electricity production shares and CO2 intensity over time (1990-2015) - Germany



Η Γερμανία, από τις αρχές της δεκαετίας του '90 έως και τις αρχές της δεκαετίας των '10, κρατώντας σταθερή της ηλεκτροπαραγωγή της από τα πυρηνικά εργοστάσια, και επενδύοντας σε μικρότερο ποσοστό στις ανανεώσιμες, κατάφερε μια μικρή μείωση στην ένταση του CO₂ (από 2,72 στα 2,36 kg). Το ατύχημα στη Φουκουσίμα το 2011 στάθηκε αφορμή για τη γερμανική κυβέρνηση να πάρει την απόφαση της σταδιακής παύσης λειτουργίας των υπαρχόντων πυρηνικών εργοστασίων και την συγκέντρωση της προσοχής εξ ολοκλήρου στις ανανεώσιμες μέχρι το 2030. Αυτή η κίνηση βραχυχρόνια, αύξησε τον δείκτη της έντασης, ο οποίος επανήλθε σε καθοδικές τάσεις όταν σταθεροποιήθηκε και πάλι η παραγωγή των πυρηνικών εργοστασίων σε συνδυασμό με την άνοδο του ποσοστού παραγόμενης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. (συντ. συσχ. %nuclear-CO₂ intensity: 0.5230, %renewable-CO₂ intensity: -0.6686)

ΙΣΠΑΝΙΑ

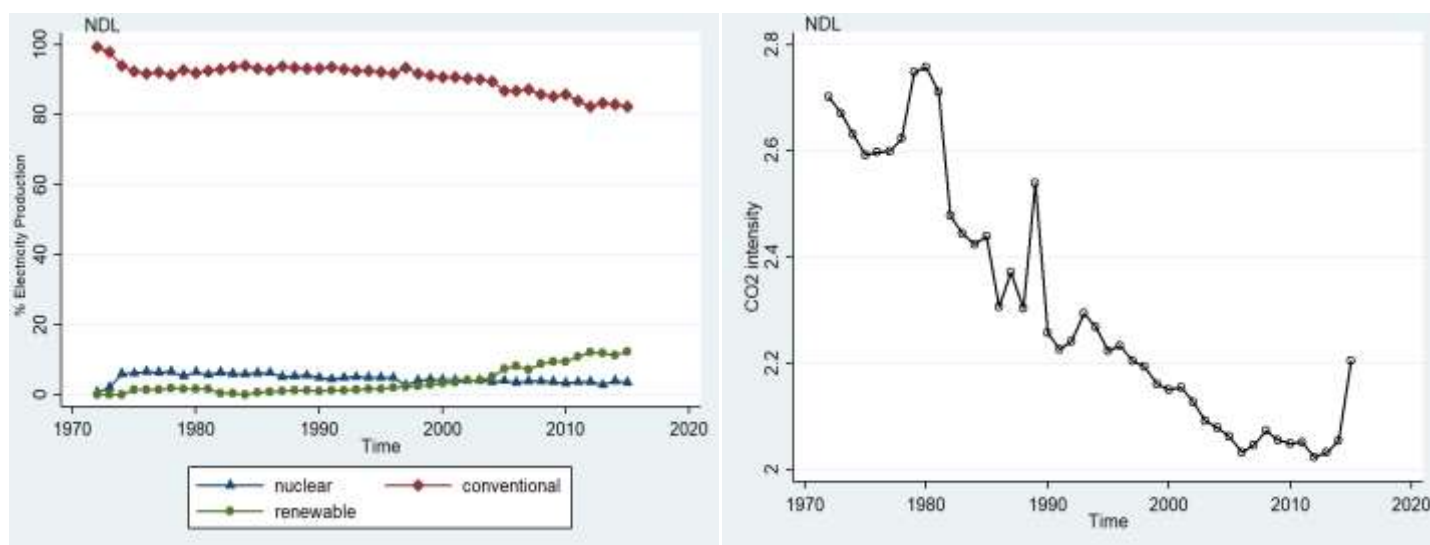
Διάγραμμα 5: Correlation between electricity production shares and CO2 intensity over time (1972-2015) - Spain



Στην Ισπανία, την περίοδο 1984-1989 που παρατηρείται μια μεγάλη αύξηση στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας, της τάξης του 10%, σημειώνεται ραγδαία πτώση της έντασης CO2 κατά σχεδόν 0,5 kg. Από το 1990 και μέχρι το 2009 το ποσοστό βαίνει σταθερά μειούμενο ενώ στον αντίποδα η ένταση παρουσιάζει μικρές τάσεις ανόδου, ιδιαίτερα τα έτη όπου τα ποσοστά ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικές πηγές αυξάνονται σε βάρος τόσο των πυρηνικών όσο και των ανανεώσιμων πηγών. Το διάστημα 2010-2014 χαρακτηρίζεται από τη σταθεροποίηση του ποσοστού της πυρηνικής ενέργειας στο 20% και την αύξηση των ποσοστών της παραγωγής από ανανεώσιμα έναντι των συμβατικών κάτι το οποίο έπαιξε σημαντικό ρόλο στη μείωση της εντάσεως. (συντ. συσχ. %nuclear-CO2 intensity: -0.7021, %renewable-CO2 intensity: 0.3930)

ΟΛΛΑΝΔΙΑ

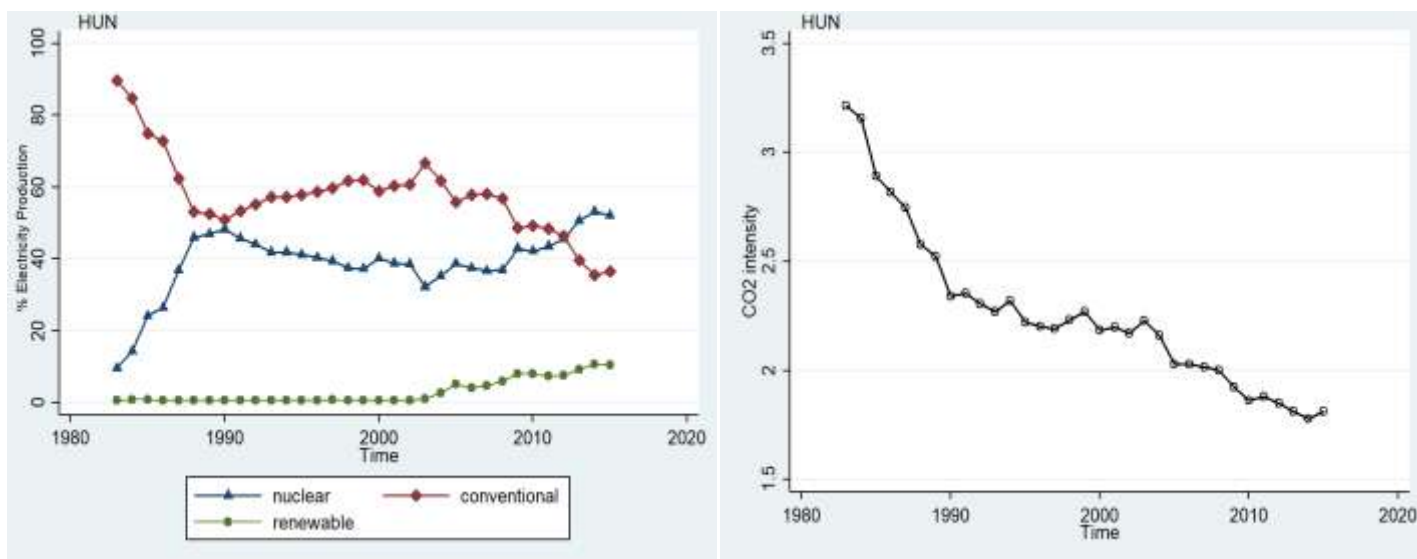
Διάγραμμα 6: Correlation between electricity production shares and CO2 intensity over time (1972-2015) – The Netherlands



Η Ολλανδία, είναι μια χώρα η οποία βασίστηκε και ακόμα βασίζεται σε μεγάλο ποσοστό (άνω του 80%) στις συμβατικές πηγές ενέργειας. Η παραγωγή του μοναδικού αντιδραστήρα εν λειτουργία, από το 1973 οπότε και συνδέθηκε στο δίκτυο, δεν ξεπέρασε έως σήμερα το 6,5% της συνολικής. Παρολαυτά, μέχρι και το 1995 όπου τα ποσοστά παραγωγής των ανανεώσιμων πηγών ήταν μικρότερα του 2%, ήταν σημαντικός παράγοντας για τη μείωση της έντασης κατά 0,48 kg. Από το 1998 και εξής το ποσοστό παραγωγής σταθεροποιείται στο 3,5-4% ενώ ταυτόχρονα αυτό των ανανεώσιμων αυξάνεται κατά 10%. (συντ. συσχ. %nuclear-CO2 intensity: 0.4635, %renewable-CO2 intensity: -0.6968)

ΟΥΓΓΑΡΙΑ

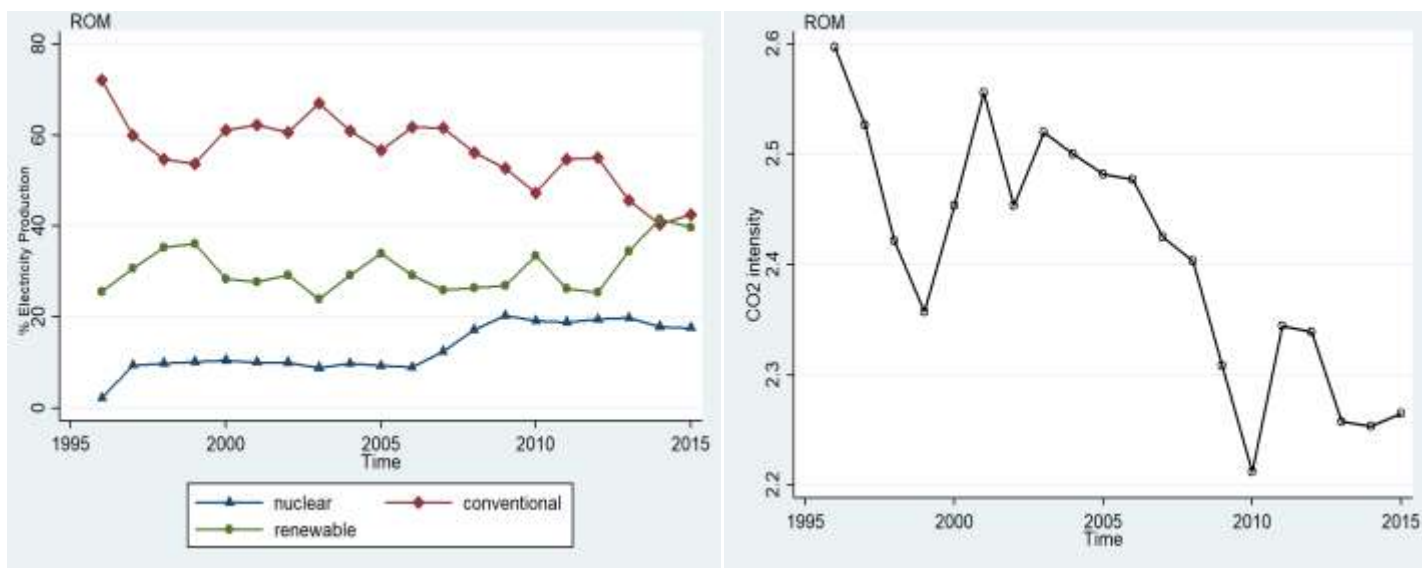
Διάγραμμα 7: Correlation between electricity production shares and CO2 intensity over time (1983-2015) - Hungary



Η περίπτωση της Ουγγαρίας αποτελεί μια ασφαλής απεικόνιση της αρνητικότητας της σχέσης μεταξύ ποσοστού πυρηνικής ηλεκτροπαραγωγής και εντάσεως διοξειδίου του άνθρακα και χωρίς τη συμβολή των ανανεώσιμων πηγών. Ιδιαίτερα μέχρι το 2004 όπου το ποσοστό των ανανεώσιμων δεν ξεπερνούσαν το 1% της παραγωγής ενέργειας, η πυρηνική συνέβαλε στη μείωση της έντασης κατά 1 kg/kg of oil eq. energy use. Από το 2004 μέχρι και το 2015 παρατηρείται μια ταυτόχρονη αύξηση των ποσοστών της πυρηνικής ενέργειας και των ανανεώσιμων σε βάρος των συμβατικών που συνέβαλε στην περαιτέρω μείωση της έντασης κατά 0,35 kg. (συντ. συσχ. %nuclear-CO2 intensity: -0.7630, %renewable-CO2 intensity: -0.6950)

POYMANIA

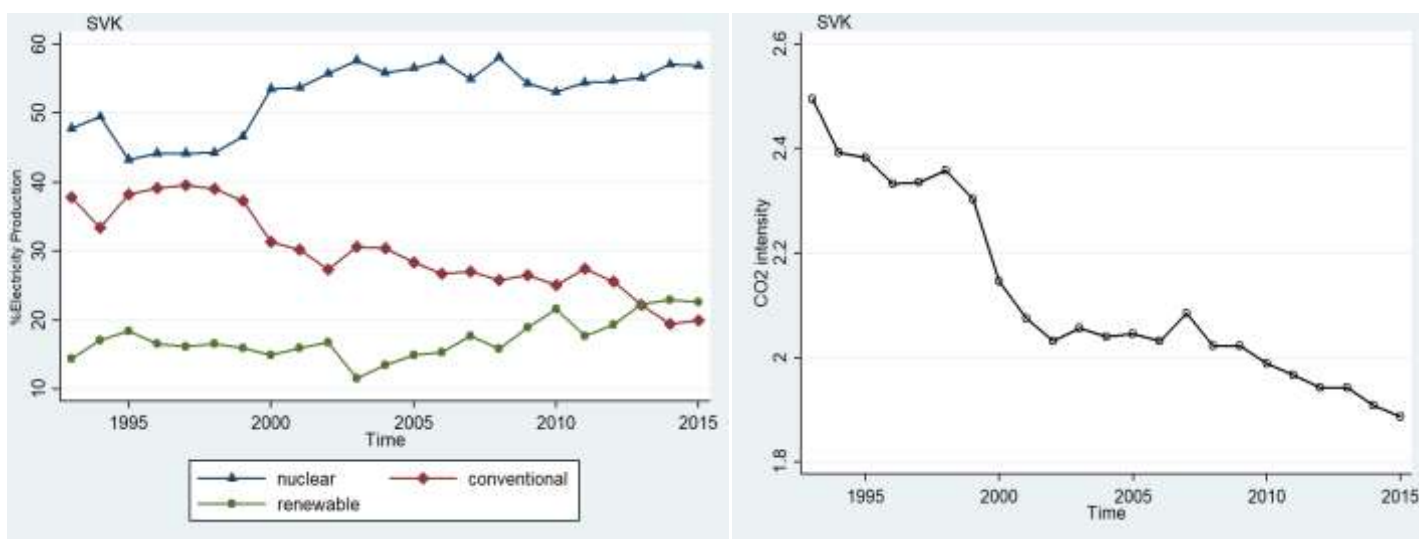
Διάγραμμα 8: Correlation between electricity production shares and CO2 intensity over time (1996-2015) - Romania



Η Ρουμανία εισήλθε στο λόμπι της πυρηνικής ενέργειας το 1996, και δίνει ένα πολύ καλό παράδειγμα συμπληρωματικότητας μεταξύ πυρηνικής και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, κρατώντας το ποσοστό της πρώτης τα τελευταία χρόνια στο 17-20% και προσπαθώντας να επενδύσει σε μεγαλύτερο βαθμό στις ανανεώσιμες. (συντ. συσχ. %nuclear-CO2 intensity: -0.8807, %renewable-CO2 intensity: -0.5344)

ΣΛΟΒΑΚΙΑ

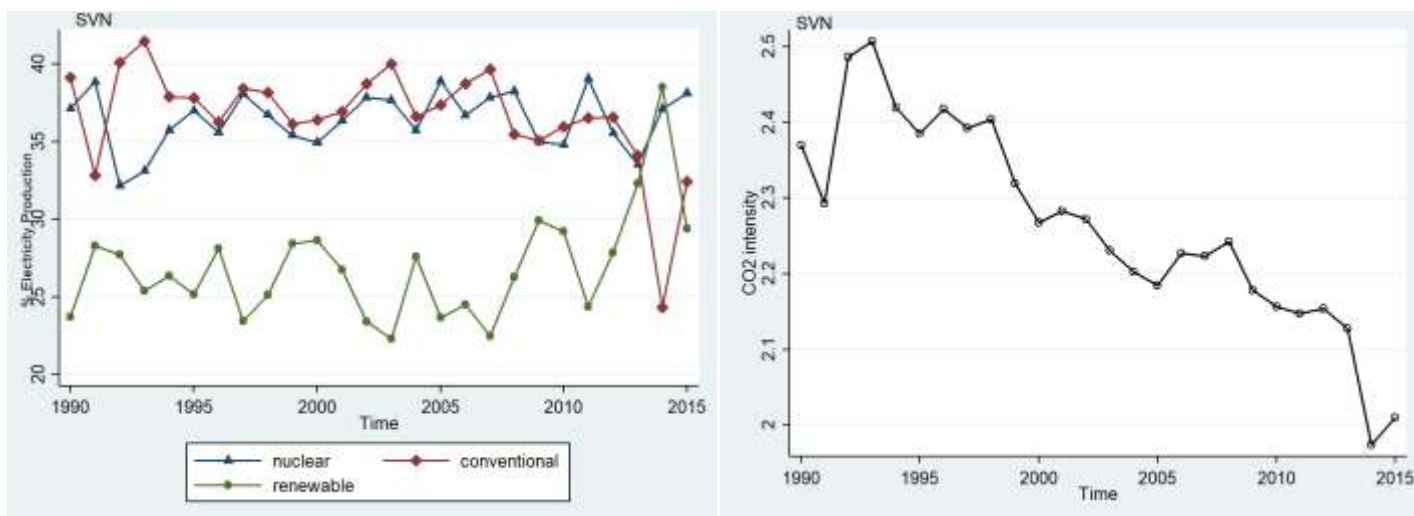
Διάγραμμα 9: Correlation between electricity production shares and CO2 intensity over time (1993-2015) – Slovak Rep.



Άλλο ένα πολύ καλό παράδειγμα συμπληρωματικότητας πυρηνικών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μετά τη Ρουμανία, αποτελεί και η Σλοβακία. Με ένα από τα μεγαλύτερα ποσοστά παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικές μονάδες στην ΕΕ (>43%), η χώρα ξεκίνησε να επενδύει ταυτόχρονα και στα ανανεώσιμα από το 1993-1994 σε ποσοστά άνω του 14%. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι από το 2010 όπου το ποσοστό των πυρηνικών κυμαίνεται στο 53% και οι ανανεώσιμες φτάνουν στη μέγιστη τιμή τους (21,6%), η Σλοβακία σπάει το φράγμα των 2 kg όσο αναφορά την ένταση CO₂ και έκτοτε κρατώντας σταθερά αυτά τα ποσοστά στο 54-57% και 17-22% αντίστοιχα, η ένταση μειώνεται και αυτή σταθερά κατά 0,02 kg το χρόνο. (συντ. συσχ. %nuclear-CO₂ intensity: -0.8706, %renewable-CO₂ intensity: -0.4184)

ΣΛΟΒΕΝΙΑ

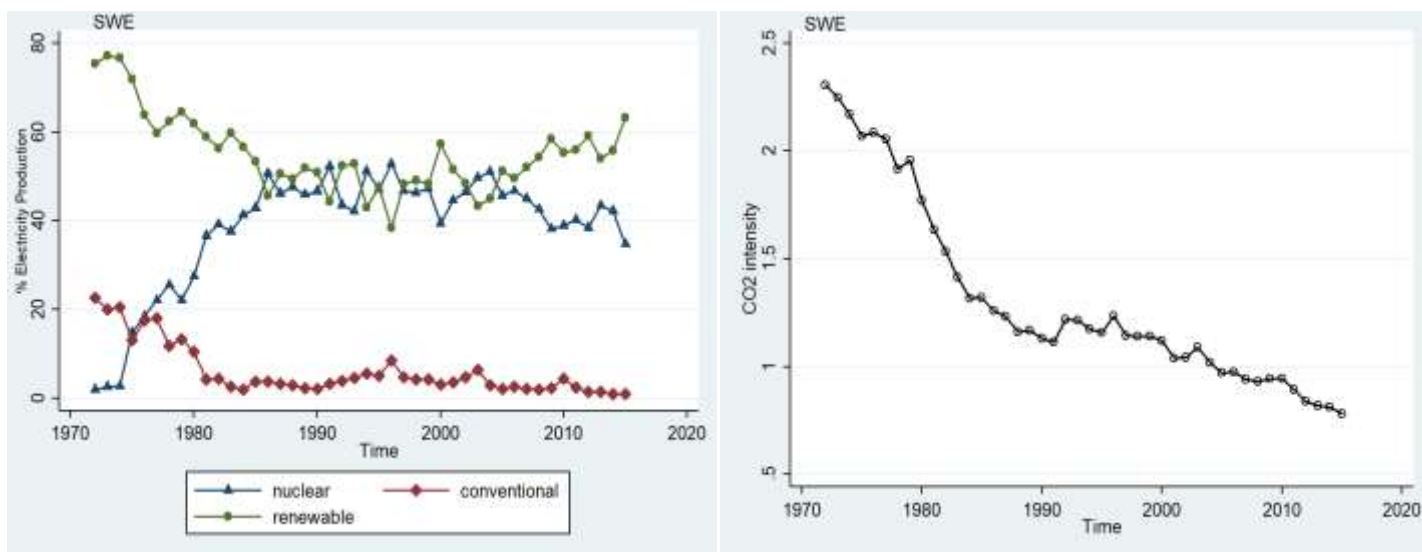
Διάγραμμα 10: Correlation between electricity production shares and CO2 intensity over time (1991-2015) - Slovenia



Η Σλοβενία, κατέχει ένα από τα πιο διαφοροποιημένα ενεργειακά χαρτοφυλάκια στην ΕΕ, με καμία μορφή ενέργειας να ξεπερνάει διαχρονικά το 42% παραγωγής της συνολικής. Από το 1992 μέχρι και το 2007, πυρηνική και ανανεώσιμες λειτουργούσαν ως υποκατάστατες μορφές ενέργειας με το ποσοστό των συμβατικών να είναι σταθερά κοντά στο 40%. Αντίθετα, όσες περιόδους αυτές λειτούργησαν συμπληρωματικά, παρατηρήθηκε σημαντική μεταβολή στην ένταση του διοξειδίου του άνθρακα έως και -0,15 kg (2013-2014). (συντ. συσχ. %nuclear-CO2 intensity: -0.3302, %renewable-CO2 intensity: -0.4817)

ΣΟΥΗΔΙΑ

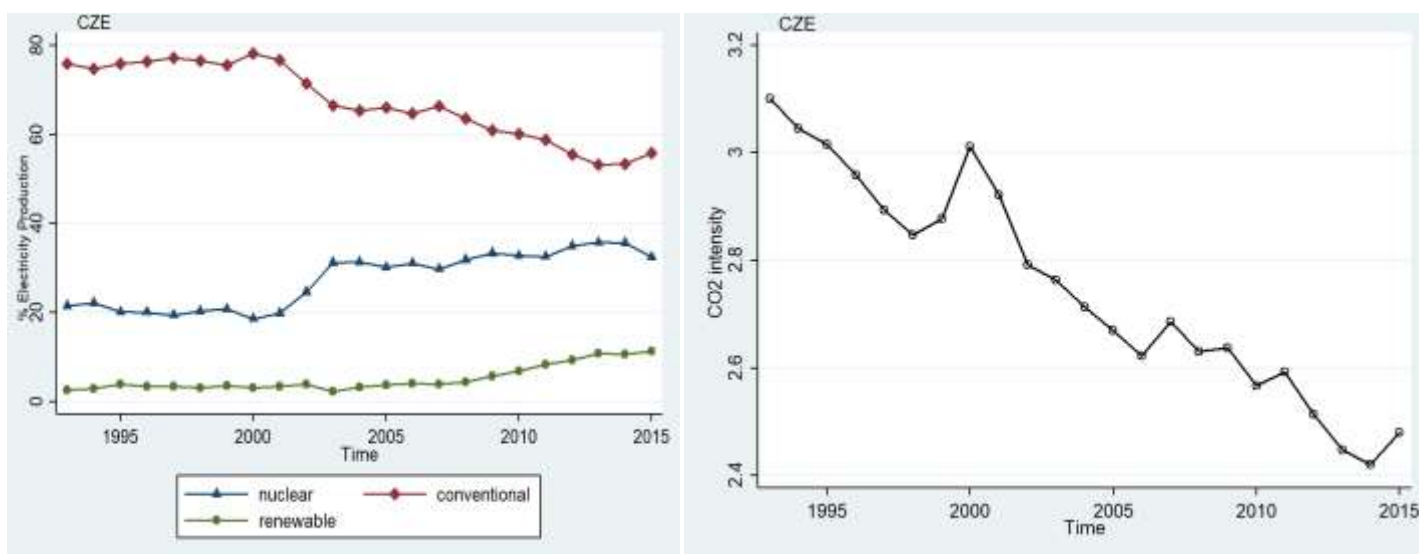
Διάγραμμα 11: Correlation between electricity production shares and CO2 intensity over time (1972-2015) - Sweden



Η επιτυχία της Σουηδίας στον τομέα της παραγωγής ενέργειας και της μείωσης των αερίων ρύπων που προκαλούνται από αυτή, έγκειται στο γεγονός ότι από πολύ νωρίς επένδυσε στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (κυρίως την υδροηλεκτρική) που μέχρι το 1980 υπερέβαινε το 60% της συνολικής παραγωγής. Επίσης, μέχρι το 1994 κατάφερε να αναπτύξει και την πυρηνική της βιομηχανία με παραγωγή που άγγιξε και το 52,2% της συνολικής (1991). Από εκείνο το σημείο και εξής, με εξαιρέσεις τα έτη 1992, 1996 και 2003, κατάφερε να υποκαταστήσει σχεδόν εξ ολοκλήρου τις συμβατικές πηγές ενέργειας (το ποσοστό παραγωγής έχει πέσει την τελευταία δεκαετία κάτω του 3%) με ένα μίγμα πυρηνικής και σε μεγαλύτερο πλέον βαθμό ανανεώσιμων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η πυρηνική βοήθησε τα μέγιστα στην πλήρη μετάβαση στις καθαρές μορφές ενέργειας την περίοδο 1975-1991 συμβάλλοντας στη μείωση της έντασης CO2 κατά 0,95 kg την ώρα που οι ανανεώσιμες είχαν πτωτικές τάσεις, όπως και στη συνέχιση της μείωσης αυτής (κατά 0,33 kg) την περίοδο 1997-2014 χάρη στη σταθεροποίηση του ποσοστού της πάνω από το 40% σε συνδυασμό με την άνοδο των ανανεώσιμων πηγών. (συντ. συσχ. %nuclear-CO2 intensity: -0.8471, %renewable-CO2 intensity: 0.7076)

ΤΣΕΧΙΑ

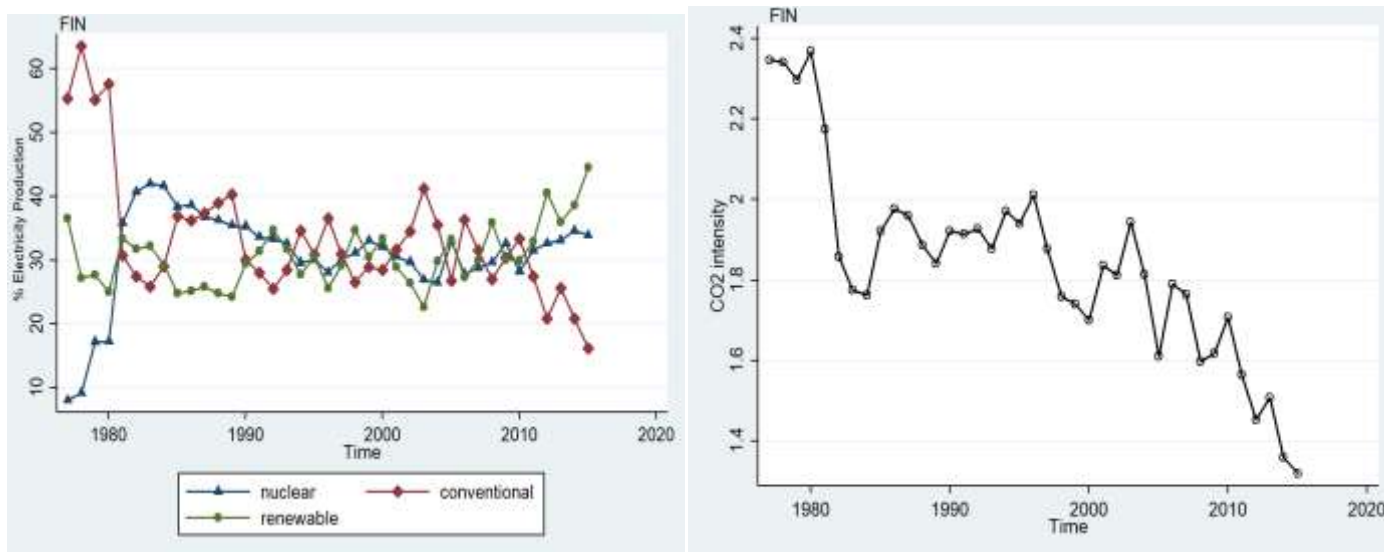
Διάγραμμα 12: Correlation between electricity production shares and CO2 intensity over time (1993-2015) – Czech Rep.



Η Τσεχία είναι ακόμα ένα κράτος-μέλος της ΕΕ που στηριζόταν από το 1993 (όταν και διασπάστηκε η Τσεχοσλοβακία) στις συμβατικές πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που μέχρι το 2002 υπερέβαινε το 70%. Αντίθετα το ποσοστό παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές μέχρι το 2009 δεν κατάφερε να ξεπεράσει το 5% οπότε η χώρα βασίστηκε κυρίως στην πυρηνική ενέργεια για τη μείωση της έντασης των αερίων ρύπων της. Αυτό το πετυχαίνει σε 2 περιόδους. Κατά την πρώτη (1993-1998) η ένταση CO2 μειώνεται κατά 0,25 kg έχοντας σταθερή ηλεκτροπαραγωγή από τα πυρηνικά της εργοστάσια πάνω από το 20%. Στη δεύτερη, από το 2001 έως το 2006, το ποσοστό αυτό αυξάνεται σταδιακά αγγίζοντας το 31,4% το 2004. Αυτό έχει ως συνέπεια μια κατακόρυφη μείωση της έντασης CO2 κατά 0,39 kg την ώρα που οι ανανεώσιμες πηγές παρουσίαζαν αυξομειώσεις στα ποσοστά τους. Από το 2008 και μετά αρχίζει μια σταδιακή άνοδος και στα ανανεώσιμα παράλληλα με αυτή των πυρηνικών με τα ποσοστά τους να αγγίζουν το 11,4% το 2015. Το συγκεκριμένο έτος, όμως παρά την άνοδο αυτή, η ένταση CO2 δείχνει να αυξάνεται κατά 0,06 kg καθώς μειώνεται κατά περίπου 3% το μερίδιο της πυρηνικής ενέργειας. (συντ. συσχ. %nuclear-CO2 intensity: -0.9224, %renewable-CO2 intensity: -0.8026)

ΦΙΝΛΑΝΔΙΑ

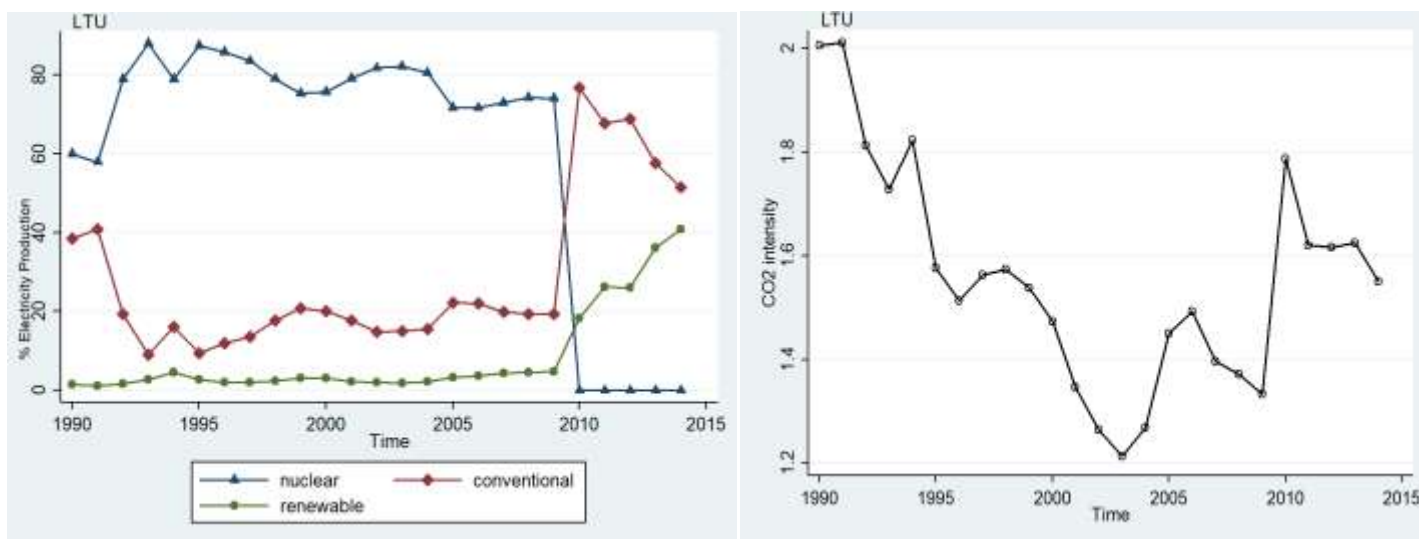
Διάγραμμα 13: Correlation between electricity production shares and CO2 intensity over time (1977-2015) - Finland



Όπως και η Σουηδία, η έταίρη σκανδιναβική χώρα Φινλανδία, επένδυσε από πολύ νωρίς στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε αρκετά μεγάλα για την εποχή ποσοστά που άγγιξαν και το 33,3% το 1981. Από τότε και στο εξής ξεκινάει μια ραγδαία ανάπτυξη της πυρηνικής βιομηχανίας της χώρας που υπερδιπλασιάζει τα ποσοστά ηλεκτροπαραγωγής της από πυρηνική ενέργεια μειώνοντας αυτά των ανανεώσιμων έως και κατά 9%. Μέχρι το 1984, η ένταση του διοξειδίου του άνθρακα έχει μειωθεί κατά 0,60 kg. Από το 1985 έως το 1989 υπήρξε μια ταυτόχρονη πτώση στα ανανεώσιμα και στα πυρηνικά με αποτέλεσμα μια μικρή αύξηση της έντασης κατά 0,12 kg. Το διάστημα 1989-1992, παρά την αύξηση των ποσοστών στις ανανεώσιμες κατά 10,5%, η υποχώρηση των πυρηνικών κατά 2,2% δε φάνηκε να σταματάει τις αυξητικές τάσεις της έντασης. Από το 1995 μέχρι και το 2010, με εξαίρεση κάποια έτη όπου υπερισχύει το ποσοστό παραγωγής από συμβατικές πηγές (1996, 2003, 2006), η χώρα διατήρησε ένα πλήρως διαφοροποιημένο ενεργειακό χαρτοφυλάκιο. Αυτό φαίνεται και διαγραμματικά καθώς με σταθερά τα ποσοστά των καθαρών πηγών ενέργειας, η καμπύλη της έντασης CO2 ταυτίζεται σε μεγάλο βαθμό με αυτή του ποσοστού ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικές πηγές. Το 2011 αρχίζει η σταδιακή ελάττωση του ποσοστού των συμβατικών, η σταθεροποίηση αυτού των πυρηνικών στο 31-34% και η επάνοδος των ανανεώσιμων, με το ποσοστό τους να φτάνει το 44,5% το 2015. Οι συντελεστές συσχέτισης πυρηνικών και ανανεώσιμων με ένταση διοξειδίου του άνθρακα είναι σχεδόν ίδιοι αποδεικνύοντας την πλήρη συμπληρωματικότητα των 2 πηγών στη συγκεκριμένη περίπτωση. (συντ. συσχ. %nuclear-CO2 intensity: -0.5548, %renewable-CO2 intensity: -0.5631)

ΛΙΘΟΥΑΝΙΑ

Διάγραμμα 14: Correlation between electricity production shares and CO2 intensity over time (1990-2014) - Lithuania



Κλείνοντας, αφήνουμε τελευταία την περίπτωση της Λιθουανίας όπου από το 1990 μέχρι και το 2009 το ποσοστό ηλεκτροπαραγωγής από πυρηνικά υπερέβαινε το 58% και σε αρκετές χρονιές ξεπέρασε ακόμα και το 80%. Να σημειωθεί ότι μέχρι να κλείσει το μοναδικό εργοστάσιο της λόγω πιέσεων από την ΕΕ, η ηλεκτρική ενέργεια ήταν ο βασικός τομέας εξαγωγών της χώρας. Όσο αναφορά την πρόοδο που σημειώθηκε στον τομέα της εντάσεως του διοξειδίου του άνθρακα, η οποία είναι σε επίπεδα σταθερά κάτω των 2 kg, η ραγδαία αύξηση του ποσοστού των πυρηνικών από το 58% το 1991 στο 83% το 1997 μείωσε την ένταση CO2 κατά 0,45 kg. Την περίοδο 1999-2003 η αύξηση της παραγωγής κατά 7 ποσοστιαίες μονάδες μείωσε εκ νέου την ένταση κατά 0,32 kg. Από το 2009 που κλείνει το εργοστάσιο σημειώνεται αύξηση της έντασης κατά 0,45 kg. Οι επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές φαίνεται να είναι ικανές να ισοσταθμίσουν την απώλεια του πυρηνικού σταθμού, αλλά μόνο μακροχρόνια. (συντ. συσχ. %nuclear-CO2 intensity: -0.2825, %renewable-CO2 intensity: 0.1162)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα γενικά συμπεράσματα της ανάλυσης καταδεικνύουν ότι στην πλειοψηφία των κρατών-μελών της Ένωσης, η πυρηνική ενέργεια έχει ίσο ή και μεγαλύτερο αντίκτυπο στη μείωση της έντασης του διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με βάση τους συντελεστές συσχέτισης που υπολογίστηκαν. Τα περιβαλλοντικά αποτελέσματα είναι άμεσα και διατηρούνται μακροχρόνια. Ακόμα, σε ορισμένες χώρες γίνεται εμφανής μακροχρόνια η ενεργειακή εξάρτησή τους από την πυρηνική ενέργεια, και η δυσκολία εξ ολοκλήρου της ενεργειακής μετάβασης αυτών στις ανανεώσιμες πηγές, ιδιαίτερα όσες είχαν επενδύσει από πολύ νωρίς σε αυτή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΥΨΗΛΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ

ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ

Η πυρηνική ενέργεια δέχεται κατά καιρούς σφοδρή κριτική από διάφορες περιβαλλοντικές οργανώσεις, όχι μόνο για τον κίνδυνο διαρροών ραδιενέργειας σε περίπτωση ατυχήματος (βλ. Chernobyl), αλλά και για τη διαχείριση των αποβλήτων που παράγονται από τις πυρηνικές μονάδες. Η προσεκτική διαχείριση των ροών αποβλήτων καθίσταται το κλειδί για την επίτευξη, κυρίως της μακροχρόνιας, περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Είναι γνωστό ότι όλες οι τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργούν απόβλητα, αλλά οι ποσότητες, οι κίνδυνοι που ενέχουν και οι τρόποι διαχείρισής τους, διαφέρουν κατά πολύ.

4.1. ΤΥΠΟΙ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Ραδιενεργά απόβλητα είναι ραδιενεργά υλικά σε αέρια, υγρή ή στερεά μορφή, για τα οποία δεν προβλέπεται ή δεν εξετάζεται περαιτέρω χρήση, και έχουν ταξινομηθεί ως ραδιενεργά απόβλητα. Η παραγωγή τους συνδέεται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε πυρηνικούς σταθμούς ή με μη σχετιζόμενες με την ηλεκτροπαραγωγή χρήσεις ραδιενεργών υλικών για ιατρικούς, ερευνητικούς, βιομηχανικούς και γεωργικούς σκοπούς.

Τα ραδιενεργά απόβλητα χωρίζονται σε πολύ χαμηλής (VLLW), χαμηλής (LLW), μέσης (ILW), και υψηλής (HLW) κλίμακας αναλόγως του φορτίου που εκπέμπουν. Τα πυρηνικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυτά που παράγουν την πλειοψηφία των αποβλήτων μέσης και υψηλής κλίμακας, τα οποία απαιτούν ψύξη και προστασία από φυσικά φαινόμενα.

Σύμφωνα με την έκθεση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, που παρουσιάστηκε στις Βρυξέλλες, το 2017, «σχετικά με την πρόοδο εφαρμογής της οδηγίας 2011/70/ΕΥΡΑΤΟΜ του Συμβουλίου και με τον κατάλογο αποθεμάτων ραδιενεργών αποβλήτων και αναλωμένων καυσίμων στο έδαφος της Κοινότητας και τις μελλοντικές προοπτικές», το εκτιμώμενο συνολικό απόθεμα ραδιενεργών αποβλήτων στο έδαφος της ΕΕ είναι 3.313.000 m³, εκ των οποίων περίπου το 70% έχει διατεθεί (2.316.000 m³) και περίπου το 30% είναι αποθηκευμένο (997.000 m³). Η βασική σύνθεση του συνολικού όγκου ραδιενεργών αποβλήτων είναι 74% απόβλητα χαμηλής ραδιενέργειας (LLW), 15 % απόβλητα πολύ χαμηλής ραδιενέργειας (VLLW), 10 % απόβλητα μέσης

ραδιενέργειας (ILW) και 0,2 % απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας (HLW). Τα ILW και HLW που παράγονται, αποθηκεύονται εντός ΕΕ κυρίως στα κράτη μέλη με πυρηνικά προγράμματα. [1]

Πίνακας 4: Εξέλιξη συνολικού όγκου ραδιενεργών αποβλήτων και αναλωμένων καυσίμων την περίοδο 2004-2013 στην ΕΕ (Εκθεση Ευρωπαϊκής Επιτροπής - SWD, 2017)

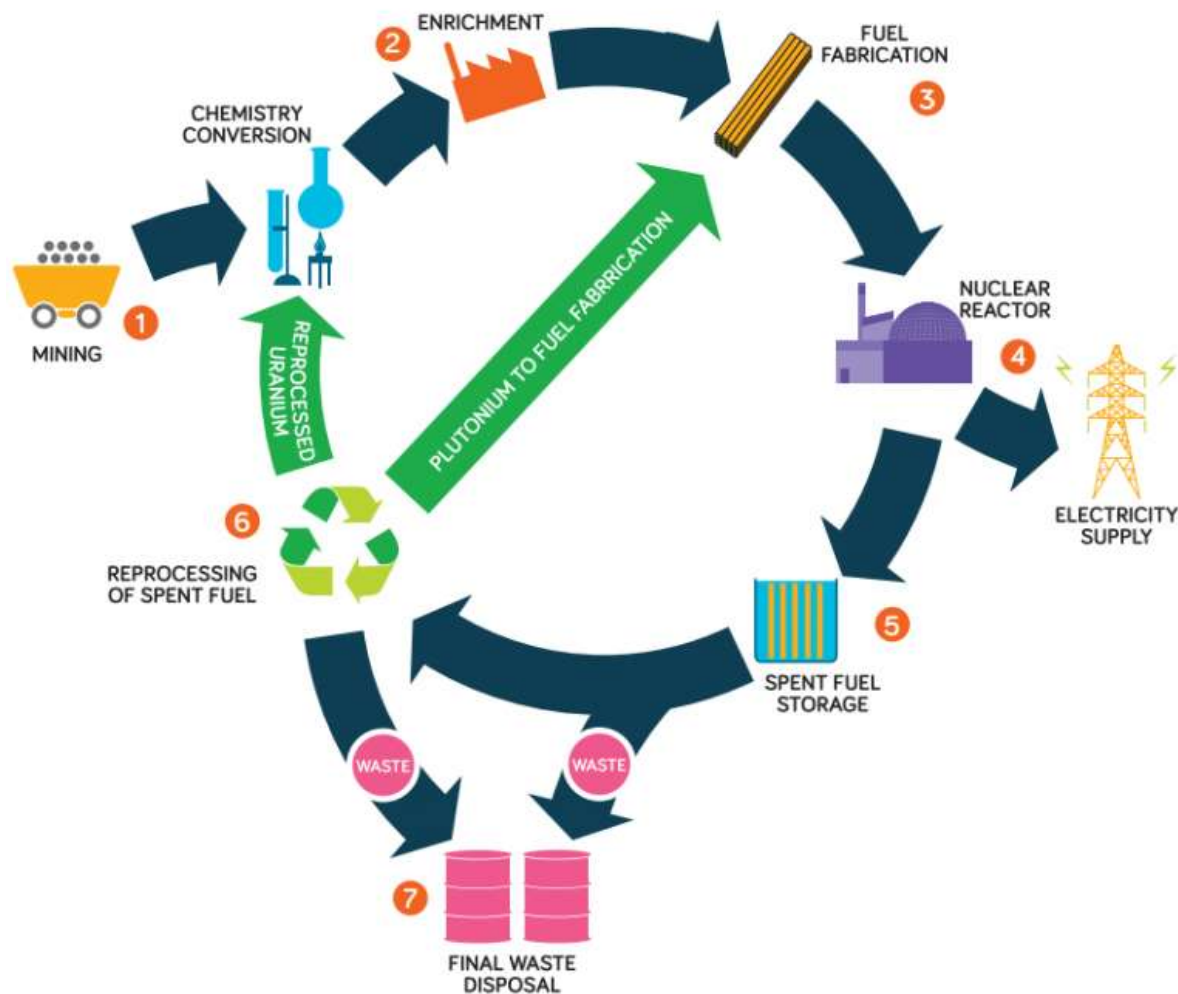
Κατηγορία αποβλήτων	Συνολική ποσότητα (m ³)			
	2004	2007	2010	2013
VLLW	210.000	280.000	414.000	516.000
LLW	2.228.000	2.435.000	2.356.000	2.453.000
ILW	206.000	288.000	321.000	338.000
HLW	5.000	4.000	5.000	6.000
	Συνολική ποσότητα (tHM)			
Αναλωμένα καύσιμα	38.100	44.900	53.300	54.300

4.2. ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Αναγνωρίζοντας το γεγονός ότι η ελαχιστοποίηση των αποβλήτων παίζει καθοριστικό ρόλο στη στρατηγική βιώσιμης διαχείρισής τους, έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες πάνω σε αυτόν τον τομέα τις τελευταίες δεκαετίες από τη Διεθνή Υπηρεσία Ατομικής Ενέργειας (IAEA). Ένα σημαντικό βήμα για την επίτευξη της εν λόγω ελαχιστοποίησης, είναι η ανακύκλωση και η επανάχρηση πολύτιμων υλικών και στοιχείων που ανακτώνται από τις ροές των πυρηνικών αποβλήτων. [2]

Η επαναχρησιμοποίηση καυσίμου επιτρέπει την ανάκτηση σημαντικής ποσότητας πλουτωνίου, το οποίο αργότερα αναμειγνύεται με ‘αποδυναμωμένο’ ουράνιο για την παραγωγή ενός νέου τύπου καυσίμου. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την εξαγωγή 25-30% επιπρόσθετης ενέργειας από το αρχικό μέταλλευμα ουρανίου και μειώνει τον όγκο των αποβλήτων υψηλού επιπέδου (HLW) κατά 85%. Τα εναπομείναντα HLW γίνονται λιγότερο επιβλαβή, χάνοντας τη ραδιενέργειά τους (χρόνο ημιζωής), στον ίδιο βαθμό με αυτόν του φυσικού μεταλλεύματος (περ. 9.000 χρόνια έναντι 300.000). [3]

Στην ΕΕ, λειτουργούν εγκαταστάσεις επανεπεξεργασίας πυρηνικών καυσίμων σε Βέλγιο, Γαλλία, Γερμανία, Ολλανδία, Ισπανία και Σουηδία κάτι τα οποία αναμένεται να αλλάξει μετά το 2020 καθώς η Γαλλία θα είναι το μόνο κράτος μέλος με βιομηχανική πολιτική εγχώριας επανεπεξεργασίας, ενώ ορισμένα άλλα κράτη μέλη αναθέτουν την επανεπεξεργασία των καυσίμων στο εξωτερικό. Η ανακύκλωση του ουρανίου και του παραγόμενου πλουτωνίου σε αυτές, είναι ένας τρόπος εξοικονόμησης περίπου 2.000 τόνων καυσίμου το χρόνο από την πρωτογενή παραγωγή. Πιο συγκεκριμένα σε Βέλγιο, Γαλλία, Γερμανία και Ελβετία έχουν παραχθεί και χρησιμοποιηθεί περισσότεροι από 8.000 τόνοι επανεπεξεργασμένου ουρανίου τα τελευταία χρόνια. [4]



Εικόνα 6: Ο κύκλος ζωής των πυρηνικών καυσίμων

Η Γαλλία, με τη μεγαλύτερη ηλεκτροπαραγωγή από πυρηνική ενέργεια στην Ένωση, έχει ανάγκη από 10.500 τόνους μη επεξεργασμένου (απεμπλουτισμένου) ουρανίου το χρόνο, εισάγοντας το 42% από τον Καναδά και το 30% από το Νίγηρα (σ.σ. ο οποίος από το 1900 μέχρι το 1958 ήταν γαλλική αποικία). Το υπόλοιπο 28% μπορεί να ικανοποιηθεί από ίδια αποθέματα και ανακυκλωμένα καύσιμα. Αυτό γιατί, ήδη από το ξεκίνημα του πυρηνικού της προγράμματος, έχει επιλέξει καύσιμο κλειστού κύκλου, το οποίο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, επιτρέπει την ανάκτηση ουρανίου και πλουτωνίου για επανάχρηση. Έτσι, μειώνονται τα απόβλητα υψηλού επιπέδου, γίνεται εξοικονόμηση καυσίμου και μείωση των εισαγωγών αυτού, τη στιγμή που παράγεται έως και 30% επιπρόσθετη ενέργεια. [5]

4.3. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Η αποθήκευση των πυρηνικών αποβλήτων εμπεριέχει ουσιαστικά δύο έννοιες. Την προσωρινή αποθήκευση, η οποία λαμβάνει χώρα καθόλη τη διάρκεια διαχείρισης αυτών, και την τελική αποθήκευση (εναπόθεση) η οποία γίνεται όταν δεν είναι πλέον εφικτή η ανακύκλωση – επανεπεξεργασία – επανάχρηση τους και η ραδιενέργεια που εκπέμπουν έχει μειωθεί σημαντικά (συνήθως ύστερα από 40-50 έτη). [6]

Συνήθως, η διάθεση των αποβλήτων χαμηλής και μεσαίας ραδιενέργειας γίνεται κοντά στην επιφάνεια. Είναι ευρέως αποδεκτή σε τεχνικό επίπεδο η άποψη ότι η διάθεση σε γεωλογικούς σχηματισμούς μεγάλου βάθους αποτελεί αυτή τη στιγμή την ασφαλέστερη και βιωσιμότερη επιλογή ως τελικό σημείο της διαχείρισης των αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας και των αναλωμένων καυσίμων που θεωρούνται απόβλητα. Τα κράτη μέλη της ΕΕ θα πρέπει να συμπεριλάβουν στις εθνικές τους πολιτικές τον σχεδιασμό και την υλοποίηση των επιλογών περί διάθεσης, χωρίς να θίγεται η αρμοδιότητά τους για τις αντίστοιχες πολιτικές τους όσον αφορά τη διαχείριση των αναλωμένων καυσίμων τους και των αποβλήτων τους χαμηλής, μεσαίας και υψηλής ραδιενέργειας. Επειδή η υλοποίηση και η ανάπτυξη της εγκατάστασης διάθεσης θα διαρκέσουν πολλές δεκαετίες, αρκετά προγράμματα αναγνωρίζουν ότι πρέπει να παραμείνουν ευέλικτα και προσαρμοστικά, προκειμένου π.χ. να ενσωματώνουν τις νέες γνώσεις σχετικά με τις συνθήκες της τοποθεσίας ή την ενδεχόμενη εξέλιξη του συστήματος διάθεσης. Οι δραστηριότητες που επιτελούνται βάσει της «Τεχνολογικής Πλατφόρμας για την Τελική Διάθεση σε Γεωλογικούς Σχηματισμούς» (IGD-TP) θα μπορούσαν να διευκολύνουν την πρόσβαση σε τεχνογνωσία και τεχνολογία στον τομέα αυτό. Προς τούτο, η δυνατότητα αντιστροφής και ανάκτησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τεχνική ανάπτυξη συστήματος διάθεσης. Ωστόσο, τα εν λόγω κριτήρια λειτουργίας και σχεδιασμού δεν θα πρέπει να υποκαταστήσουν μια σωστά σχεδιασμένη εγκατάσταση διάθεσης, με βάσιμους λόγους παύσης λειτουργίας. Χρειάζεται συμβιβαστική λύση, δεδομένου ότι η διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων και αναλωμένων καυσίμων βασίζεται στην πλέον προηγμένη επιστήμη και τεχνολογία (Παρ.23, Οδηγίας 2011/70/ΕΥΡΑΤΟΜ του Συμβουλίου της Ευρώπης). [7]

ΠΡΟΣΩΡΙΝΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ

Η προσωρινή αποθήκευση των πυρηνικών αποβλήτων γίνεται κατά κύριο λόγο στα ίδια τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας ή σε ειδικές εγκαταστάσεις (όπως το CLAB στη Σουηδία και το COVRA στην Ολλανδία). Τα απόβλητα διατηρούνται μέσα σε ειδικά στεγανά κυτία τα οποία στη συνέχεια βυθίζονται σε παγωμένο νερό (ύψους 7-12μ.). Οι εν λόγω 'πίσινες' είναι κατασκευασμένες από ένα παχύ στρώμα τσιμέντου ενισχυμένου με χαλύβδινη επένδυση και το μέγεθός τους καθορίζεται από την ποσότητα των αποβλήτων που θα παράξει η συγκεκριμένη μονάδα καθόλη τη διάρκεια λειτουργίας της.



Εικόνα 7: Οι εγκαταστάσεις επανεπεξεργασίας Orano La Hague στη Γαλλία, όπου από το 1976 έχουν αποθηκευτεί περισσότεροι από 34.000 τόνοι χρησιμοποιημένου καυσίμου (IAEA, 2019)

ΤΕΛΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ

Η επιλογή ενός μεγάλου γεωλογικού σχηματισμού για τη μόνιμη αποθήκευση (εναπόθεση) των πυρηνικών αποβλήτων που δεν επιδέχονται επανεπεξεργασία φαίνεται ότι είναι μια αρκετά αποτελεσματική λύση, για τα σημερινά δεδομένα. Η τοποθεσία που θα επιλεγεί για αυτό το σκοπό πρέπει να πληροί ή και να υπερβαίνει συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Αυτές είναι κατά κύριο λόγο, η ευημερία του πληθυσμού που διαβιώνει πλησίον των συγκεκριμένων αποθηκών και φυσικά η προστασία του περιβάλλοντος από τα ραδιενεργά απόβλητα για όσον καιρό χρειαστεί να παραμείνουν αποθηκευμένα. Επίσης, οι εν λόγω αποθήκες θα πρέπει να είναι ‘παθητικά’ ασφαλής, που σημαίνει ότι δε θα εξαρτώνται από ενεργή ανθρώπινη διαχείριση για να διατηρήσουν απομονωμένο το περιεχόμενό τους μακροχρόνια.

Άλλες προδιαγραφές που θα πρέπει να πληρούνται από τα σημεία τελικής αποθήκευσης είναι:

- Η περιοχή εγκατάστασης πρέπει να είναι αραιοκατοικημένη ή πιο ιδανικά ακατοίκητη
- Η αποθήκη πρέπει να χρησιμοποιεί πολλαπλά και ποικίλα στρώματα προστασίας και υλικά στεγανοποίησης για να εξασφαλιστεί το σύνολο της εγκατάστασης σε περίπτωση που υπάρξει βλάβη σε κάποιο από αυτά μεμονωμένα
- Η περιοχή στην οποία βρίσκεται η αποθήκη πρέπει να χαρακτηρίζεται από μηδενική σεισμική δραστηριότητα
- Ο γεωλογικός σχηματισμός πρέπει να είναι σταθερός μακροχρόνια και να μην επιτρέπει την πρόσμιξη των υπόγειων ρευμάτων νερού με αυτά της επιφάνειας

- Το βάθος του σχηματισμού να είναι τέτοιο ώστε να μην υπάρχει πιθανότητα κάποιας τυχαίας μελλοντικής παρείσδυσης από τον άνθρωπο
- Η αποθήκη να είναι διαχειρίσιμη με τα υπάρχοντα τεχνολογικά μέσα και να παρακολουθείται τακτικά μέχρι το τελικό σφράγισμά της

4.4. ΕΡΕΥΝΕΣ ΓΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΕΛΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

Η πλειοψηφία των κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχει ήδη ξεκινήσει τις διαδικασίες εύρεσης μιας ασφαλούς τοποθεσίας για την τελική αποθήκευση των ραδιενεργών αποβλήτων μέσου και υψηλού επιπέδου που παράγουν τα πυρηνικά τους εργοστάσια και οι μονάδες επαναχρησιμοποίησης. Κάποιες από αυτές τις έρευνες βρίσκονται σε αρκετά προχωρημένο στάδιο (Γερμανία, Σλοβακία, Ουγγαρία) και άλλες σε πιο πρώιμο (Ρουμανία, Τσεχία). Χώρες όπως η Σλοβενία, η Ισπανία, το Βέλγιο (σε συνεργασία με τον NWMO) και η Ολλανδία έχουν αποφασίσει να δημιουργήσουν τέτοιες αποθήκες μέσω βαθέων γεωτρήσεων ενώ η Σουηδία έχει υποβάλλει αίτηση για την έναρξη κατασκευής αποθετηρίου και αναμένεται η χορήγηση της άδειας. Η Γαλλία έχει ήδη επιλέξει την τοποθεσία (Meuse and Haute-Marne), περίπου 300 χλμ νοτιοανατολικά του Παρισιού όπου ο πληθυσμός δεν ξεπερνά τους 7 κατοίκους ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο. [8]

Βορειότερα, στη Φινλανδία έχει επιλεγεί η κατάλληλη τοποθεσία (v. Olkiluoto), δίπλα στο ομώνυμο εργοστάσιο, και οι εργασίες για τη δημιουργία του πρώτου μόνιμου αποθετηρίου HLW στον κόσμο (ONKALO) έχουν ξεκινήσει από το 2019, ύστερα από μια 15ετία προετοιμασίας και ερευνών και αναμένεται να ολοκληρωθούν το 2025 και η συνολική χωρητικότητα θα αγγίζει τους 6.500 τόνους. Το τελικό τούνελ που θα οδηγεί στο αποθετήριο θα έχει βάθος περί τα 450 μ. μέσα στο στρώμα του βράχου χωρίς να έχει την παραμικρή επαφή με τα υπόγεια ρεύματα νερού. Το συνολικό μήκος του υπόγειου δικτύου θα αγγίζει τα 42 χλμ.

Οι ράβδοι ουρανίου θα τοποθετούνται σε ένα διπλό δοχείο του οποίου το εσωτερικό θα περιέχει χυτοσίδηρο και το εξωτερικό από χαλκό για να μην επιτρέπεται η διάβρωση των υλικών. Στη συνέχεια τα δοχεία θα τοποθετηθούν σε κάθετους θύλακες βάθους 6-8 μ. μέσα στο βράχο περίπου 450 μ κάτω από την επιφάνεια της γης. Ύστερα, οι θύλακες καλύπτονται από ένα μείγμα μπετόν και αργίλου που θα λειτουργήσει ως επιπρόσθετο μέτρο ασφαλείας για να αποφευχθεί οποιαδήποτε διαρροή. Τέλος, όταν ολοκληρωθεί η αποθήκευση και έχει καλυφθεί η χωρητικότητα η εγκατάσταση σφραγίζεται για να αποτραπεί η είσοδος επιφανειακών υδάτων ή ανθρώπων. [9]

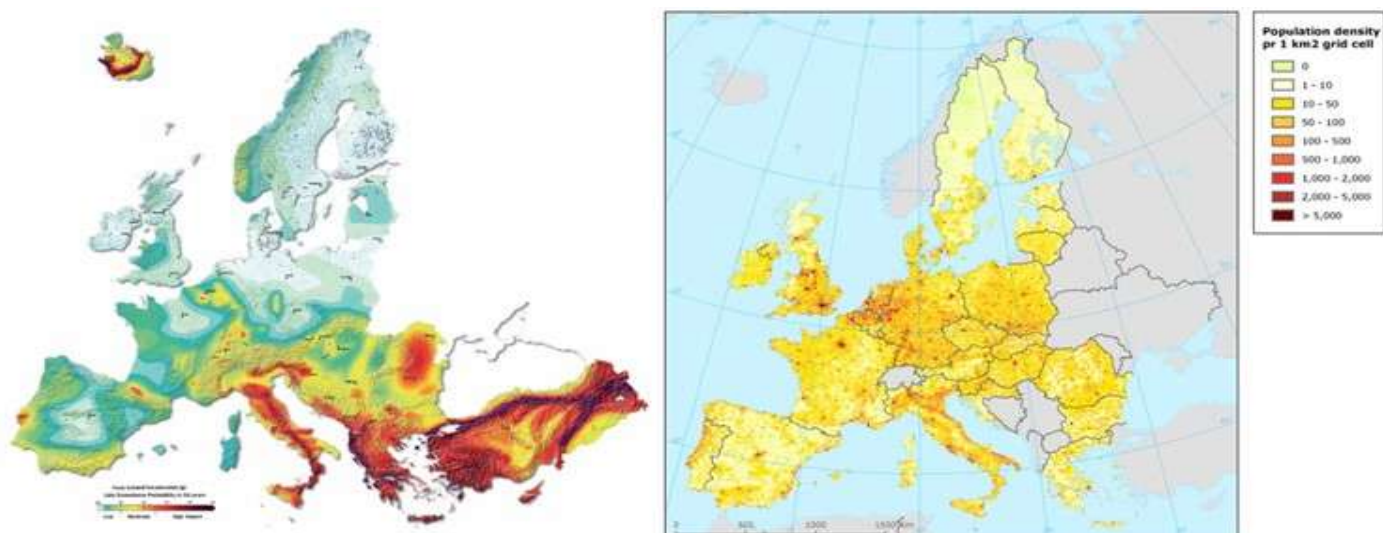


Εικόνα 7: Η εγκατάσταση μόνιμης εναπόθεσης ραδιενεργών αποβλήτων 'ONKALO' στη νήσο Oikiluoto της Φινλανδίας (Πηγή: researchgate.net)

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, γίνονται ενέργειες μέσω του project LUCOEX, να λειτουργήσουν 3 μόνιμα αποθετήρια εντός της ΕΕ μέσα στο 2025 ενώ τα εδάφη των σκανδιναβικών κρατών-μελών κρίνονται αρκούντως ιδανικά για αυτό το εγχείρημα λόγω της σταθερής γεωμορφολογίας τους. [10]

Όπως προαναφέρθηκε σημαντικότεροι παράγοντες για την επιλογή ενός σημείου τελικής εναπόθεσης ραδιενεργών αποβλήτων, εκτός από τη μορφολογία και τη σταθερότητα του εδάφους, είναι η πυκνότητα της σεισμικής δραστηριότητας αλλά και του πληθυσμού της περιοχής. Με βάση τους παρακάτω χάρτες γίνονται εμφανή έστω και κατά προσέγγιση κάποιες περιοχές εντός των ορίων της Ευρωπαϊκής Ένωσης όπου θα μπορούσαν να κατασκευαστούν και να λειτουργήσουν εγκαταστάσεις παρόμοιες με αυτές της Φινλανδίας και της Γαλλίας.

Κράτη-μέλη της κεντρικής και (κυρίως) της βόρειας Ευρώπης δύνανται να δημιουργήσουν εγκαταστάσεις στις οποίες θα αποθηκεύονται μόνιμα τα μελλοντικά παραχθέντα ραδιενεργά απόβλητα του ευρωπαϊκού στόλου. Πιο συγκεκριμένα, η Σουηδία και η Φινλανδία στη σκανδιναβική χερσόνησο που χαρακτηρίζεται από ελάχιστες σεισμικές δραστηριότητες αλλά είναι και αραιοκατοικημένη στο μεγαλύτερο τμήμα της. Η νοτιοανατολική Ευρώπη καθίσταται απαγορευτική για ένα τέτοιου είδους εγχείρημα εξαιτίας της πυκνής σεισμικής δραστηριότητας. Αντίθετα, στην κεντρική Ευρώπη διακρίνεται μια έκταση που πληροί τα 2 κύρια κριτήρια, μεταξύ Γερμανίας και Πολωνίας καθώς και στην κεντρική Γαλλία όπου ήδη έχει γίνει επιλογή της εγκατάστασης (Meuse/Haute Marne). Τέλος στα νοτιοδυτικά στην Ιβηρική χερσόνησο παρατηρείται ακόμα μια περιοχή στην κεντρική Ισπανία γύρω από την πρωτεύουσα Μαδρίτη (ειδικότερα στο βορρά υπάρχουν η Κεντρική και η Ιβηρική οροσειρά των οποίων η μορφολογία και η σταθερότητα του πετρώματος ενδείκνυνται για δημιουργία εγκαταστάσεων μόνιμης αποθήκευσης ραδιενεργών αποβλήτων).

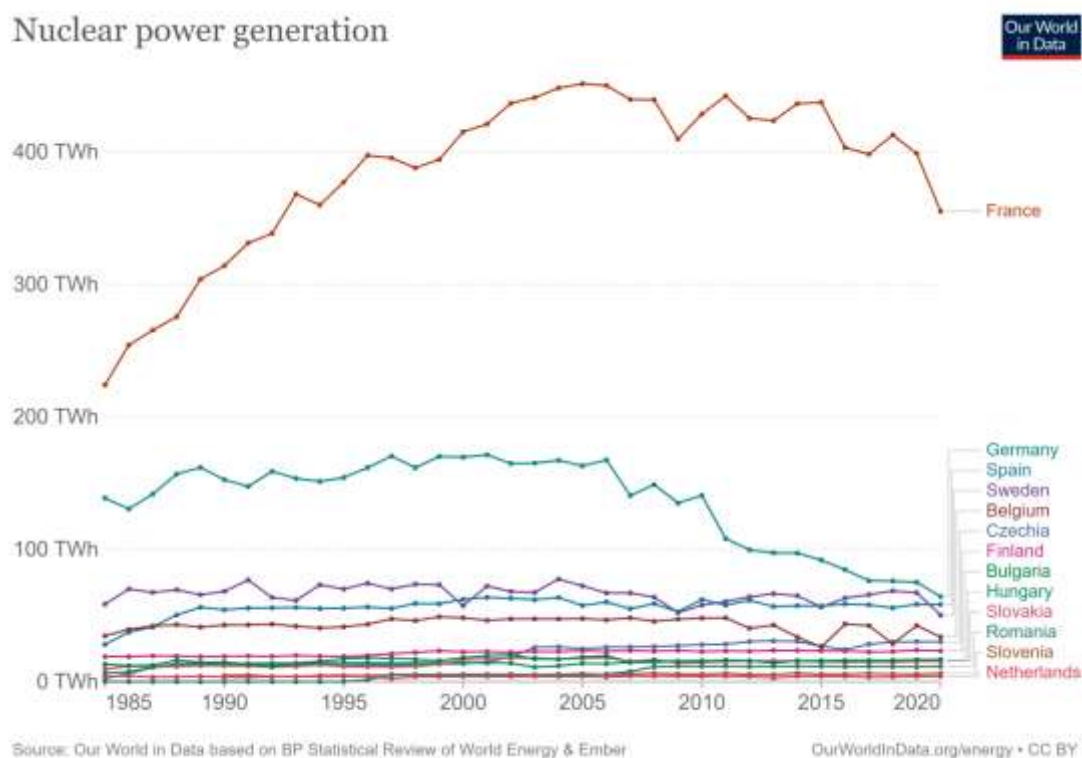


Εικόνα 8: Χάρτης πυκνότητας σεισμικών δραστηριοτήτων στην ΕΕ (αριστερά) και Χάρτης πληθυσμιακής πυκνότητας ανά km² (Δεξιά)
(Πηγές: EU SHARE Project, 2012 και European Environmental Agency, 2013)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΕ

ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ, ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ

Με τον σταδιακό παροπλισμό αρκετών πυρηνικών μονάδων στην Ευρωπαϊκή Ένωση τις επόμενες δεκαετίες, με τα πιο πολλά κράτη-μέλη να σχεδιάζουν μια phase-out ενεργειακή πολιτική (Βέλγιο, Γερμανία, Ισπανία, Ολλανδία) και τις νέες επενδύσεις στον συγκεκριμένο τομέα να είναι μειωμένες (Γαλλία, Σλοβενία, Σλοβακία), μια από τις πιο καθαρές πηγές ενέργειας κινδυνεύει να παραγκωνιστεί με ό,τι αυτό συνεπάγεται για την κλιματική αλλαγή και τις εκπομπές ρύπων.



Εικόνα 9: Η πορεία της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικά εργοστάσια στην ΕΕ από το 1985 μέχρι σήμερα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται ορισμένοι τύποι νέων αντιδραστήρων που δύνανται να αντικαταστήσουν τους υπάρχοντες πυρηνικούς εφόσον χρειαστεί καθώς και προτάσεις αναθεώρησης των θεσμικών πλαισίων της ΕΕ όσο αναφορά τη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων εντός των ορίων της Ένωσης.

5.1. ΝΕΟΙ ΤΥΠΟΙ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ

ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΕΣ 4^{ης} ΓΕΝΙΑΣ (GENERATION IV REACTORS)

Το 2001 στις ΗΠΑ συγκροτείται το Generation IV International Forum από το αμερικανικό Υπουργείο Ενέργειας. Το συγκεκριμένο φόρουμ αφορά τις χώρες στις οποίες η πυρηνική ενέργεια παίζει σημαντικό ρόλο και θα συνεχίζει να παίζει και μελλοντικά. Στον καταστατικό χάρτη ανάμεσα στις ιδρυτικές χώρες όπως η ΗΠΑ, η Ιαπωνία, ο Καναδάς και το Ηνωμένο Βασίλειο βρίσκεται και η Γαλλία. Αργότερα μέσω των ερευνητικών προγραμμάτων της EURATOM, προστέθηκαν και τα υπόλοιπα μέλη της ΕΕ με πυρηνικά προγράμματα. Ο σκοπός του συγκεκριμένου εγχειρήματος ήταν ο διαμοιρασμός R&D μεταξύ των χωρών-μελών, για την ανάπτυξη ενός νέου και καινοτόμου αντιδραστήρα. [1]

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι διαφορετικοί τύποι αντιδραστήρων 4^{ης} γενιάς που βρίσκονται υπό ανάπτυξη από το GIF.

Πίνακας 5: Generation IV Reactors Under Development (GIF - Technology roadmap update for Gen. IV nuclear energy systems, 2014)

	Ψυκτικό	Θερμοκρασία (°C)	Πίεση	Καύσιμο	Κύκλος Καυσίμου	Ισχύς (MWe)
Gas-cooled fast reactors	Helium	850	Υψηλή	U-238	Κλειστός	1200
Lead-cooled fast reactors	Lead/Pb-Bi	480-570	Χαμηλή	U-238	Κλειστός	300-1200
Molten salt fast reactors	Fluoride salts	700-800	Χαμηλή	UF in salt	Κλειστός	1000
Sodium-cooled fast reactors	Sodium	500-550	Χαμηλή	U-238/MOX	Κλειστός	600-1500
Supercritical water-cooled reactors	Water	510-625	Πολύ υψηλή	UO ₂	Ανοιχτός/ κλειστός	1000-1500
Very high temperature gas reactors	Helium	900-1000	Υψηλή	UO ₂	Ανοιχτός	250-300

Gas-cooled fast reactor (GFR): Παρόλο που η τεχνολογία του συγκεκριμένου αντιδραστήρα μελετάται από το 1970, δεν έχει κατασκευαστεί ακόμα κανένας τέτοιου τύπου. Τα τελευταία χρόνια με πρωτοβουλία της EYPATOM γεννήθηκε το project Allegro, με τη συνεργασία των V4G4 στην Ανατολική Ευρώπη και της Γαλλικής CEA, όπου σχεδιάζεται ένας πειραματικός GFR αντιδραστήρας ισχύος 75 MWt. Το project αναμένεται να ολοκληρωθεί το 2026. Οι χώρες τις ΕΕ που έχουν εκδηλώσει ενδιαφέρον για τη ανάληψη του project είναι η Τσεχία, η Ουγγαρία και η Σλοβακία.

Molten salt reactor (MSR): Θεωρείται από τους πιο βιώσιμους πυρηνικούς αντιδραστήρες όσο αναφορά την αντίδραση που συντελείται, τη διαχείριση του καυσίμου που χρησιμοποιεί και την ασφάλεια. Η τεχνολογία του ερευνάται ήδη από το 1960 στις ΗΠΑ ως η κύρια εναλλακτική των συμβατικών αντιδραστήρων και ένας πρωτότυπος MSR τέθηκε σε λειτουργία για 4 έτη. Για τον συγκεκριμένο τύπο αντιδραστήρα, δεν υπάρχουν ακόμα συμφωνίες κατασκευής, όμως έχει υπογραφεί ένα υπόμνημα μεταξύ των μελών του GIF προκειμένου να επιτραπεί η ανταλλαγή R&D πόρων. Σύμφωνα με το GIF, η φάση έρευνας και ανάπτυξης αναμένεται να ολοκληρωθεί το 2025.

Sodium-cooled fast reactor (SFR): Οι SFR αντιδραστήρες, ξεκίνησαν να αναπτύσσονται από το '80 στη Ρωσία οπότε και συνδέθηκε στο δίκτυο ο BN-600 στο Beloyarsk. Ο συγκεκριμένος τύπος συνδυάζει μεγάλη ενεργειακή απόδοση, χαμηλή πίεση και επίσης χαμηλά επίπεδα ψύξης. Τα μέλη του GIF το 2011 υπέγραψαν συμφωνία (Framework Agreement) για την εκκίνηση project που αφορούν τη βελτίωση του συγκεκριμένου πειραματικού αντιδραστήρα.

Lead-cooled fast reactor (LFR): Η τεχνολογία του συγκεκριμένου τύπου αντιδραστήρα προέρχεται από αυτή των πυρηνικών υποβρυχίων και δεν έχει δοκιμαστεί σε μεγάλη κλίμακα. Το GIF έχει προτείνει η εκκίνηση των ερευνών να γίνει από τους πειραματικούς αντιδραστήρες STAR των ΗΠΑ και LSPR της Ιαπωνίας, Παράλληλα, παρόμοια projects τρέχουν και στην ΕΕ όπως τα ALFRED (σε συνεργασία Ιταλίας-Ρουμανίας) και MYRRHA (Βέλγιο). [2]

SMRs (SMALL MODULAR REACTORS)

Ένα ακόμα καινοτόμο είδος πυρηνικού αντιδραστήρα που αναπτύσσεται είναι ο Small Modular Reactor ή εν συντομία SMR. Σκοπός της δημιουργίας του συγκεκριμένου μικροαντιδραστήρα (1-20 MWe) είναι η μείωση του κόστους κεφαλαίου και του χρόνου κατασκευής, η αύξηση των επιπέδων ασφαλείας αλλά και η ευελιξία τους να συνδέονται και να λειτουργούν αυτόνομα σε κάθε δίκτυο και περιοχή. Οι SMRs χαρακτηρίζονται ως εξελιγμένοι αντιδραστήρες που μπορούν να φτάσουν τα 300 MWe σε ισχύ. Κάποιοι SMRs έχουν κατασκευαστεί για να παράγουν σχετικά μικρά ποσά ενέργειας, ακόμα και μερικές μέρες μετά την εγκατάστασή τους, για να καλύψουν πολύ συγκεκριμένες ανάγκες όπως βιομηχανικές ζώνες, απομακρυσμένες και αραιοκατοικημένες περιοχές χωρίς άμεση πρόσβαση στο κύριο δίκτυο ηλεκτρισμού

αλλά και περιοχές οι οποίες πρόσφατα επλήγησαν από κάποια φυσική καταστροφή (υποστήριξη νοσοκομειακών μονάδων, ασφάλιση αποθεμάτων καθαρού νερού, κλπ).

Στα θετικά των μικροαντιδραστήρων έρχεται να προστεθεί και η μειωμένη ανάγκη ανεφοδιασμού καυσίμου, το οποίο είναι το κύριο ζήτημα των γεννητριών πετρελαίου ή ντίζελ που χρησιμοποιούνται στις απομακρυσμένες περιοχές ή σε περιπτώσεις ανάγκης. Συγκεκριμένα, το μοντέλο SEALER που αναπτύσσεται στη Σουηδία, έχει ισχύ 3MW και περίοδο ανεφοδιασμού που αγγίζει τα 30(!) έτη. Η μέγιστη ισχύς και η περίοδος ανεφοδιασμού διαφέρει από μοντέλο σε μοντέλο (τα περισσότερα αναπτύσσονται στις ΗΠΑ) αλλά κατά μέσο όρο υπολογίζονται περίπου στα 25 MWe και 11 έτη αντίστοιχα.

Όσο αναφορά τα θέματα ασφαλείας και τον περιορισμό διαρροών, οι μικροαντιδραστήρες έχουν μικρότερες απαιτήσεις από τους αντίστοιχους μεγαλύτερους συμβατικούς. Αυτό οφείλεται στην μικρότερη πίεση λειτουργίας του συστήματος (low-pressure system) και στις μειωμένες πιθανότητες συντέλεσης χημικών αντιδράσεων.

Πλέον, οι έρευνες για τους SMRs εστιάζονται κυρίως στον τομέα της διαθεσιμότητας του καυσίμου HALEU (High-Assay Low-Enriched Uranium) καθώς οι συγκεκριμένοι αντιδραστήρες λειτουργούν με εμπλουτισμένο μέχρι 5% ουράνιο-235, το οποίο δεν είναι ακόμα ευρέως παραγόμενο. [3]

ΤΟ ΘΟΡΙΟ ΩΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟ ΚΑΥΣΙΜΟ

Η χρήση θορίου (Th) στην πρωτογενή παραγωγή ενέργειας ήταν μια δελεαστική εναλλακτική για αρκετά χρόνια. Σε αυτό συνέβαλε η αφθονία του στη φύση, η οποία είναι 3 φορές μεγαλύτερη από αυτή του ουρανίου, και οι ιδιότητές του που επιτρέπουν την εύκολη ανακύκλωση του και την πρόσμιξη με άλλους τύπους καυσίμων (MOX). [4]

Στην ΕΕ, οι μόνες χώρες με σημαντικά κοιτάσματα θορίου, σύμφωνα με έκθεση του 2016, είναι η Σουηδία και η Φινλανδία, κάτι το οποίο σημαίνει ότι σε περίπτωση επιλογής του συγκεκριμένου καυσίμου για τη λειτουργία των αντιδραστήρων, αυτό θα είναι και πάλι εισαγόμενο, όπως το ουράνιο. [5]

Τα θόριο, έχει προταθεί ως εναλλακτικό καύσιμο για τους εξής λόγους:

- Απορροφά νετρόνια και παράγει U-233, το οποίο αργότερα μπορεί να διαχωριστεί και να επαναχρησιμοποιηθεί μεγαλώνοντας τον κύκλο του καυσίμου
- Δημιουργεί μικρότερο όγκο ραδιενεργών αποβλήτων με μικρότερο χρόνο ημιζωής
- Τα απόβλητα που δημιουργούνται, περιέχουν λιγότερα προϊόντα μεταστοιχείωσης (transuranic elements)
- Προσφέρει διαφοροποίηση στον τύπο καυσίμου
- Η χρήση του ενέχει μικρότερο κίνδυνο διαρροών ραδιενέργειας στο περιβάλλον μακροχρόνια [6]

Παρά το ότι διενεργούνται μελέτες πάνω στη χρήση θορίου ως πυρηνικό καύσιμο τα τελευταία 50 χρόνια από χώρες όπως η Γαλλία, η Γερμανία, η Ολλανδία, το Βέλγιο, η Σουηδία και πολλές ακόμα εκτός ΕΕ, δεν έχουν την ίδια ένταση με αυτές περί ουρανίου και ουρανίου-πλουτωνίου. Αυτό συμβαίνει, γιατί δεν προβλέπεται έλλειψη αποθεμάτων ουρανίου βραχυχρόνια ή κάποια σημαντική αύξηση στην τιμή του.

5.2. ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΘΕΣΜΙΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ

Καθίσταται πλέον σαφές, ότι για να επιτευχθούν οι όποιοι περιβαλλοντικοί στόχοι που έχουν βάλει τα κράτη-μέλη της ΕΕ, πρέπει να υπάρξει μια σταθερή πολιτική όσο αναφορά της πυρηνικής, ως μια καθαρή μορφή ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι κάθε χώρα ξεχωριστά οφείλει να υποστηρίζει σταθερά την απόφασή της να συνεχίσει να συμπεριλαμβάνει στο ενεργειακό χαρτοφυλάκιο της την πυρηνική ενέργεια, ή ακόμα και αν θέλει να εισέλθει στο συγκεκριμένο γκρουπ κρατών τα επόμενα χρόνια. Με αυτόν τον τρόπο η Ευρωπαϊκή Ένωση μπορεί να βοηθήσει στην επίτευξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης 7.A και 7.B των Ηνωμένων Εθνών, οι οποίοι προσβλέπουν στην ελεύθερη πρόσβαση σε τεχνολογίες και επενδύσεις καθαρής ενέργειας και στην επέκταση και αναβάθμιση των ενεργειακών υπηρεσιών των υπό ανάπτυξη χωρών του υπόλοιπου κόσμου.

ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

Οι νέοι πυρηνικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας κατά κανόνα κατασκευάζονται χωρίς επιδοτήσεις, πράγμα που αποτελεί ένδειξη για το ότι η πυρηνική ενέργεια θεωρείται όλο και περισσότερο ανταγωνιστική. Η τάση αυτή αποτελεί αλλαγή από την παλαιότερη πρακτική σε αρκετές χώρες της ΕΕ. Στη Φινλανδία, για παράδειγμα, ο νέος πυρηνικός σταθμός παραγωγής ενέργειας χρηματοδοτείται από ιδιωτικές πηγές. Η έλλειψη κρατικών και, στην προκειμένη περίπτωση, ευρωπαϊκών κονδυλίων και επιδοτήσεων, ρίχνει όλο το βάρος της επένδυσης στους ιδιώτες, οι οποίοι βλέποντας τα χρονοδιαγράμματα της κατασκευής των εργοστασίων να παρατείνονται και τις άδειες να καθυστερούν, αποθαρρύνονται. Δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις κατά τις οποίες έχει ματαιωθεί η κατασκευή ενός πυρηνικού σταθμού γι' αυτό το λόγο (Belene – Βουλγαρία, Stendal – Γερμανία, R4 – Σουηδία κ.α.). [7]

Μια ακόμα σημαντική πολιτική που πρέπει να ακολουθήσουν τα κράτη-μέλη που σκοπεύουν να εγκαταστήσουν πυρηνικές μονάδες στα εδάφη τους, είναι οι εκστρατείες ευαισθητοποίησης των πολιτών σε περιβαλλοντικά ζητήματα και η πολύπλευρη ενημέρωση σχετικά με τους αυστηρούς κανόνες ασφαλείας που διέπουν τη λειτουργία ενός πυρηνικού εργοστασίου. Έτσι θα αποφευχθούν περιπτώσεις ματαίωσης κατασκευής ή ακόμα και μη λειτουργίας ήδη κατασκευασμένου εργοστασίου όπως έγινε στην Αυστρία το 1978, όπου μετά από δημοψήφισμα, αποφασίστηκε να μην τεθεί ποτέ σε λειτουργία το εργοστάσιο στο Zwentendorf.

Εν κατακλείδι, κάποιες προτάσεις για την ελαχιστοποίηση του επενδυτικού ρίσκου κατασκευής ενός πυρηνικού εργοστασίου είναι οι εξής:

- Η χρήση απλών και αποδεδειγμένα ασφαλών σχεδίων (βάσει ενός ήδη επιτυχημένα σχεδιασμένου και λειτουργικού σταθμού)
- Η πρόσληψη έμπειρου εργατικού δυναμικού (ή ακόμα και η επιμόρφωση εργατών στο συγκεκριμένο τομέα)
- Η προσεκτική μελέτη των αναφορών της ΙΑΕΑ και των λοιπών φορέων
- Η συνεχής επικοινωνία και συνεργασία με τις εκάστοτε ρυθμιστικές αρχές ενέργειας
- Η εξασφάλιση της απρόσκοπτης λειτουργίας της εφοδιαστικής αλυσίδας
- Η εναρμόνιση των εθνικών προσεγγίσεων όσον αφορά τη διαχείριση των ταμείων παροπλισμού, προκειμένου να εξασφαλιστεί η διάθεση επαρκών πόρων
- Η εξασφάλιση μεγαλύτερης διαθεσιμότητας δανείων EURATOM, υπό την προϋπόθεση της αναθεώρησης των ανωτάτων ορίων σύμφωνα με τις ανάγκες της αγοράς, όπως ήδη πρότεινε η Ευρωπαϊκή Επιτροπή

ΤΟΜΕΑΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Όσο αναφορά τη διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων, τα κράτη-μέλη οφείλουν να έρθουν σε συνεννόηση μεταξύ τους ώστε να γίνουν ορισμένες τροποποιήσεις της συνθήκης EURATOM. Συγκεκριμένα, αν κάποια χώρα-μέλος της ΕΕ που παράγει ραδιενεργά απόβλητα άλλα δε δύναται ή δε σχεδιάζει να κατασκευάσει μόνιμο αποθετήριο για μακροχρόνια αποθήκευσή τους (Βουλγαρία, Ρουμανία κ.α.) να έρχεται σε συμφωνία με άλλη χώρα-μέλος ή χώρα εκτός ΕΕ, η οποία έχει τις κατάλληλες εγκαταστάσεις, να εξάγει και να αποθηκεύει εκεί τα ραδιενεργά απόβλητα υψηλού κινδύνου, ίσως με κάποιες πρόσθετες οικονομικές επιβαρύνσεις για τη χώρα εξαγωγέα (πρόταση τροποποίησης άρθρου 4, παρ.4 οδηγίας 2011/70/EURATOM).

Σχετικά με τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων και αναλωμένων καυσίμων, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή είναι έτοιμη να υποστηρίξει τα κράτη-μέλη στην αξιολόγηση των οικονομικών, νομικών και κοινωνικών επιπτώσεων των κοινών αποθετηρίων, επειδή η κοινή χρήση εγκαταστάσεων για τη διαχείριση αναλωμένων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων, καθώς και των εγκαταστάσεων διάθεσης, είναι δυνητικά επωφελής, ασφαλής και οικονομικά αποδοτική επιλογή. Ακόμα, αναγνωρίζει ότι χρειάζονται ακόμη πολλά για να διασφαλισθεί η ασφαλής και υπεύθυνη μακροπρόθεσμη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων και των αναλωμένων καυσίμων. Εν προκειμένω, οι περιοδικές διεθνείς αξιολογήσεις των εθνικών προγραμμάτων, πλαισίων και των αρμόδιων ρυθμιστικών αρχών από ομότιμους είναι μεγάλης σημασίας για την οικοδόμηση εμπιστοσύνης και αξιοπιστίας των ενδιαφερόμενων μερών όσον αφορά τη διαχείριση αυτών των υλικών εντός της ΕΕ. [8]

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

Με προγράμματα όπως το European Nuclear Education Network, το οποίο συμβάλλει στη μαθησιακή και ερευνητική σύμπραξη των κρατών-μελών της ΕΕ, θα επιτραπεί σε σπουδαστές από όλη την Ευρώπη να αποκτήσουν εξειδικευμένες γνώσεις στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας και των συναφών τεχνολογιών. Γι αυτό θα πρέπει να δοθεί μεγαλύτερο βάρος στη χρηματοδότηση τέτοιων πρότζεκτ από προγράμματα όπως το νέο Horizon 2021-2027.

Ακολουθώντας, κρίνεται επιβεβλημένη η ενδοκοινοτική, και όχι μόνο, συνεργασία σε επίπεδο R&D με τα κράτη-μέλη, τα οποία έχουν πολυετή εμπειρία πάνω στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας, να διαμοιράζονται τη γνώση και τις νέες τεχνολογίες πάνω στον τομέα της ασφάλειας και της βιώσιμης διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων, με τα νεοεισελθόντα μέλη στον τομέα αυτό, αλλά και αυτά που χρησιμοποιούν παρωχημένες και επισφαλείς για την εποχή τεχνολογίες (Gen. II Reactors). Με δεδομένο ότι οι περισσότερες χώρες στην ΕΕ διαθέτουν αυτή τη μακροχρόνια εμπειρία (Γαλλία, Σουηδία, Φινλανδία, Βέλγιο, Τσεχία, Ισπανία και Γερμανία λειτουργούν επιτυχώς πυρηνικούς αντιδραστήρες από τη δεκαετία του '70), μπορεί να ικανοποιηθεί ακόμα και ο στόχος βιώσιμης ανάπτυξης 17.7.1 των Ηνωμένων Εθνών ο οποίος προσβλέπει στην αναζωογόνηση της παγκόσμιας συνεργασίας για την επίτευξη της ενεργειακής βιωσιμότητας μέσω νέων τεχνολογιών.

Προκειμένου να οριστικοποιηθούν και να βελτιωθούν οι προτάσεις, η συζήτηση θα πρέπει να επικεντρωθεί κυρίως στις ακόλουθες πτυχές:

1. αναγνώριση κοινών επιπέδων αναφοράς πυρηνικής ασφάλειας που θα πρέπει να εφαρμόζονται στην ΕΕ, χρησιμοποιώντας την εκτεταμένη εμπειρία των εθνικών αρχών πυρηνικής ασφάλειας των κρατών μελών
2. συγκρότηση ομάδας υψηλού επιπέδου για την πυρηνική ασφάλεια και την προστασία με εντολή τη σταδιακή ανάπτυξη της κοινής κατανόησης και ενδεχομένως, επιπλέον ευρωπαϊκών κανόνων για την πυρηνική ασφάλεια και προστασία
3. ώθηση στη διεθνή συνεργασία, ιδίως μέσω στενότερης συνεργασίας με τον ΔΟΑΕ, τον ΝΕΑ, διμερών συμφωνιών με χώρες μη μέλη της ΕΕ και νέας συνδρομής προς γειτονικές χώρες

5.3. ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΜΙΑΣ ΝΕΑΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ

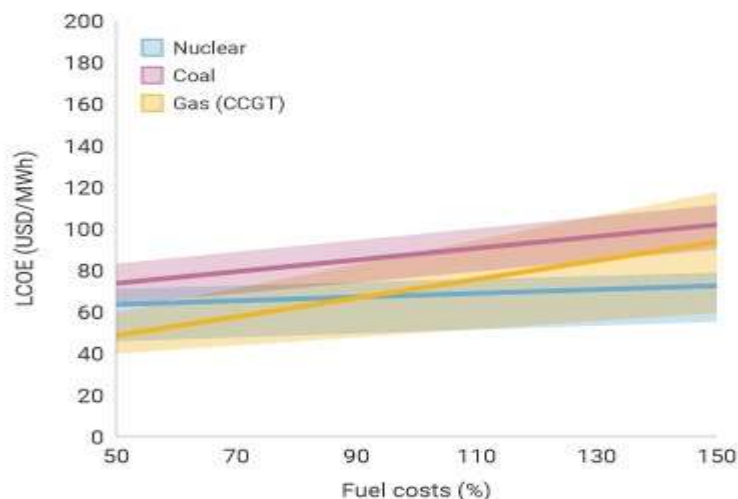
Η εξάρτηση της ΕΕ από τις εισαγωγές ενέργειας ολοένα και αυξάνεται. Βάσει των τρεχουσών αναγκών, τα επόμενα 20-30 έτη, περί το 65% των ενεργειακών αναγκών της Ένωσης θα καλύπτεται από εισαγωγές, μέρος των οποίων θα προέρχεται από πολιτικά ασταθής περιοχές του κόσμου. Με τις τιμές του πετρελαίου και του φυσικού αερίου να αυξάνονται, παρεπόμενο είναι να ακολουθούν και οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα οικονομικά της πυρηνικής ενέργειας, επηρεάζονται κατά κύριο λόγο από το κόστος κεφαλαίου, το οποίο αντιπροσωπεύει το 60% του συνολικού. Σημαντικές μεταβλητές είναι επίσης τα τρέχοντα επιτόκια και ο χρόνος κατασκευής. Ένας νέος πυρηνικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής, προϋποθέτει μια επένδυση της τάξεως των 2-3,5 δις ευρώ (για 1000MWe και 1600MWe αντίστοιχα). Οι επενδύσεις σε νέες πυρηνικές εγκαταστάσεις απαιτούν, όπως προαναφέρθηκε, σταθερό νομοθετικό πλαίσιο, λόγω του χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ αρχικής επένδυσης και απόδοσης. [9]

Πίνακας 6: Median LCOE in Europe (πηγή: IEA - Projected Costs of Generating Electricity 2020)

Energy Source	Κόστος Παραγωγής (USD/MWh)		
	3% discount rate	7% discount rate	10% discount rate
Gas (CCGT)	68	71	74
Nuclear	45	71	97
Wind (Onshore)	44	55	63
Wind (offshore)	68	90	108
Solar PV (utility scale)	55	70	83

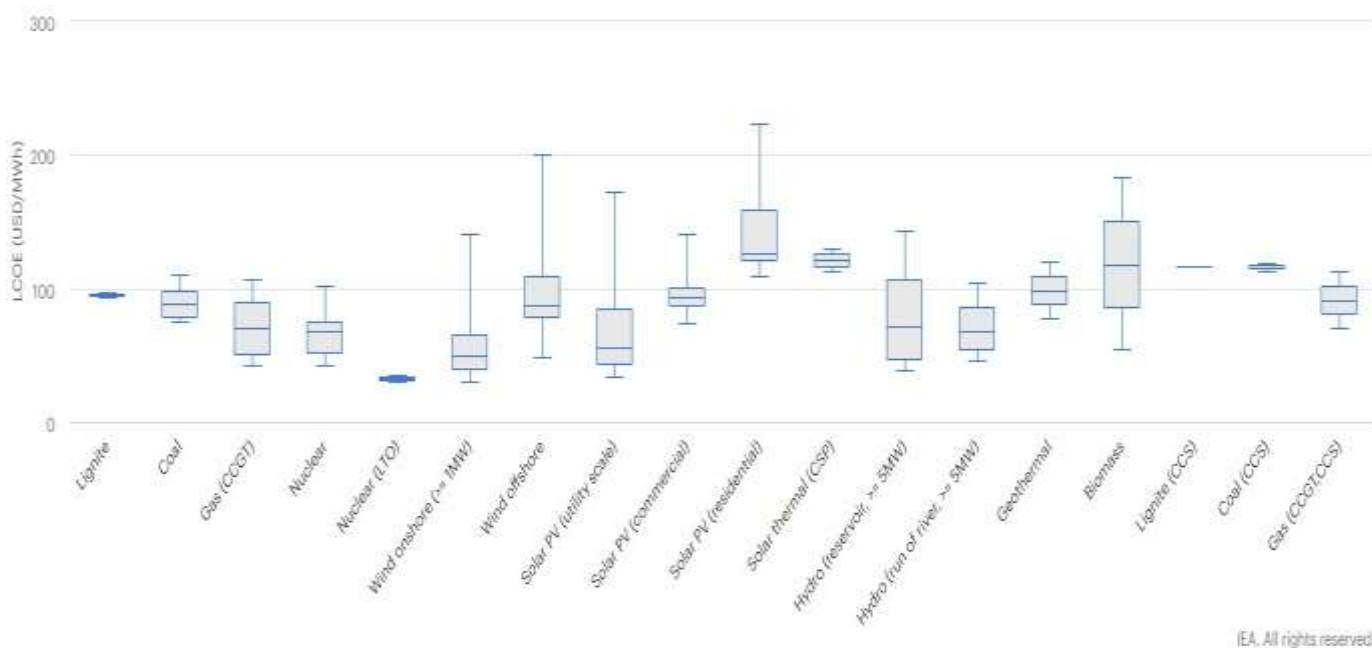
Αντίθετα με άλλους τύπους σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, οι πυρηνικοί επηρεάζονται ελάχιστα από τις μεταβολές του κόστους καυσίμου (10-15% του συνολικού κόστους παραγωγής). Χαρακτηριστικό είναι ότι αν η τιμή του ουρανίου διπλασιαστεί, το κόστος για ένα μέσο εργοστάσιο θα αυξηθεί κατά 26%, και το αντίστοιχο κόστος του ρεύματος κατά 7% (σε αντίθεση με μια αντίστοιχη αύξηση στις τιμές του φυσικού αερίου που θα οδηγήσει σε αύξηση κατά 70% της τιμής του ηλ. ρεύματος). [10]



Εικόνα 10: Effect of fuel costs on LCOE (πηγή: OECD-NEA)

Σύμφωνα με ανάλυση των IEA και NEA, στις περισσότερες βιομηχανικές χώρες οι νέοι πυρηνικοί σταθμοί προσφέρουν ένα οικονομικό και αρκούντως ανταγωνιστικό τρόπο παραγωγής ενέργειας, ανάλογα πάντα με την έκταση του χρονοδιαγράμματος του έργου.

Παραδοσιακά, η πυρηνική ενέργεια συνδυάζει υψηλότερο κόστος κατασκευής και χαμηλότερο κόστος λειτουργίας σε σχέση με την παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Τα τελευταία 20 έτη, το λειτουργικό κόστος μειώνεται σταθερά, όσο αυξάνονται οι παράγοντες δυναμικότητας. Το χαμηλό οριακό κόστος της πυρηνικής ενέργειας ενθάρρυνε τους ιδιοκτήτες των σταθμών να ζητήσουν παράταση των αδειών λειτουργίας. Επίσης έχει μειωθεί σημαντικά και ο χρόνος κατασκευής τους λόγω αυξημένης τεχνογνωσίας και εμπειρίας. [11]



Εικόνα 11: LCOE by technology at 7% discount rate (πηγή: IEA 2020)

5.4. ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Εν κατακλείδι, τα κράτη-μέλη της Ένωσης οφείλουν να στηρίξουν τα πυρηνικά τους προγράμματα και να επενδύσουν σε αυτά σε μακροχρόνιο ορίζοντα. Την περίοδο που ο πλανήτης βιώνει όλο και περισσότερο τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, οι συμβατικές πηγές ενέργειας όπως ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και εν μέρει το φυσικό αέριο, πρέπει σταδιακά να υποχωρούν και η χρήση τους να περιορίζεται ολοένα και περισσότερο, παραχωρώντας τη θέση τους σε καθαρότερες, όπως η πυρηνική, οι ανανεώσιμες και τα βιοκαύσιμα.

Με λίγα λόγια, οι χώρες έχουν να επιλέξουν ανάμεσα σε 2 ρεαλιστικά σενάρια: το σενάριο αποπυρηνικοποίησης (Nuclear Fade Case) και το σενάριο της Βιώσιμης Ανάπτυξης (Sustainable Development Scenario). Το πρώτο και λιγότερο ελκυστικό σενάριο, υποστηρίζει την παύση των εργασιών κατασκευής άλλων πυρηνικών εργοστασίων (πέρα από αυτών που ήδη κατασκευάζονται) και προβλέπει μείωση της παραγωγής ενέργειας κατά τα 2/3 της σημερινής μέχρι το 2040. Το 2^ο και επικρατέστερο σενάριο της Βιώσιμης Ανάπτυξης, το οποίο είναι συνυφασμένο με τη Συμφωνία των Παρισίων, προσβλέπει στην καθολική πρόσβαση σε σύγχρονες μορφές ενέργειας, καθώς και στη μείωση των πρώιμων θανάτων από τη μολυσμένη ατμόσφαιρα. [12]

Πρέπει να γίνει αντιληπτό το γεγονός ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δε δύνανται να σηκώσουν ολόκληρο το βάρος της ηλεκτροπαραγωγής της πυρηνικής ενέργειας εάν και εφόσον το Nuclear Fade σενάριο υπερισχύσει αυτού της Βιώσιμης Ανάπτυξης. Και αυτό γιατί, στον σημαντικά μικρότερο κύκλο ζωής τους, ειδικά τα φωτοβολταϊκά πάνελ και οι ανεμογεννήτριες, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό και από τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες. Με βάση τα παραπάνω, καθώς και την ανάλυση του κεφαλαίου 3, καθίσταται σαφές ότι η πυρηνική και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας πρέπει να λειτουργήσουν συμπληρωματικά και όχι σαν υποκατάστατα. Έτσι δίνεται η ευκαιρία στα κράτη-μέλη της ΕΕ να διευρύνουν, εφόσον δεν έχουν ήδη πυρηνικές μονάδες, ή να κρατήσουν διαφοροποιημένο το ενεργειακό τους χαρτοφυλάκιο. Με αυτόν τον τρόπο απεξαρτώνται από άμεσες εισαγωγές ενέργειας (η Ιταλία εισάγει το 16% της ενέργειας που καταναλώνει από Ελβετία και Γαλλία) αλλά και τις εισαγωγές-εξορύξεις ρυπογόνων φυσικών πόρων όπως ο λιγνίτης, ο λιθάνθρακας, το πετρέλαιο (από χώρες του ΟΠΕΚ) και το φυσικό αέριο (από Ρωσία, Νορβηγία και Αλγερία).

Συνεπώς, η χρήση της πυρηνικής ως καθαρής εναλλακτικής μορφή ενέργειας κρίνεται σκόπιμη και αποτελεσματική για τα κράτη-μέλη τα οποία θέλουν να μειώσουν ή ακόμα και να μηδενίσουν το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα.

Τέλος, τόσο για την περίπτωση της Ελλάδας όσο και για άλλες χώρες-μέλη της ΕΕ οι οποίες δε δύνανται να κατασκευάσουν μεγάλες πυρηνικές μονάδες είτε γιατί δεν έχουν μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις, είτε για άλλους λόγους (αυξημένη σεισμική

δραστηριότητα, ακραία καιρικά φαινόμενα, κλπ), η αντικατάσταση των υπάρχοντων γεννητριών ντίζελ με SMRs είναι ένα μέτρο που προτείνεται και αναμένεται να παίξει καταλυτικό ρόλο σχετικά με τη μείωση της έντασης και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Με την πάροδο των ετών και την ανάπτυξη των νέων τεχνολογιών πάνω στους πυρηνικούς αντιδραστήρες, κάθε μέλος της ΕΕ θα πρέπει να ασχοληθεί σοβαρά με αυτόν τον τομέα, να σχεδιάσει ένα λεπτομερές πλάνο πάνω στους Small Modular Reactors και να δοκιμάσει την πιλοτική εφαρμογή του.

Παρολαυτά, αν συγκεκριμένα η Ελλάδα παραμείνει σταθερή στις απόψεις της για την πυρηνική ενέργεια, θα αρχίσει να διαφαίνεται μακροχρόνια η ενεργειακή εξάρτησή της από τις γείτονες χώρες, κάτι που εν τέλει θα έχει αντίκτυπο και στην οικονομία αφού δε θα είναι εντελώς αυτόνομη ενεργειακά και ταυτόχρονα θα κινδυνεύει με κυρώσεις και πρόστιμα από την Ευρωπαϊκή Ένωση λόγω των ρύπων που θα εκπέμπει από τις συμβατικές πηγές ενέργειας (λιγνιτικές μονάδες ΔΕΗ).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 1

[1] Παπάζογλου Ι. (1989). *Η Ραδιενέργεια και Εμείς: Πυρηνικοί Αντιδραστήρες Ισχύος, Λειτουργία-Ασφάλεια & Ατυχήματα*, p. 180-186

[2] Chater J. (2005). *A History of Nuclear Power*, p. 29-34

[3] <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20210219-1>

[4] World Nuclear Association (2014). *New Nuclear in Europe: 2030 Outlook*

ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 2

[1] OECD, NEA & IAEA (2018). *Uranium 2018: Resources, Production and Demand*, p. 9-10

[2] World Nuclear Association (2019). *The Nuclear Fuel Report, Supply and Demand 2019-2040*

[3] Rene M. (2017). *History of Uranium Mining in Central Europe*, p. 6-12

[4] Brook B. W. & Bradshaw C. J. (2015). *Key role for nuclear energy in global biodiversity conservation. Conservation Biology*, 29(3), p. 702-712

[5] US Dpt. Of Energy (2015). *Quadrennial Technology Review – an Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities*

[6] ARPANSA (Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency) (2005). *Code of Practice and Safety Guide*

[7] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/HTML/?uri=CELEX:52006DC0844&from=EN>

[8] Jin Y. et al. (2019). *Water use of electricity technologies: A global meta-analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 115, p. 1-11

[9] Mekonnen M. et al. (2015). *The Consumptive Water Footprint of Electricity and Heat: A Global Assessment. Environmental Science: Water Research & Technology* issue 3, p. 285-297

[10] Scaff W. (2009). *Water Use, Electric Power and Nuclear Energy: A Holistic Approach to Environmental Stewardship. Nuclear Energy Institute*, p. 8-13

ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3

* *The World Bank – World Development Indicators*

<https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators#>

[1] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=LEGISSUM%3A128060>

[2] *International Energy Agency (IEA) (2019). Nuclear Power in a Clean Energy System*

[3] *Saidi K. & Omri A. (2020). Reducing CO2 emissions in OECD countries: Do renewable and nuclear energy matter? Progress in Nuclear Energy vol. 126, p. 1-11*

ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4

[1] <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2017:0236:FIN:EL:PDF>

[2] *International Atomic Energy Agency (IAEA) (2000). Recycle and reuse of materials and components from waste streams of nuclear fuel cycle facilities*

[3] *IAEA - Management of Reprocessed Uranium (2007). Current Stats and Future Prospects*

[4] *OECD & NEA (2019). Nuclear Energy Data*

[5] *EdF (1996). Review of the French Nuclear Power Program*

[6] *IAEA (2018). Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management, Nuclear Energy Series No. NW-T-1.14*

[7] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL-FR-IT/TXT/?from=EN&uri=CELEX%3A32011L0070>

[8] *Nuclear Waste Management Organization (2020). Programs around the world for managing used nuclear fuel*

[9] <https://www.nsenergybusiness.com/projects/onkalo-nuclear-waste-disposal-facility/http>

[10] <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/three-permanent-disposal-sites-radioactive-waste-europe-2025>

ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 5

[1] <https://www.gen-4.org/gif/>

[2] <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>

- [3] Testoni R. et al. (2021). *Review of nuclear microreactors: Status, potentialities and challenges. Progress in Nuclear Energy* vol. 138, p. 1-10
- [4] David S. et al. (2006). *Revisiting the Thorium-Uranium Nuclear Fuel Cycle. Europhysics News*, 38(2), p. 24-27
- [5] OECD, NEA & IAEA (2016). *Uranium 2016: Resources, Production and Demand*
- [6] Kazimi M. S. (2004). *Thorium Fuel for Nuclear Energy. American Scientist* vol. 91, p. 408-415
- [7] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/HTML/?uri=CELEX:52006DC0844&from=EN>
- [8] <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2017:0236:FIN:EL:PDF>
- [9] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/el/TXT/?uri=CELEX%3A52007DC0565>
- [10] WNA (2008). *The Economics of Nuclear Power*
- [11] IEA & NEA (2020). *Projected Costs of Generating Electricity*
- [12] IEA (2018). *World Energy Outlook 2018*