



ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

**Μόνιμη Επιτροπή Ενέργειας**

**«Εφαρμογές της Πυρηνικής Τεχνολογίας στη Βιομηχανία  
Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας»**

*(Πόρισμα Ομάδας Εργασίας του ΤΕΕ/ΤΚΜ όπως εγκρίθηκε με την απόφαση  
Α155/Σ11/14.04.2009 της Διοικούσας Επιτροπής)*



**Μέλη Ομάδας Εργασίας:**

**Μ. Αντωνόπουλος-Ντόμης (ΜΗΜ)**

**Χ. Βλαχοκώστας (ΜΜ)**

**Σ. Κιαρτζής (ΗΜ)**

**Π. Μπίλλιας (ΠΜ)**

**Π. Σαμαράς (ΧΜ)**



**Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2009**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

- 1. Κλιματική Αλλαγή και πυρηνική ενέργεια**
- 2. Πυρηνικοί αντιδραστήρες σχάσης**
  - 2.1 Συμβατικές και πυρηνικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
  - 2.2 Τεχνικοί όροι σχεδιασμού και ασφάλειας
- 3. Ασφάλεια αντιδραστήρων – Πυρηνικά κατάλοιπα**
  - 3.1 Ασφάλεια αντιδραστήρων
  - 3.2 Αντιδραστήρες εν λειτουργία
  - 3.3 Ατυχήματα σε πυρηνικές εγκαταστάσεις
    - 3.3.1 Τα σοβαρά ατυχήματα
    - 3.3.2 Το ατύχημα στο TMI
    - 3.3.3 Το ατύχημα στο Τσέρνομπιλ
      - 3.3.3.1 Τα αίτια και η κατάληξη του ατυχήματος
      - 3.3.3.2 Διασπορά ραδιενεργών υλικών
      - 3.3.3.3 Επιπτώσεις στην υγεία των πληθυσμών της πρώην ΕΣΣΔ
      - 3.3.3.4 Επιπτώσεις στην υγεία των πληθυσμών στις χώρες εκτός της πρώην ΕΣΣΔ
      - 3.3.3.5 Οι επιπτώσεις στην Ελλάδα
  - 3.4 Σύγκριση με στατιστικά ατυχημάτων στην παραγωγή ενέργειας
  - 3.5 Σεισμοί
  - 3.6 Διαπιστώσεις
  - 3.7 Διαχείριση ραδιενεργών κατάλοιπων
  - 3.8 Συμπεράσματα
- 4. Οικονομικά Στοιχεία**
  - 4.1 Κόστος κιλοβατώρας
  - 4.2 Διαθεσιμότητα πυρηνικού καυσίμου
- 5. Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός**
  - 5.1 Ενεργειακή Επάρκεια
  - 5.2 Ενδεχόμενη εγκατάσταση αντιδραστήρων ισχύος στην Ελλάδα
    - 5.2.1 Πλεονεκτήματα
    - 5.2.2 Υποδομές
- 6. Συμπεράσματα**

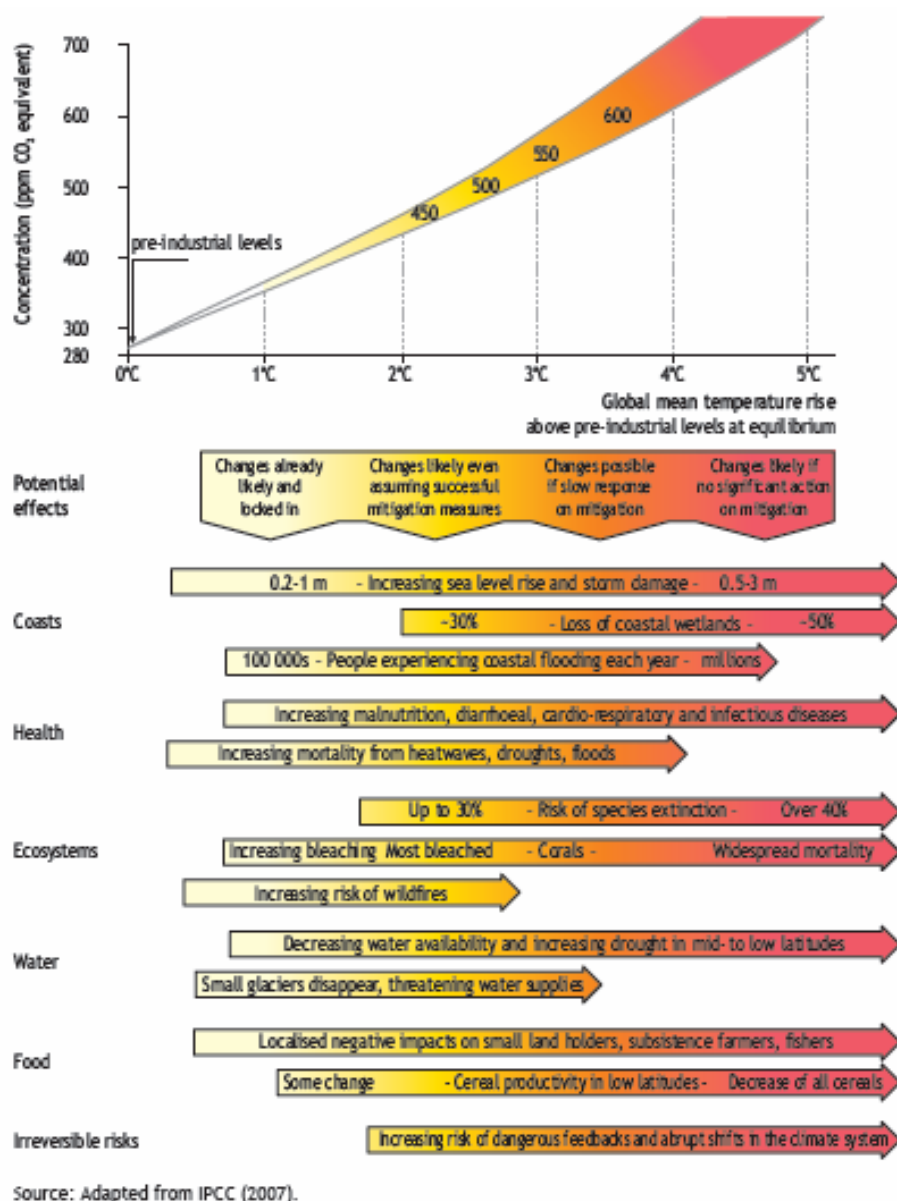
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

- |               |                                                                               |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I   | Πυρηνική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας                                        |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II  | Γνωστά ατυχήματα πυρηνικών αντιδραστήρων                                      |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ III | Τα αίτια ατυχήματος στο Τσέρνομπιλ, εκροές και εναποθέσεις ραδιενεργών υλικών |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV  | Ατυχήματα στην παραγωγή ενέργειας από το 1977                                 |

# 1. Κλιματική Αλλαγή και Πυρηνική Ενέργεια

Η διεθνής ενεργειακή κατάσταση μπορεί να χαρακτηριστεί από την αφύπνιση της διεθνούς κοινότητας για τα θέματα των ανθρωπογενών παρεμβάσεων στο περιβάλλον και ιδιαίτερα των επιπτώσεων από τη συνεχιζόμενη και ανεξέλεγκτη αύξηση των αερίων που συνεισφέρουν στο πρόβλημα του θερμοκηπίου.

Υπάρχει σχεδόν γενική αποδοχή ότι με τους ρυθμούς αύξησης εκπομπών CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα επέρχεται κλιματική αλλαγή που θα επιφέρει πολύ σοβαρές αλλαγές στο περιβάλλον και στην παγκόσμια οικονομία και πρέπει να ληφθούν μέτρα ελαχιστοποίησης των ανθρωπογενών επιδράσεων (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Πιθανές επιπτώσεις στην ανθρώπινη δραστηριότητα για διάφορα επίπεδα CO<sub>2</sub>.

Η εισαγωγή του συστήματος εμπορίας αερίων του θερμοκηπίου αποτελεί ένα μέσο για τη μείωση των παγκόσμιων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, το οποίο επί του παρόντος άρχισε να εφαρμόζεται στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ). Η γενίκευση του μέτρου της εμπορίας των δικαιωμάτων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε παγκόσμια κλίμακα, η επέκτασή του και σε άλλες δραστηριότητες ή και σε άλλα αέρια του θερμοκηπίου, στοχεύει σε ενεργειακή οικονομία πράσινης σχεδίασης.

Οι τρεις σημαντικότερες διέξοδοι στην προσπάθεια μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου και της περιβαλλοντικής ρύπανσης είναι :

- α) η εξοικονόμηση ενέργειας
- β) η χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας (ηλιακή, αιολική, βιομάζα, γεωθερμία κτλ)
- γ) η χρησιμοποίηση της πυρηνικής ενέργειας.

Αυτές μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά.

Το κύριο χαρακτηριστικό των εναλλακτικών πηγών ενέργειας είναι η μικρή πυκνότητα ενέργειας. Η μέγιστη ηλιακή ισχύς που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης είναι της τάξης των 10 kW/m<sup>2</sup>. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπ' όψιν βαθμό απόδοσης, ασυνέχεια των ανανεώσιμων πηγών κλπ, η διαθέσιμη ενέργεια ανά m<sup>2</sup> επιφάνειας γης είναι.

|                            |                            |
|----------------------------|----------------------------|
| Φωτοβολταϊκά – θερμοηλιακά | 3 -15 W/m <sup>2</sup>     |
| Βιομάζα                    | 0.5 – 1.5 W/m <sup>2</sup> |
| Άνεμος                     | 3 W/m <sup>2</sup>         |

Συγκριτικά τα ορυκτά και τα πυρηνικά καύσιμα έχουν τεράστια ενεργειακή πυκνότητα.

|                                                                         | ενεργειακή πυκνότητα<br>MJ/kg | λόγος προς άνθρακα |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| άνθρακας                                                                | 28                            | 1                  |
| πετρέλαιο                                                               | 42                            | 1.5                |
| φυσικό ουράνιο                                                          | 574 10 <sup>3</sup>           | 20 10 <sup>3</sup> |
| (σχάση μόνο U-235)                                                      |                               |                    |
| φυσικό ουράνιο                                                          | 82 10 <sup>6</sup>            | 3 10 <sup>6</sup>  |
| (σχάση όλου <sup>1</sup> του U-235<br>σε αναπαραγωγικό<br>αντιδραστήρα) |                               |                    |

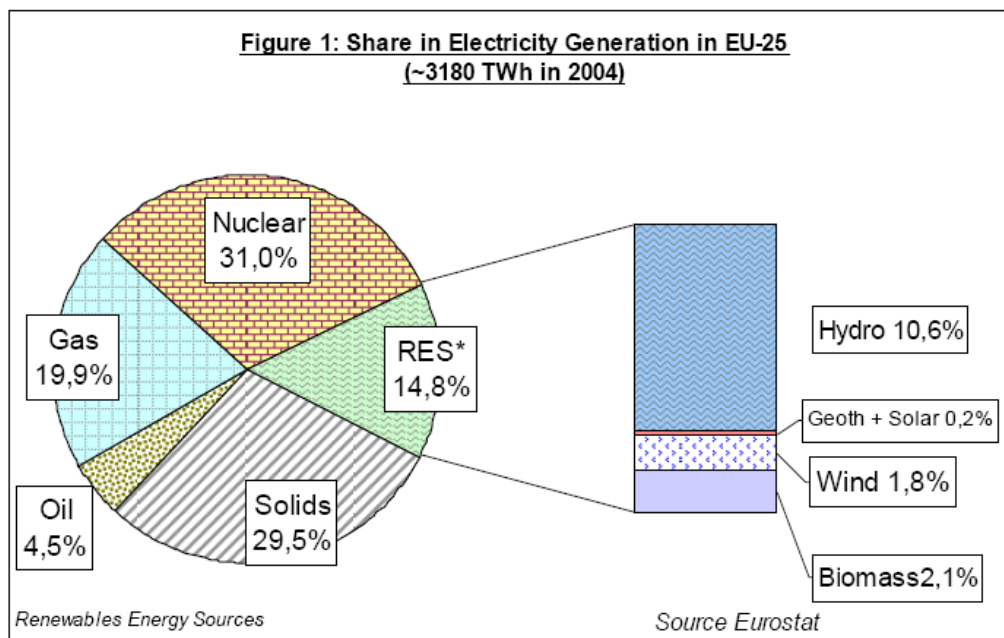
Είναι προφανές ότι, μολονότι η ανάπτυξη των εναλλακτικών πηγών ενέργειας είναι αναγκαία, αυτές οι πηγές ενέργειας, λόγω της ασυνεχειάς των και της μικρής πυκνότητας ισχύος που παρέχουν, δεν μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες βάσης της σύγχρονης κοινωνίας και οικονομίας. Η πυρηνική ενέργεια από σχάση μπορεί να καλύψει τις αναπτυξιακές ανάγκες της ανθρωπότητας επί πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, πράγμα που δεν είναι δυνατό με καμία άλλη διαθέσιμη πηγή ενέργειας. Η δε πυρηνική ενέργεια από σύντηξη, εάν και όταν<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Δεν είναι εφικτή η σχάση όλου του U-235 του φυσικού ουρανίου. Αναφέρεται εδώ για να γίνει αντιληπτή η κολοσσιαία τάξη μεγέθους της διαθέσιμης ενέργειας.

<sup>2</sup> Εκτιμάται το σχετικό διεθνές πρόγραμμα ITER θα καταλήξει σε εμπορικό αντιδραστήρα σύντηξης περί τα τέλη του αιώνα.

επιτευχθεί αυτοσυντηρούμενη, οικονομικά αποδοτική, αντίδραση σύντηξης, μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας εις το διηνεκές.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ανακοίνωσε στις 10 Ιανουαρίου 2007 το λεγόμενο «πακέτο ενέργεια και κλιματική αλλαγή» που αποτελεί στην ουσία μία νέα μεσοπρόθεσμη ευρωπαϊκή ενεργειακή πολιτική, όπου περιέχεται πληθώρα υποχρεώσεων των χωρών-μελών σε θέματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), Εξοικονόμησης Ενέργειας, Συμπαράγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ) και εν τέλει συσχέτισης της διεύθυνσης των τεχνολογιών αυτών στα ενεργειακά συστήματα, με τη συγκράτηση των εκπομπών αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο θερμοκηπίου. Στο «πακέτο ενέργεια και κλιματική αλλαγή» περιέχονται τρεις ευρωπαϊκοί ποσοτικοί στόχοι μέχρι το 2020 που αφορούν σε 20% συγκράτηση των αερίων (κυρίως CO<sub>2</sub>), σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, σε 20% διεύθυνση των ΑΠΕ και 20% εξοικονόμηση ενέργειας. Πρόσφατα προσδιορίστηκαν από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή οι ποσοτικοί στόχοι που πρέπει να επιτύχουν τα κράτη-μέλη στα πλαίσια εφαρμογών για τις ΑΠΕ (Μάρτιος 2008) και τις εκτός ΕΕ ETS εκπομπές ρύπων.



**Σχήμα 1.2:** Ποσοστό συμμετοχής ενεργειακών πηγών στην ηλεκτροπαραγωγή της ΕΕ.

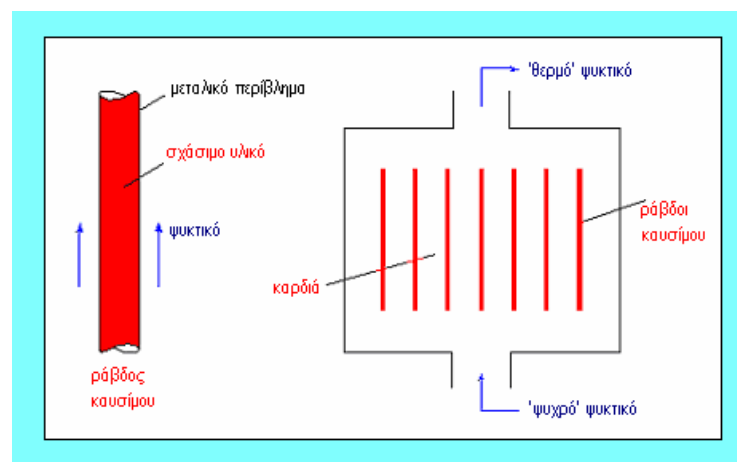
Η πυρηνική βιομηχανία ηλεκτροπαραγωγής συμμετέχει σχεδόν κατά το ένα τρίτο στην τροφοδοσία με ηλεκτρική ενέργεια στην ΕΕ (Σχήμα 1.2), με επακόλουθο η πυρηνική ενέργεια να αποτελεί αντικείμενο ευρύτερων συζητήσεων και ζυμώσεων για την ασφάλεια τροφοδοσίας της ΕΕ, την ανταγωνιστικότητα, την ενιαία αγορά ενέργειας, τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και την επίτευξη των στόχων σχετικά με την κλιματική αλλαγή. Η απόφαση αν θα χρησιμοποιήσει ή όχι πυρηνική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή είναι στη διακριτική ευχέρεια του κράτους-μέλους. Ο ρόλος της ΕΕ είναι η περαιτέρω βελτίωση, σύμφωνα με το κοινοτικό δίκαιο, του πλαισίου για την πυρηνική ενέργεια στα κράτη-μέλη που επιλέγουν την ηλεκτροπαραγωγή με τη χρήση πυρηνικής τεχνολογίας, ώστε να πληροί τα υψηλότερα πρότυπα ασφαλείας, προστασίας και μη διάδοσης πυρηνικών όπλων, όπως απαιτείται από τη Συμφωνία EURATOM.

## 2. Πυρηνικοί αντιδραστήρες σχάσης

### 2.1 Συμβατικές και πυρηνικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Όταν ένα νετρόνιο συγκρουσθεί με πυρήνα U-235, το πιθανότερο αποτέλεσμα είναι η σχάση: ο πυρήνας τεμαχίζεται σε δύο κομμάτια, ελευθερώνοντας ενέργεια (κατά μέσο όρο περίπου 200 eV) και 2 έως 3 νετρόνια. Το μέγιστο ποσοστό αυτής της ενέργειας εμφανίζεται σχεδόν ταυτόχρονα με τη σχάση ως θερμότητα, πρακτικά στη θέση που έγινε η σχάση. Έστω τώρα ότι το επεισόδιο αυτό της σχάσης πραγματοποιήθηκε μέσα σε υλικό που περιέχει αξιόλογη ποσότητα U-235. Τότε τα νετρόνια της σχάσης προκαλούν και αυτά σχάσεις πυρήνων U-235, που παράγουν και άλλα νετρόνια, που προκαλούν νέες σχάσεις κ.ο.κ. Μπορούμε να πούμε ότι η σχάση, εκτός από την ενέργεια που απελευθερώνει, παράγει το μέσο της αναπαραγωγής της, τα νετρόνια. Προκύπτει έτσι αλυσωτή αντίδραση σχάσεων που μπορεί να είναι αυτοσυντήρητη. Πολλά από τα νετρόνια απορροφώνται σε υλικά που δεν μπορούν να πάθουν σχάση, που δεν μπορούν να παράγουν άλλα νετρόνια. Οι απορροφήσεις αυτές αποτελούν απώλεια όσο αφορά στην συντήρηση της αλυσωτής αντίδρασης σχάσης.

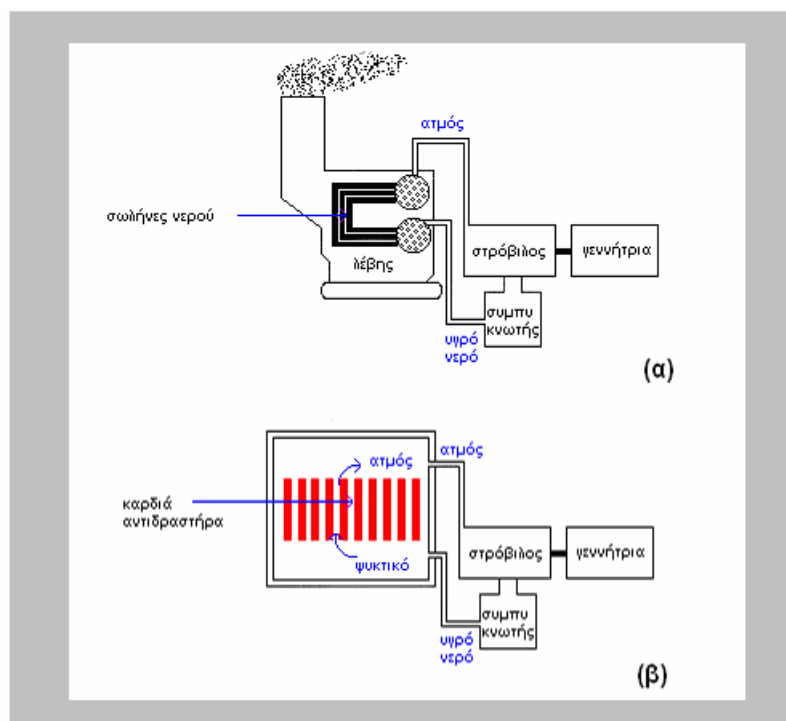
Διάταξη σχεδιασμένη έτσι ώστε να πραγματοποιείται ελεγχόμενη αυτοσυντήρητη αντίδραση σχάσης, ονομάζεται Πυρηνικός Αντιδραστήρας Σχάσης. **Πυρηνικό καύσιμο**, ή απλά καύσιμο ονομάζεται το υλικό που περιέχει τους σχάσιμους πυρήνες. Στους περισσότερους σύγχρονους αντιδραστήρες το καύσιμο τοποθετείται σε 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** (Σχήμα 2.1). Οι σχάσεις πραγματοποιούνται στο σχάσιμο υλικό μέσα στη ράβδο. Το μέγιστο ποσοστό της ενέργειας των σχάσεων εμφανίζεται ως θερμότητα, πρακτικά στις θέσεις όπου γίνονται οι σχάσεις, δηλαδή μέσα στις ράβδους καυσίμου, πρακτικά ταυτόχρονα με τη σχάση. Γύρω από τις ράβδους του πυρηνικού καυσίμου ρέει ψυκτικό (στη μεγάλη πλειοψηφία των σύγχρονων αντιδραστήρων αυτό είναι H<sub>2</sub>O, σε αντιδραστήρες γραφίτη-φυσικού ουρανίου CO<sub>2</sub>, στους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων υγρό Na) που απάγει την θερμότητα που παράγεται από τις σχάσεις.



**Σχήμα. 2.1:** Σχηματικό διάγραμμα απαγωγής θερμότητας από την καρδιά αντιδραστήρα.

Οι ράβδοι του 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 (Σχήμα 2.1). 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.

Στη συμβατική μονάδα, για την παραγωγή θερμικής ενέργειας, χρησιμοποιείται ως καύσιμο πετρέλαιο, γαιάνθρακες (κάρβουνο, λιγνίτης) ή φυσικό αέριο. Το καύσιμο καίγεται στον λέβητα (Σχήμα 2.2α). Στο χώρο του λέβητα βρίσκονται σιδηροσωλήνες μέσα στους οποίους ρέει νερό. Η θερμική ενέργεια των καυσαερίων της καύσης μεταφέρεται στους σωλήνες, που περιέχουν το νερό, κι απ' αυτούς στο νερό, με αποτέλεσμα την ατμοποίηση του νερού. Έτσι από τον λέβητα εξέρχεται ατμός υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Ο ατμός οδηγείται στην είσοδο του στρόβιλου, όπου «χτυπάει τα φτερά» της φτερωτής του στρόβιλου και τον κινεί, με αποτέλεσμα την περιστροφή του άξονα της φτερωτής. Ο άξονας αυτός είναι συνδεδεμένος με τον άξονα της γεννήτριας ηλεκτρικού ρεύματος. Με την περιστροφή του άξονα της γεννήτριας παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Ο ατμός στην έξοδο του στρόβιλου έχει χαμηλή πίεση και χαμηλή θερμοκρασία. Αυτός οδηγείται στην είσοδο του συμπυκνωτή. Στον συμπυκνωτή υπάρχουν σιδηροσωλήνες μέσα στους οποίους ρέει ψυχρό νερό, με συνέπεια την ψύξη του ατμού και την συμπύκνωση του ατμού σε υγρό νερό. Το νερό αυτό οδηγείται στην είσοδο των σωληνώσεων του λέβητα προκειμένου σε αυτόν να μετασχηματισθεί και πάλι σε ατμό.



**Σχήμα 2.2:** Απλοποιημένο διάγραμμα (α) συμβατικής και (β) πυρηνικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής

Απλοποιημένο διάγραμμα πυρηνικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.β<sup>3</sup>. Η πίεση λειτουργίας του ψυκτικού νερού ρυθμίζεται έτσι, ώστε μέσα στην καρδιά του αντιδραστήρα, με τη μεταφορά της θερμότητας των σχάσεων στο ψυκτικό νερό αυτό να βράζει και έτσι να παράγεται ατμός. Με αυτόν τον τρόπο στη έξοδο της καρδιάς

<sup>3</sup> Το διάγραμμα αντιστοιχεί σε Αντιδραστήρα Ζέοντος Ύδατος (Boiling Water Reactor, BWR, πίεση ψυκτικού περίπου 70 atm) στον οποίο πραγματοποιείται ατμοποίηση του ψυκτικού νερού μέσα στην καρδιά του αντιδραστήρα. Στους Αντιδραστήρες Πεπιεσμένου Ύδατος (Pressurized Water Reactor, PWR) η πίεση του ψυκτικού είναι τόσο μεγάλη (περίπου 150 atm), ώστε να μην πραγματοποιείται ατμοποίηση του ψυκτικού νερού μέσα στην καρδιά του αντιδραστήρα. Συνοπτική περιγραφή PWR δίδεται στο τέλος του κεφαλαίου.

έχουμε ατμό υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας<sup>4</sup>. Ο ατμός οδηγείται στον ατμοστρόβιλο και το υπόλοιπο κύκλωμα είναι πανομοιότυπο με το αντίστοιχο της συμβατικής εγκατάστασης. Από την έξοδο του στροβίλου ο ατμός οδηγείται στον συμπυκνωτή, όπου, ψυχόμενος, γίνεται υγρό νερό, το οποίο οδηγείται στην είσοδο της καρδιάς για τη συνέχιση της ψύξης της καρδιάς και για την συνέχιση της παραγωγής ατμού.

Κατά συνέπεια, όσον αφορά στο κύκλο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ πυρηνικής και συμβατικής μονάδος ηλεκτροπαραγωγής. Εδώ τελειώνουν οι ομοιότητες τους. Οι διαφορές των δύο αυτών μηχανών μετατροπής ενέργειας έχουν αφετηρία στους διαφορετικούς μηχανισμούς με τους οποίους παράγεται η θερμότητα.

Στη συμβατική μονάδα η θερμική ενέργεια παράγεται από εξώθερμες χημικές αντιδράσεις άνθρακα και υδρογόνου με οξυγόνο (καύση). Ο περιοριστικός παράγοντας είναι ο ρυθμός διάχυσης οξυγόνου προς την επιφάνεια του καυσίμου και ο ρυθμός απομάκρυνσης των προϊόντων της καύσης ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) από την επιφάνεια του καυσίμου. Υπάρχει λοιπόν ανώτατο όριο της ισχύος που μπορεί να παραχθεί ανά μονάδα όγκου του λέβητα, άρα υπάρχει ανώτατο όριο της συνολικής ισχύος που μπορεί να παραχθεί σε λέβητα ορισμένου όγκου. Αν προσθέσουμε περισσότερο όγκο καυσίμου και οξυγόνου, το περίσσειμα πάνω από το ανώτατο όριο θα φύγει από το λέβητα χωρίς να καεί.

Στον πυρηνικό αντιδραστήρα δεν υπάρχει, κατ' αρχήν, πρακτικά, ανώτατο όριο της θερμικής ισχύος που μπορεί να παραχθεί στο πυρηνικό καύσιμο. Τούτο δε διότι το ανώτατο όριο της πυκνότητας ισχύος, που μπορεί να παραχθεί, είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από τη μέγιστη ικανότητα απαγωγής του από το καύσιμο, με τη σύγχρονη τεχνολογία.

Το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο παραγωγής θερμικής ισχύος στον αντιδραστήρα, καθορίζεται: (α) από την ανώτατη επιτρεπόμενη θερμοκρασία του υλικού του περιβλήματος των ράβδων καυσίμου και (β) από το όριο θερμικής ισχύος που μπορεί να μεταφερθεί από το καύσιμο στο ψυκτικό. Ώστε, σε αντίθεση με τους λέβητες, στον πυρηνικό αντιδραστήρα η πυκνότητα ισχύος **πρέπει να συγκρατηθεί κάτω από ορισμένα επιτρεπόμενα όρια**.

Η επόμενη σημαντική διαφορά αφορά στην ασφάλεια των δύο συστημάτων και συνδέεται άμεσα με το μηχανισμό μεταφοράς της θερμότητας.

Στο λέβητα, η μέγιστη θερμοκρασία είναι στη φλόγα των αερίων και έχει κάποιο ανώτατο όριο, που υπολογίζεται εύκολα από τη θερμότητα της καύσης και από την ειδική θερμότητα των προϊόντων της καύσης. Στην πράξη, η θερμοκρασία της φλόγας είναι πάντα μικρότερη από αυτό το μέγιστο. Αν η ροή του ρευστού διακοπεί (π.χ. με κάποιο έμφραγμα) σε μια από τις σωλήνες, ο σωλήνας θα υπερθερμανθεί και το χειρότερο που μπορεί να συμβεί είναι θραύση του σωλήνα και σταμάτημα της μονάδος, με σοβαρές βέβαια οικονομικές συνέπειες.

Στον αντιδραστήρα, η θερμότητα παράγεται μέσα στις ράβδους καυσίμου και πρακτικά δεν υπάρχει ανώτατο όριο της θερμικής ισχύος που μπορεί να παραχθεί. Έτσι, κάποια αθέλητη μεγάλη αύξηση της ισχύος του αντιδραστήρα, ή σημαντική μείωση της ροής του ψυκτικού, μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από το σημείο τήξης του περιβλήματος της ράβδου και εισαγωγή στο ψυκτικό των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης. Ακόμα και μετά την παύση της λειτουργίας του αντιδραστήρα εξακολουθεί να παράγεται θερμότητα, από τη διάσπαση των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης. Οι συνέπειες ενός τέτοιου ατυχήματος μπορεί να είναι πολύ σοβαρές. Οι απαιτήσεις αξιοπιστίας του συστήματος ψύξης και των υλικών, είναι λοιπόν ιδιαίτερα αυστηρές. Ακόμα και αν δεν συμβεί ρύπανση του περιβάλλοντος, οι οικονομικές συνέπειες ενός ατυχήματος μπορεί να είναι μεγάλες.

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει η τελευταία ουσιαστική διαφορά των δύο συστημάτων. Στην πυρηνική μονάδα η ανάγκη για εξαιρετικά προηγμένη τεχνολογία ψύξης, ασφάλειας,

---

<sup>4</sup> Η παρουσίαση εδώ είναι πολύ απλοποιημένη αφού σκόπιμα παραλείπονται τεχνολογικές περιγραφές του συστήματος, όπως π.χ. ο διαχωριστής ατμού, οι υπερθερμαντές κ.λπ.

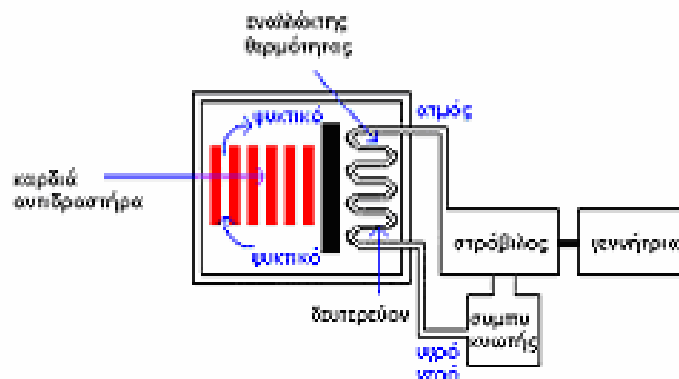
συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης, θωράκισης από τις ακτινοβολίες κ.λπ., οδηγούν σε μεγάλο κόστος κατασκευής της μονάδας.

|                                  | πυρηνική μονάδα | συμβατική μονάδα |
|----------------------------------|-----------------|------------------|
| συμβολή κεφαλαίου στο κόστος kWh | 2/3 συνολικού   | 1/3 συνολικού    |
| συμβολή καυσίμου στο κόστος kWh  | 1/3 συνολικού   | 2/3 συνολικού    |

Το κόστος καυσίμου πάει αντίστροφα. Στη συμβατική μονάδα είναι μεγάλο, στην πυρηνική είναι μικρό. Αυτό μπορούμε να το δούμε από τη σύγκριση των καυσίμων<sup>5</sup>.

|      |                      |               |                     |           |
|------|----------------------|---------------|---------------------|-----------|
| 1 kg | άνθρακα ή πετρελαίου | δίνει περίπου | 10 kWh              | Θερμότητα |
| 1 kg | U-235                | δίνει περίπου | $20 \cdot 10^6$ kWh | Θερμότητα |
| 1 kg | φυσικού ουρανίου     | δίνει περίπου | $14 \cdot 10^4$ kWh | Θερμότητα |

Έτσι συνοψίζονται οι βασικές διαφορές, συμβατικής - πυρηνικής μονάδας.



**Σχήμα 2.3:** Απλοποιημένο διάγραμμα Αντιδραστήρα Πεπιεσμένου Ύδατος

### ➤ Συνοπτική περιγραφή αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος (PWR)

Το ψυκτικό της καρδιάς του αντιδραστήρα PWR είναι νερό. Το κύκλωμα του ψυκτικού της καρδιάς ονομάζεται πρωτεύον κύκλωμα. Το ψυκτικό βγαίνει από την καρδιά σε υψηλή θερμοκρασία (325°C). Η πίεση λειτουργίας του πρωτεύοντος είναι τόσο μεγάλη (150 atm) ώστε να μην επιτρέπεται βρασμός του ψυκτικού στην καρδιά. Από την έξοδο της καρδιάς το ψυκτικό οδηγείται σε εναλλάκτη θερμότητας. Εκεί μεταφέρει τη θερμότητα σε κύκλωμα νερού, στο «δευτερεύον κύκλωμα ψυκτικού». Μ' αυτόν τον τρόπο το νερό του δευτερεύοντος βράζει και παράγεται ατμός. Το ψυκτικό της καρδιάς, έχοντας δώσει τη θερμική του ενέργεια στο δευτερεύον, βγαίνει από τον εναλλάκτη σχετικά «ψυχρό» (290°C) και επιστρέφει στην είσοδο της καρδιάς για τη συνέχιση της ψύξης της καρδιάς. Το υπόλοιπο κύκλωμα είναι

<sup>5</sup> Το φυσικό ουράνιο περιέχει το ισότοπο U-235 σε ποσοστό βάρους 0,7%

πανομοιότυπο με αυτό της συμβατικής μονάδας: ο ατμός που βγαίνει από το δευτερεύον οδηγείται και κινεί το στρόβιλο, στη συνέχεια υγροποιείται στον συμπυκνωτή και στη συνέχεια οδηγείται στην είσοδο του δευτερεύοντος κυκλώματος.

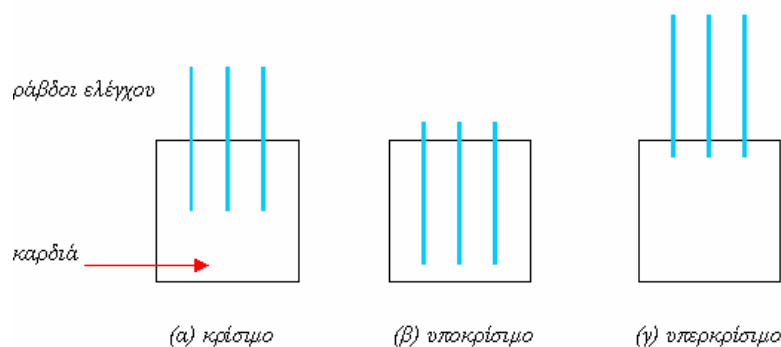
## 2.2 Τεχνικοί όροι, σχεδιασμού και ασφάλειας

Σε πρώτη προσέγγιση μπορούμε να θεωρήσουμε τον ρυθμό των σχάσεων (αριθμό σχάσεων ανά δευτερόλεπτο) ανάλογο προς τον συνολικό αριθμό των νετρονίων που βρίσκονται στην καρδιά του αντιδραστήρα κάθε στιγμή. Άρα και ο ρυθμός παραγωγής ενέργειας (παραγόμενη ενέργεια ανά δευτερόλεπτο) είναι κάθε στιγμή ανάλογος προς τον νετρονικό πληθυσμό. Κάποια από τα νετρόνια απορροφούνται σε σχάσιμους πυρήνες όπως το U-235 και προκαλούν σχάσεις, από τις οποίες παράγονται εκτός από ενέργεια και νετρόνια (2 έως 3 από κάθε σχάση), τα οποία είναι διαθέσιμα για να προκαλέσουν νέες σχάσεις και να συντηρήσουν την αλυσωτή αντίδραση. Άλλα νετρόνια απορροφούνται σε μη σχάσιμους πυρήνες. Όσα νετρόνια απορροφούνται σε μη σχάσιμους, αλλά και σε σχάσιμους πυρήνες, δεν είναι πλέον διαθέσιμα για να προκαλέσουν σχάση και κατά συνέπεια αποτελούν απώλειες, ως προς τη διατήρηση της αλυσωτής αντίδρασης σχάσης. Απώλειες αποτελούν επίσης όσα νετρόνια διαφεύγουν έξω από τη συσκευή. Κατά συνέπεια ο ρυθμός απωλειών νετρονίων (αριθμός απωλειών νετρονίων ανά δευτερόλεπτο) είναι το άθροισμα του ρυθμού απορροφήσεων νετρονίων σε όλα τα υλικά και του ρυθμού διαφυγών νετρονίων από την καρδιά του αντιδραστήρα. Παράλληλα έχουμε και κάποιο ρυθμό παραγωγής νετρονίων από τις σχάσεις. Δίνονται οι εξής ορισμοί:

**Κρίσιμος** αντιδραστήρας: όταν ο ρυθμός παραγωγής είναι ίσος με τον ρυθμό απωλειών νετρονίων, οπότε ο νετρονικός πληθυσμός, επομένως και ο ρυθμός σχάσεων, άρα και ο ρυθμός παραγωγής θερμικής ενέργειας, παραμένουν σταθεροί στον χρόνο.

**Υπερκρίσιμος** αντιδραστήρας: όταν ο ρυθμός παραγωγής είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό απωλειών νετρονίων, οπότε ο νετρονικός πληθυσμός, επομένως και ο ρυθμός σχάσεων, άρα και ο ρυθμός παραγωγής ενέργειας, αυξάνονται με τον χρόνο.

**Υποκρίσιμος** αντιδραστήρας: όταν ο ρυθμός παραγωγής είναι μικρότερος από τον ρυθμό απωλειών νετρονίων, οπότε ο νετρονικός πληθυσμός, επομένως και ο ρυθμός σχάσεων, άρα και ο ρυθμός παραγωγής ενέργειας, μειώνονται με τον χρόνο.



**Σχήμα 2.4:** Ράβδοι ελέγχου (απορροφητές νετρονίων).

**Εμπλουτισμός** καυσίμου: η περιεκτικότητα σε U-235 ως ποσοστό της μάζας του συνολικού ουρανίου (δηλαδή του αθροίσματος των μαζών του U-235 και του U-238), π.χ. το φυσικό ουράνιο έχει εμπλουτισμό 0,7%, δηλαδή η μάζα του U-235 είναι 0,7% της συνολικής μάζας του φυσικού ουρανίου, και το υπόλοιπο είναι U-238.

Υπάρχουν εξαιρετικά προηγμένα συστήματα ελέγχου και ασφάλειας, πολύ περισσότερο αυστηρά σε σχέση με άλλες βιομηχανικές διεργασίες, π.χ. της χημικής βιομηχανίας. Τα συστήματα αυτά δεν είναι δυνατόν ούτε κρίνεται σκόπιμο να περιγραφούν στα πλαίσια της παρούσας ανάλυσης. Περιγράφεται όμως ποιοτικά ο κύριος τρόπος ελέγχου της κρισιμότητας. Αυτό γίνεται σχεδόν σε όλους τους αντιδραστήρες με χρήση **ράβδων ελέγχου**. Οι μεταλλικές αυτές ράβδοι περιέχουν ικανή ποσότητα υλικών που είναι ισχυροί απορροφητές νετρονίων. Οι ράβδοι ελέγχου είναι εν μέρει βυθισμένες στην καρδιά του αντιδραστήρα. Το σύστημα είναι σχεδιασμένο έτσι, ώστε όταν οι ράβδοι ελέγχου είναι βυθισμένες σε ένα ορισμένο βάθος της καρδιάς, το ισοζύγιο νετρονίων δίνει κρίσιμο σύστημα, δηλαδή ο ρυθμός παραγωγής ισούται με το ρυθμό απωλειών νετρονίων (Σχήμα 2.4.α).

Όταν οι ράβδοι βυθίζονται σε μεγαλύτερο βάθος (Σχήμα 2.4.β) από αυτό που αντιστοιχεί σε κρίσιμο σύστημα, εισάγεται στην καρδιά περισσότερο υλικό που απορροφά νετρόνια, οπότε ο ρυθμός απωλειών νετρονίων είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό παραγωγής νετρονίων και ο αντιδραστήρας είναι υποκρίσιμος. Όταν οι ράβδοι ελέγχου είναι βυθισμένες στην καρδιά σε βάθος μικρότερο (Σχήμα 2.4.γ) από αυτό που αντιστοιχεί σε κρίσιμο σύστημα, τότε στην καρδιά βρίσκεται λιγότερο υλικό που απορροφά νετρόνια, οπότε ο ρυθμός απωλειών νετρονίων είναι μικρότερος από τον ρυθμό παραγωγής νετρονίων και ο αντιδραστήρας είναι υπερκρίσιμος. Ο αντιδραστήρας καθίσταται: κρίσιμος για λειτουργία σε σταθερή ισχύ, ελεγχόμενα υπερκρίσιμος για αύξηση της ισχύος και ελεγχόμενα υποκρίσιμος για μείωση της ισχύος. Τα συστήματα ασφαλείας στοχεύουν στην αποτροπή μη ελεγχόμενης υπερκρισιμότητας.

#### ➤ **Επιβραδυντής**

Τα νετρόνια προκύπτουν από τη σχάση με μεγάλες ενέργειες (μέση τιμή 2 MeV, μέγιστη 20 MeV). Με αυτές τις ενέργειες τα νετρόνια κινούνται με μεγάλες ταχύτητες και γι' αυτό ονομάζονται **ταχεία νετρόνια**. Η ταχύτητα νετρονίου ενέργειας 2 MeV είναι περίπου  $20 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$ . Νετρόνια των οποίων η κινητική ενέργεια είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την κινητική ενέργεια των ατόμων και των μορίων των υλικών της καρδιάς, ονομάζονται **θερμικά νετρόνια**. Η μέση τιμή της ενέργειας των θερμικών νετρονίων είναι περίπου 0,025 eV, που αντιστοιχεί σε ταχύτητα νετρονίου  $2200 \text{ m s}^{-1}$ .

Τα θερμικά νετρόνια συμβαίνει να είναι πολύ πιο αποδοτικά ως προς την πρόκληση σχάσεων απ' ό,τι τα ταχεία. Δηλαδή η πιθανότητα να υποστεί σχάση σχάσιμος πυρήνας, αν συναντηθεί με θερμικό νετρόνιο, είναι εξαιρετικά μεγαλύτερη από την πιθανότητα να υποστεί σχάση αν συναντηθεί με ταχύ νετρόνιο. Ως εκ τούτου οι περισσότεροι τύποι αντιδραστήρων σχεδιάζονται έτσι, ώστε ικανό ποσοστό των ταχέων νετρονίων της σχάσης να επιβραδύνονται μέχρις ότου γίνουν θερμικά πριν εισέλθουν στις συστάδες καυσίμου, όπου θα συναντήσουν σχάσιμους πυρήνες και θα προκαλέσουν σχάσεις και παραγωγή νέων ταχέων νετρονίων. Η επιβράδυνση πραγματοποιείται με διαδοχικές σκεδάσεις των ταχέων νετρονίων με τους πυρήνες κατάλληλων υλικών, που ονομάζονται **επιβραδυντές** και περιβάλλουν τις ράβδους του πυρηνικού καυσίμου. Οι αντιδραστήρες αυτοί ονομάζονται **θερμικοί αντιδραστήρες**. Στους αντιδραστήρες PWR ή BWR το ψυκτικό που ρέει γύρω από τις ράβδους καυσίμου είναι ελαφρύ νερό και, περιβάλλοντας το καύσιμο, λειτουργεί και ως επιβραδυντής. Στους αντιδραστήρες RMBK, όπως ήταν αυτός του Τσερνομπίλ, όπου έγινε το ατύχημα, ο επιβραδυντής είναι γραφίτης και το ψυκτικό είναι νερό.

#### ➤ **Φράγματα εγκλωβισμού των ραδιενεργών προϊόντων**

Ένας από τους κύριους στόχους των συστημάτων ασφαλείας είναι η εξασφάλιση πολλαπλών διαδοχικών **φραγμάτων εγκλωβισμού των ραδιενεργών προϊόντων** της σχάσης, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας διαφυγής τους στο περιβάλλον. Η υλοποίηση της αρχής αυτής είναι διαφορετική στους διαφόρους τύπους αντιδραστήρων, έχει όμως τα κοινά χαρακτηριστικά σε όλους σχεδόν τους αντιδραστήρες, που περιγράφονται ως εξής:

Το πρώτο φράγμα είναι το ίδιο το καύσιμο. Σε όλους σχεδόν τους αντιδραστήρες, το καύσιμο είναι στερεό, συνήθως κεραμικό διοξείδιο του ουρανίου, στη μορφή των μικρών κυλινδρικών

δισκίων της Φωτογραφίας 2.1. Τα στερεά προϊόντα της σχάσης εγκλωβίζονται μέσα στο ίδιο το δισκίο. Τα αέρια όμως προϊόντα της σχάσης, όπως είναι τα ραδιοϊσότοπα κρυπτού, ξένου και ιωδίου, διαφεύγουν από τα δισκία με αργό ρυθμό.



**Φωτογραφία 2.1:** Δισκία κεραμικού καυσίμου ( $\text{UO}_2$ ).

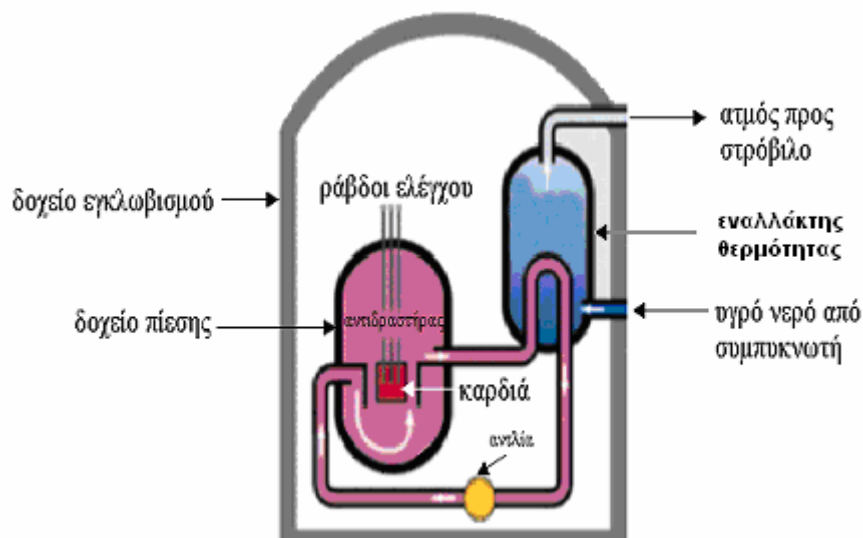
Στους περισσότερους τύπους αντιδραστήρων, το καύσιμο, με τη μορφή των δισκίων (Φωτογραφία 2.1) είναι τοποθετημένο μέσα σε λεπτό μεταλλικό κυλινδρικό περίβλημα. Το σύνολο του περιβλήματος και του καυσίμου που περιέχεται σε αυτό ονομάζεται **ράβδος καυσίμου**. **Συστάδα καυσίμου** ονομάζεται το σύνολο αριθμού ράβδων που έχουν συναρμολογηθεί και στερεωθεί σε ενιαίο συγκρότημα, με κατάλληλη (συνήθως μεταλλική) δομή, ώστε να διατηρείται η μεταξύ των ράβδων απόσταση (Φωτογραφία 2.2). Είναι δυνατό να περιέχει από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες ράβδων καυσίμου, ανάλογα με τον τύπο του αντιδραστήρα. Αποτελεί τη μικρότερη μονάδα τοποθέτησης (ή απομάκρυνσης) καυσίμου στην καρδιά του αντιδραστήρα, η οποία περιέχει μερικές εκατοντάδες συστάδων.



**Φωτογραφία 2.2:** Συστάδα ράβδων καυσίμου αντιδραστήρα PWR. Διακρίνονται τα άκρα ράβδων που είναι τραβηγμένες έξω (στο πρόσθιο μέρος της φωτογραφίας) από τη συστάδα. Η εξωτερική διάμετρος των ράβδων αυτών είναι 10,7 mm και το περίβλημα, από κράμα ζirkονίου, έχει πάχος περίπου 0,6 mm.

Το δεύτερο φράγμα είναι το ερμητικά κλεισμένο **περίβλημα της ράβδου καυσίμου**, που εγκλωβίζει τα αέρια προϊόντα της σχάσης και δεν επιτρέπει τη διαρροή τους στο ψυκτικό του αντιδραστήρα. Στην αρχή της ζωής της ράβδου καυσίμου στον αντιδραστήρα, η πιθανότητα διαρροής αερίων από το περίβλημα είναι ασήμαντη. Καθώς όμως η ράβδος παραμένει 3 περίπου έτη στην καρδιά, δηλαδή σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας και έντονου βομβαρδισμού με νετρόνια, το υλικό του περιβλήματος καταπονείται, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μικρών ρωγμών και οπών, από τις οποίες διαφεύγουν ραδιενεργά αέρια στο ψυκτικό. Το ποσοστό των ράβδων από τις οποίες διαφεύγουν αέρια είναι της τάξης του 0,2%, περί το τέλος της παραμονής τους στην καρδιά του αντιδραστήρα.

Το τρίτο φράγμα εγκλωβισμού των προϊόντων της σχάσης, στους αντιδραστήρες με ψυκτικό νερό, είναι το **δοχείο πίεσης**, μέσα στο οποίο περιέχεται η καρδιά του αντιδραστήρα και το κύκλωμα του ψυκτικού (Σχήμα 2.5). Το δοχείο αυτό είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα υψηλών προδιαγραφών και ικανού πάχους, ώστε να αντέχει σε πιέσεις πολύ μεγαλύτερες από την κανονική πίεση λειτουργίας της καρδιάς, να αντέχει, δηλαδή, σε σημαντικές υπερπιέσεις που μπορούν να υπάρξουν σε περίπτωση ατυχήματος.



**Σχήμα 2.5:** Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα δοχείου πίεσης και δοχείου εγκλωβισμού αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος. Η καρδιά περιέχεται στο δοχείο πίεσης. Το δοχείο πίεσης και ολόκληρο το πρωτεύον (ψυκτικό) κύκλωμα, κατά συνέπεια και ο ατμοπαραγωγός εναλλάκτης θερμότητας περιέχεται στο δοχείο εγκλωβισμού.

Επιπλέον, υπάρχουν αυτόματα συστήματα σχεδιασμένα έτσι, ώστε, σε περίπτωση αύξησης της πίεσης πάνω από προκαθορισμένα όρια, να επαναφέρουν την πίεση στα κανονικά επίπεδα, να μην επιτρέπουν την ανάπτυξη πιέσεων ικανών να θραύσουν το δοχείο πίεσης ή τις σωληνώσεις του κυκλώματος του ψυκτικού. Μεγάλη θραύση σε κάποια θέση του κυκλώματος του ψυκτικού θα έχει τις εξής συνέπειες.

- (α) διαρροή ραδιενεργών προϊόντων έξω από το κύκλωμα του ψυκτικού και, πιθανόν,
- (β) απώλεια ψυκτικού στην καρδιά, με αποτέλεσμα μέρος της καρδιάς, ή και όλη η καρδιά να μην ψύχεται.

Πρόκειται για το σοβαρότερο ατύχημα και ονομάζεται **«Ατύχημα Απώλειας Ψυκτικού» (LOCA: Loss Of Coolant Accident)**. Σε τέτοιο ατύχημα, στο μέρος της καρδιάς που δεν ψύχεται, η παραγόμενη από τις σχάσεις θερμότητα δεν απάγεται, οπότε η θερμοκρασία των ράβδων του καυσίμου αυξάνεται. Ενδέχεται, η αύξηση της θερμοκρασίας να ξεπεράσει το όριο τήξης του καυσίμου και του περιβλήματός του, οπότε θα επέλθει τήξη του καυσίμου

στην περιοχή της καρδιάς που δεν ψύχεται. Αν συμβεί αυτό, η επαφή του υψηλής θερμοκρασίας τηγμένου μεταλλικού καυσίμου με υγρό ψυκτικό, που έχει σχετικά με το καύσιμο χαμηλή θερμοκρασία, θα προκαλέσει έκρηξη η οποία ενδέχεται να προκαλέσει καταστροφή και τήξη μεγάλου μέρους ή και ολόκληρης της καρδιάς. Πέραν τού ότι ο αντιδραστήρας στην περίπτωση αυτή καθίσταται οριστικά άχρηστος, η ανάπτυξη μεγάλων πιέσεων είναι πιθανόν να προκαλέσει περαιτέρω ρήξη του κυκλώματος του ψυκτικού και διαρροή μεγάλων ποσοτήτων ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον. Πρόκειται για το μέγιστο δυνατό ατύχημα, οι συνέπειες του οποίου για το περιβάλλον μπορεί να είναι ιδιαίτερα σοβαρές. **Το ατύχημα αυτό ονομάζεται «ατύχημα-βάση-σχεδιασμού», διότι το σύστημα σχεδιάζεται έτσι, ώστε η πιθανότητα να συμβεί τέτοιο ατύχημα να είναι μικρότερη από κάποια προκαθορισμένη τιμή.**

Η φιλοσοφία της **άμυνας σε βάθος** (κεφ. 3), επιπλέον της ελαχιστοποίησης της πιθανότητας να συμβεί το ατύχημα αυτό, απαιτεί και την ελαχιστοποίηση των συνεπειών στο περιβάλλον και στην υγεία αν, παρ' όλα αυτά, το ατύχημα συμβεί. Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη του τελευταίου φράγματος, του **δοχείου εγκλωβισμού** (Σχήμα 2.5). Αυτό είναι κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους τουλάχιστον ενός μέτρου, επενδυμένου εσωτερικά με στεγανό χαλύβδινο έλασμα<sup>6</sup>. Το δοχείο εγκλωβισμού σχεδιάζεται και κατασκευάζεται έτσι ώστε να αντέχει τις αναμενόμενες μεγάλες πιέσεις και να εγκλωβίσει εντός αυτού τα ραδιενεργά προϊόντα, να μην επιτρέψει τη διαρροή τους στο περιβάλλον, στην περίπτωση μεγάλου ατυχήματος, κατά το οποίο θα έχουν διαρρεύσει μέσα στο δοχείο εγκλωβισμού μεγάλες ποσότητες ραδιενεργών υλικών, ατμών και αερίων. Στην περίπτωση αυτή ενεργοποιούνται στο δοχείο εγκλωβισμού, μεταξύ άλλων, και **συστήματα υποβάθμισης της πίεσης**, τα οποία, π.χ. με ψεκασμό του θαλάμου εγκλωβισμού με ψυχρό νερό, επιφέρουν συμπύκνωση ατμών και πτώση της πίεσης.

---

<sup>6</sup> Ο σχεδιασμός των αντιδραστήρων της πρώην Σοβιετικής Ένωσης ηρκείτο στην ελαχιστοποίηση της πιθανότητας να συμβεί το μεγάλο ατύχημα τήξης της καρδιάς και δεν εμφορείτο από τη φιλοσοφία της άμυνας σε βάθος. Έτσι, οι αντιδραστήρες σαν αυτόν του Τσέρνομπιλ (στον οποίο έγινε το ατύχημα το 1986) και οι τέσσερις παλαιότεροι του Κοσλοντούι (Βουλγαρία) δεν διαθέτουν δοχείο εγκλωβισμού. Οι σύγχρονοι ρωσικοί αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος έχουν παρόμοιο σχεδιασμό με τους αντίστοιχους της «Δύσης» και διαθέτουν δοχείο εγκλωβισμού.

### 3. Ασφάλεια αντιδραστήρων – Πυρηνικά κατάλοιπα

#### 3.1 Ασφάλεια αντιδραστήρων

Στα πλαίσια της παρούσας ανάλυσης δε θα αναπτυχθεί το πολύπλοκο τεχνικό θέμα της ασφάλειας των πυρηνικών εγκαταστάσεων. Ωστόσο υπογραμμίζεται ότι ο κύριος στόχος των συστημάτων ασφάλειας πυρηνικών αντιδραστήρων είναι η εξασφάλιση πολλαπλών διαδοχικών **φραγμάτων εγκλωβισμού των ραδιενεργών προϊόντων** της σχάσης, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας διαρροής αυτών στο περιβάλλον. Ο σχεδιασμός, η κατασκευή και οι διαδικασίες λειτουργίας των πυρηνικών αντιδραστήρων διέπονται από την ονομαζόμενη **άμυνα σε βάθος**. Σύμφωνα με αυτή τη βασική αρχή:

(α) Πρέπει να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα να εκκινήσει οποιοδήποτε πιθανό ατύχημα. Επιβάλλεται η πιθανότητα αυτή να είναι μικρότερη από προδιαγεγραμμένη τιμή.

(β) Επιπλέον αυτού, επιβάλλεται το σύστημα να έχει σχεδιαστεί και να λειτουργεί έτσι, ώστε αν το ατύχημα εκκινήσει, να αποτρέψει την ανάπτυξη του ατυχήματος και να επαναφέρει τον αντιδραστήρα σε ασφαλή κατάσταση. Η πιθανότητα να συμβεί μεγάλο ατύχημα πρέπει να είναι μικρότερη από τιμή προδιαγεγραμμένη από τους κανονισμούς της χώρας στην οποία εγκαθίσταται ο αντιδραστήρας.

(γ) Επιπλέον της ελαχιστοποίησης της πιθανότητας να συμβεί μεγάλο ατύχημα, αν το ατύχημα συμβεί, επιβάλλεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή να είναι τέτοιες, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον και την υγεία του πληθυσμού.

Η φιλοσοφία της άμυνας σε βάθος, εφαρμόζεται και στις εγκαταστάσεις διαχείρισης ραδιενεργών καταλοίπων, με την έννοια ότι σχεδιάζονται διαδοχικά φράγματα αποτροπής της ρύπανσης της βιόσφαιρας, καθένα από τα οποία πρέπει να έχει προδιαγεγραμμένη μικρή πιθανότητα να διαρραγεί. Θεμελιώδης προϋπόθεση ασφάλειας είναι η ύπαρξη Ρυθμιστικής Αρχής, η οποία ελέγχει την εφαρμογή των κανονισμών ασφάλειας και τις πρακτικές στις πυρηνικές εγκαταστάσεις, έχει αρμοδιότητα αδειοδότησης πυρηνικών πρακτικών και ευθύνεται για την προστασία του πληθυσμού και του περιβάλλοντος από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Διεθνείς συμβάσεις και νόμοι (π.χ. της ΕΕ) επιβάλλουν η Ρυθμιστική Αρχή να είναι ανεξάρτητη από την κυβέρνηση και να έχει επαρκή χρηματοδότηση, στελέχωση και τεχνογνωσία.

Στα σύγχρονα πυρηνικά εργοστάσια το κόστος της ασφάλειας είναι περίπου το 25% του συνολικού κόστους κεφαλαίου. Ο σχεδιασμός νέων αντιδραστήρων (advanced reactors, 2 τέτοιοι άρχισαν λειτουργία το 1996 στην Ιαπωνία) περιέχει βελτιώσεις ασφάλειας βασισμένες στην προηγούμενη εμπειρία λειτουργίας. Κύρια χαρακτηριστικά των, εκτός από τον πλεονασμό (redundancy), είναι παθητικά συστήματα ασφάλειας και περισσότερη ασφάλεια κατά μία ή δύο τάξεις μεγέθους σε σχέση με τους προηγούμενους σχεδιασμούς.

Εκτίμηση του βαθμού ασφάλειας των πυρηνικών αντιδραστήρων μπορεί να προκύψει από επισκόπηση που ακολουθεί: του ιστορικού των αντιδραστήρων εν λειτουργία, των ατυχημάτων και των επιπτώσεών τους, την σύγκριση με τις πρακτικές άλλων δραστηριοτήτων (π.χ. της χημικής βιομηχανίας) και τέλος από την πρακτική και τα προβλήματα της διαχείρισης των ραδιενεργών καταλοίπων.

#### 3.2 Αντιδραστήρες εν λειτουργία

Από τη δεκαετία του 50 μέχρι σήμερα έχει λειτουργήσει, ανά τον κόσμο, μεγάλος αριθμός πυρηνικών αντιδραστήρων. Στοιχεία για τους εν λειτουργία αντιδραστήρες ισχύος<sup>7</sup> και για το μέγεθος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγουν παρουσιάζονται στο Παράρτημα Ι. Κατά το 2004, λειτουργούσαν 437 αντιδραστήρες ισχύος με συνολική εγκατεστημένη ισχύ περίπου 363 GWe και ευρίσκοντο υπό κατασκευήν 30 αντιδραστήρες ισχύος. Για την πρόωση

<sup>7</sup> Αντιδραστήρες ισχύος: με ισχύ εκατοντάδες MW, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.

περίπου 200 πολεμικών πλοίων και υποβρυχίων χρησιμοποιούνται περισσότεροι από 200 πυρηνικοί αντιδραστήρες.

Μέτρο της τεχνολογικής εμπειρίας είναι ο αριθμός των «ετών-αντιδραστήρα» (reactor-years), π.χ. αν 10 αντιδραστήρες λειτουργούν επί 5 έτη, λέγεται ότι υπάρχουν 50 «έτη-αντιδραστήρα». Σήμερα υπάρχουν συσσωρευμένα περισσότερα από 12.000 «έτη-αντιδραστήρα»<sup>8</sup>. Ο αριθμός των ατυχημάτων ανά «έτος-αντιδραστήρα» είναι επίσης μέτρο της ασφάλειας.

Θεσμοθετημένος δείκτης της ασφάλειας είναι η πιθανή συχνότητα να συμβεί ατύχημα τήξης της καρδιάς, το οποίο, όπως ελέγχθη αποτελεί ατύχημα βάσης σχεδιασμού. Η προδιαγραφή της Nuclear Regulatory Commission (NRC, Ρυθμιστική Αρχή των ΗΠΑ) είναι σχεδιασμός αντιδραστήρων ώστε η πιθανή συχνότητα να είναι μικρότερη από 1 στα 10.000 έτη. Οι απαιτήσεις-προδιαγραφές των εταιριών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ είναι για πιθανή συχνότητα μικρότερη από 1 στα 100.000 έτη. Τα καλύτερα σύγχρονα πυρηνικά εργοστάσια έχουν πιθανή συχνότητα μικρότερη από 1 στα 1.000.000 έτη και για τις μονάδες που σχεδιάζονται για την επόμενη δεκαετία προδιαγράφεται συχνότητα σχεδόν μικρότερη από 1 στα 10 εκατομμύρια έτη. Παρόμοια ισχύουν στα άλλα προηγμένα κράτη.



**Σχήμα 3.1:** Συσσωρευμένα έτη αντιδραστήρων.<sup>9</sup>

Αναφορικά με την ανέλιξη των πυρηνικών αντιδραστήρων είναι δυνατόν να διακριθούν οι εξής γενιές:

#### Πρώτη γενιά

Οι πειραματικοί και πρότυποι αντιδραστήρες που αναπτύχθηκαν και εγκαταστάθηκαν τις δεκαετίες του 50 και 60. Οι πρότυποι αντιδραστήρες έχουν αξιόλογη ισχύ (σε αντιδιαστολή με

*Πειραματικοί αντιδραστήρες: με μικρή θερμική ισχύ (από μερικές εκατοντάδες Watt ως μερικές δεκάδες MW). Χρησιμοποιούνται κυρίως για έλεγχο-έρευνα υλικών, παραγωγή ραδιοϊσοτόπων και συνήθως, δεν παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.*

<sup>8</sup> OECD Observer No. 258/259, December 2006

<sup>9</sup> "Safety of Nuclear Power Reactors" (2008) World Nuclear Association

τους πειραματικούς) με κύριο σκοπό, όχι την παραγωγή ενέργειας, αλλά τη διερεύνηση και επίλυση προβλημάτων προκειμένου να σχεδιασθεί εμπορικός τύπος αντιδραστήρα. Σχεδόν κανείς από αυτούς δεν βρίσκεται σήμερα σε λειτουργία.

### **Δεύτερη γενιά**

Οι εμπορικοί αντιδραστήρες (κύριος σκοπός η παραγωγή ενέργειας) ο σχεδιασμός των οποίων βασίστηκε στην πείρα της πρώτης γενιάς. Η μεγάλη πλειοψηφία των αντιδραστήρων που λειτουργούν σήμερα βασίστηκε σε αρχές αυτής της γενιάς. Οι αντιδραστήρες αυτοί επέδειξαν αξιοπιστία και ασφάλεια, αν ληφθεί υπόψη ότι σε όλα αυτά τα έτη λειτουργίας, τόσων αντιδραστήρων, με περισσότερα από 12.000 «έτη-αντιδραστήρα», συνέβη ένα μόνο ατύχημα με σοβαρές συνέπειες στο περιβάλλον. Διατίθενται όμως σήμερα από πολύ καλύτερα και ασφαλέστερα συστήματα αντιδραστήρων.

### **Τρίτη γενιά**

Εξελιγμένοι (evolutionary) ή προηγμένοι (advanced) αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος **με κλασσικά (ενεργητικά) συστήματα ασφάλειας** (ALWR: Advanced Light Water Reactor). Προέκυψαν από την πολυετή εμπειρία των αντιδραστήρων δεύτερης γενιάς, από εμπειρία πολλών χιλιάδων «ετών-αντιδραστήρα». Σε σχέση με αυτούς της γενιάς II, μεταξύ άλλων, έχουν: (α) απλούστερο και βελτιωμένο σχεδιασμό που παρέχει ευκολότερη λειτουργία και μεγαλύτερη αντίσταση σε λειτουργικά σφάλματα, (β) μεγαλύτερη διαθεσιμότητα (συντελεστή φορτίου) και χρόνο ζωής (τυπικά 60 έτη έναντι 30 ετών των αντιδραστήρων δεύτερης γενιάς<sup>10</sup>), (γ) σημαντικά μικρότερη πιθανότητα ατυχημάτων τήξης της καρδιάς, (δ) αντίσταση σε σοβαρή ζημιά από πρόσκρουση αεροπλάνου, σε σχέση με διαφυγές ραδιενεργών προϊόντων, (ε) καλύτερη αξιοποίηση του σχάσιμου υλικού (higher fuel burn-up) και μεγαλύτερο χρόνο ζωής καυσίμου στον αντιδραστήρα, άρα μεγαλύτερο χρόνο αυτονομίας. Δύο είναι οι ήδη αναπτυγμένοι τύποι: (ι) ζέοντος ύδατος (ABWR: Advanced Boiling Water Reactor) και (β) πεπιεσμένου ύδατος (APR: Advanced Pressurized Reactor, EPR: European Pressurized Reactor ή Evolutionary Power Reactor)

Δύο ABWR λειτουργούν από το 1996 και ένας ακόμα είναι υπό κατασκευή στην Ιαπωνία, ενώ δύο είναι υπό κατασκευή στην Ταϊβάν (αναμενόμενος χρόνος λειτουργίας 60 έτη, συντελεστής φορτίου 90%). Επίσης ένας EPR είναι υπό κατασκευή στη Φινλανδία, αρχίζει η κατασκευή ενός στη Γαλλία, και δύο προγραμματίζονται στην Κίνα. Ένας APR αναμένεται να λειτουργήσει μετά το 2010 στη Νότια Κορέα. Εν κατακλείδι, ρωσικοί αντιδραστήρες Advanced PWR, με παθητικά συστήματα ασφάλειας, κατασκευάζονται στην Ινδία και στην Κίνα, ενώ δύο προγραμματίζονται για το Belene της Βουλγαρίας. Ο Ρωσικός AES-92 είναι πιστοποιημένος ότι πληροί τους κανονισμούς ασφάλειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης

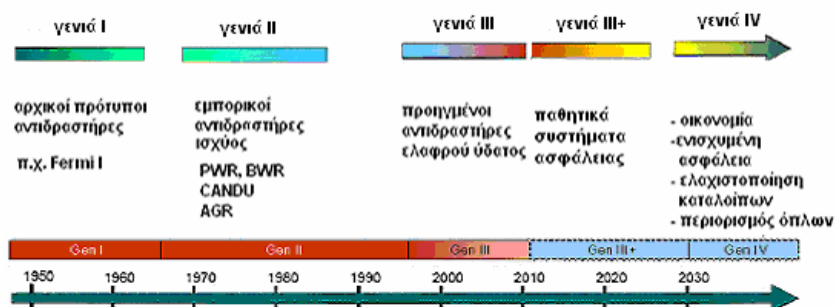
### **Τρίτη γενιά + : Ανάπτυξη στο εγγύς μέλλον**

Η **σημαντικότερη βελτίωση ασφάλειας**, σε σχέση με τη δεύτερη γενιά, είναι ότι θα ενσωματώνουν **παθητικά συστήματα ασφάλειας**, στα οποία τα ενεργά συστήματα (π.χ. αντλίες) αντικαθίστανται με παθητικά συστήματα που βασίζονται σε φυσικές δυνάμεις (βαρύτητα, αποθηκευμένη ενέργεια, παθητική μεταφορά θερμότητας στο περιβάλλον, παθητική έκτακτη ψύξη καρδιάς κ.α.) και όχι σε λειτουργικότητα σχεδιασμένων μηχανισμών κατόπιν ηλεκτρικής ή μηχανικής εντολής. Θα έχουν καλύτερη ασφάλεια **με πολύ ουσιαστική απλοποίηση του συστήματος**.

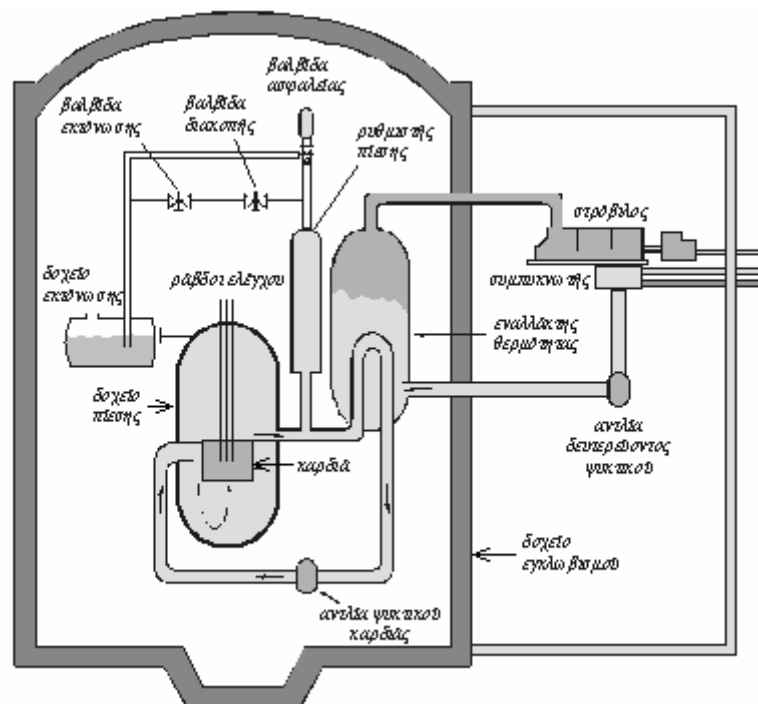
**Τέταρτη γενιά:** Διεθνής συμφωνία (Αργεντινή, Βραζιλία, Καναδάς, Κίνα, Ευρατόμ, Γαλλία, Ιαπωνία, Κορέα, Ρωσία, Νότιος Αφρική, Ελβετία, Αγγλία, ΗΠΑ) ερευνητικής συνεργασίας για προηγμένα πυρηνικά ενεργειακά συστήματα. Δεν αναμένεται να είναι διαθέσιμα για εμπορική κατασκευή προ του 2030, με εξαίρεση τον Very High

<sup>10</sup> Ο προβλεπόμενος, συντηρητικός, χρόνος ήταν 25 με 30 έτη λειτουργίας, αλλά πολλοί απ' αυτούς έχουν υπερβεί τα 40 έτη, παράγοντας έτσι, σήμερα, αφού έχουν αποσβέσει το κεφάλαιο, πολύ φθηνή ηλεκτρική ενέργεια.

## ΑΝΕΛΙΞΗ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΩΝ



Το αυτόματο σύστημα ελέγχου σταμάτησε την λειτουργία του στροβίλου και σταμάτησε τη λειτουργία του αντιδραστήρα, μηδένισε δηλαδή τον ρυθμό των σχάσεων, σε χρόνο περίπου ενός δευτερολέπτου. Παρέμεινε όμως μεγάλη παραγωγή θερμικής ισχύος από τη διάσπαση των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης. Οπότε, άρχισε να ανεβαίνει η πίεση στο πρωτεύον κύκλωμα του ψυκτικού. Το αυτόματο σύστημα ελέγχου, προκειμένου να συγκρατηθεί η αύξηση της πίεσης, άνοιξε, ως όφειλε, μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα από το κλείσιμο του αντιδραστήρα, τη βαλβίδα εκτόνωσης του ρυθμιστή πίεσης (Σχήμα 3.2) και άρχισε να εκτονώνει μέρος του ψυκτικού του πρωτεύοντος κυκλώματος στο δοχείο εκτόνωσης. Σύμφωνα με τα προβλεπόμενα, τη σχεδίαση και την κατασκευή, όταν η πίεση μειώθηκε κάτω από ορισμένη τιμή, η βαλβίδα έπρεπε να κλείσει. Όμως αστόχησε, δεν έκλεισε, με συνέπεια τη διαρροή ζωτικού ψυκτικού έξω από το πρωτεύον κύκλωμα. Το γεγονός αυτό συνιστά αστοχία μηχανήματος.



Οι χειριστές πίστευαν ότι η βαλβίδα είχε κλείσει, διότι τα όργανα έδειξαν ότι είχε σταλεί στην βαλβίδα σήμα με εντολή κλεισίματος. Σοβαρό λάθος σχεδιασμού ήταν το γεγονός ότι δεν υπήρχε όργανο ένδειξης της πραγματικής θέσης της βαλβίδας, με συνέπεια να μην αντιληφθούν οι χειριστές ότι η βαλβίδα παρέμενε ανοιχτή και το ψυκτικό διέρρεε, δια της ανοιχτής βαλβίδας. Το ατύχημα είχε αρχίσει. Το ψυκτικό του πρωτεύοντος κυκλώματος συνέχιζε να διαρρέει, με αποτέλεσμα την ελλιπή ψύξη και την υπερθέρμανση της καρδιάς. Καθώς το ψυκτικό διέρρεε έξω από το πρωτεύον κύκλωμα, τα διαθέσιμα στους χειριστές σήματα παρείχαν συγκεχυμένες πληροφορίες. Δεν υπήρχε όργανο μέτρησης της στάθμης του ψυκτικού στην καρδιά. Οι χειριστές, βλέποντας υψηλή στάθμη του ψυκτικού στον ρυθμιστή πίεσης, υπέθεταν ότι η καρδιά ήταν πλήρως καλυμμένη με ψυκτικό. Αυτά συνιστούν λάθη σχεδιασμού.

- 17 -

χειριστές προέβησαν σε σειρά ενεργειών, που έκαναν την κατάσταση ακόμα χειρότερη διότι περιορίσαν ακόμη περισσότερο τη ροή του ψυκτικού δια της καρδιάς. Τα γεγονότα που ακολούθησαν αποδεικνύουν ελλιπή εκπαίδευση των χειριστών.

Η ελλιπής ψύξη της καρδιάς προκάλεσε υπερθέρμανση του καυσίμου, με αποτέλεσμα τήξη και θραύση του περιβλήματος (κράμα ζirkονίου) ράβδων καυσίμου και του καυσίμου. Στα αρχικά στάδια του ατυχήματος έγινε τήξη περίπου της μισής καρδιάς, συνέβη δηλαδή το σοβαρότατο ατύχημα τήξης μεγάλου μέρους της καρδιάς. Εν τούτοις, δεν προκλήθηκε ρήξη του δοχείου πίεσης.

Το απόγευμα της 28<sup>ης</sup> Μαρτίου, έγινε αντιληπτή η φύση του ατυχήματος και εν τέλει, στις 19:50, οι χειριστές επέφεραν βεβιασμένη κυκλοφορία του ψυκτικού και τον αντιδραστήρα σε σταθερή κατάσταση. Βεβαίως, ο αντιδραστήρας είχε πλέον οριστικά καταστραφεί. Στις 7 Απριλίου οι χειριστές επέβαλαν φυσική κυκλοφορία του ψυκτικού, με αποτέλεσμα την ψύξη της καρδιάς, χωρίς λειτουργία των αντλιών. Μετά από αυτό εξέλιπε οποιοσδήποτε περαιτέρω κίνδυνος.

Αιτία του ατυχήματος υπήρξε ένας **συνδυασμός αστοχίας μηχανών, ανεπαρκούς σχεδιασμού και λαθών προσωπικού, λόγω ανεπαρκούς εκπαίδευσης**. Η ανάλυση των γεγονότων του ατυχήματος οδήγησε σε δραστικές μόνιμες αλλαγές και βελτιώσεις στον σχεδιασμό των πυρηνικών αντιδραστήρων, στην εκπαίδευση του προσωπικού, στη διαδικασία αδειοδότησης αντιδραστήρων και προσωπικού, στον σχεδιασμό αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης και στην οργάνωση της Ρυθμιστικής Αρχής των ΗΠΑ, NCR, υπεύθυνη για τον έλεγχο της ασφάλειας των πυρηνικών εγκαταστάσεων και την προστασία του πληθυσμού και του περιβάλλοντος από τη ραδιενέργεια.

Ως προς τις διαρροές ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον: ελήφθησαν εκατοντάδες περιβαλλοντικών δειγμάτων γύρω από τον σταθμό. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν συνήθεις συγκεντρώσεις ραδιενεργών υλικών, με εξαίρεση τα ευγενή αέρια, και πρακτικά καθόλου ιώδιο.

Κατά τη διάρκεια του ατυχήματος πραγματοποιήθηκαν εκροές, ελεγχόμενες και μη ελεγχόμενες, ραδιενεργών αερίων (κυρίως ευγενών αερίων) στο περιβάλλον. Το πρωί της 30 Μαρτίου πραγματοποιήθηκε σημαντική ελεγχόμενη εκροή ραδιενέργειας στο περιβάλλον, προκειμένου να μειωθεί η πίεση στο πρωτεύον κύκλωμα και να διευκολυνθεί η ροή του ψυκτικού στην καρδιά. Αυτό προκάλεσε αβεβαιότητα και σύγχυση στις αρχές και, εν τέλει, ο κυβερνήτης της Πενσυλβάνια, μετά από υπόδειξη της NRC, συνέστησε την απομάκρυνση των εγκύων γυναικών και των παιδιών προσχολικής ηλικίας από μία ακτίνα πέντε μιλίων γύρω από τον σταθμό. Στους μήνες που ακολούθησαν μετά το ατύχημα, αναλύθηκαν χιλιάδες περιβαλλοντικών δειγμάτων όπως αέρα, ύδατος, γάλακτος, βλάστησης, εδάφους και τροφίμων. Από τις μετρήσεις προκύπτει ότι είναι δυνατόν να αποδοθούν στο ατύχημα εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα ραδιονουκλιδίων στα δείγματα και ότι οι συνέπειες των εκροών ραδιενέργειας στο περιβάλλον, είναι αμελητέες.

Ως προς τις επιπτώσεις του ατυχήματος στην υγεία, σειρά ανεξαρτήτων μελετών, μεταξύ άλλων από την NRC, την Environmental Protection Agency και το Department of Health, βρήκαν ότι οι διαρροές ραδιενέργειας στο περιβάλλον ήταν πολύ μικρές, πολύ μικρότερες από τα επίπεδα τα σχετιζόμενα με δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία. Η μέση δόση στον πληθυσμό που βρισκόταν σε ακτίνα 10 μιλίων από το σταθμό ήταν, λόγω των διαρροών από το ατύχημα, 3% της μέσης ετήσιας δόσης από φυσική ραδιενέργεια. Για οποιοδήποτε άτομο του κοινού η δόση δεν υπήρξε μεγαλύτερη από το 38% της μέσης ετήσιας δόσης από φυσική ραδιενέργεια. Δεδομένης της ανησυχίας του κοινού για πιθανές επιπτώσεις στην υγεία, το Υπουργείο Υγείας της Πενσυλβάνια συνέταξε, και διατήρησε για 18 έτη, αρχείο παρακολούθησης της υγείας περισσότερων των 30.000 ατόμων, που ζούσαν την εποχή του ατυχήματος σε ακτίνα 5 μιλίων από τον σταθμό. Η ενημέρωση του αρχείου σταμάτησε το 1997. Δεν διαπιστώθηκαν ασυνήθεις τάσεις, ως προς την υγεία, στην περιοχή. Οι μόνες παρατηρήσιμες επιπτώσεις στην υγεία ήταν ψυχολογικές πιέσεις, κατά τη διάρκεια του ατυχήματος και μετά από αυτό.

Ο καθαρισμός του κατεστραμμένου αντιδραστήρα άρχισε το 1979, διήρκεσε 12 έτη και στοίχισε περίπου 973 εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ. Περίπου 1% του κατεστραμμένου καυσίμου παραμένει στο δοχείο πίεσης του αντιδραστήρα. Η μονάδα-1 επανατέθηκε σε λειτουργία το 1985 και λειτουργεί έκτοτε σε υψηλά επίπεδα ασφάλειας και αξιοπιστίας, ως αποτέλεσμα εφαρμογής των συμπερασμάτων από το ατύχημα στη μονάδα-2.

### **3.3.3 Το ατύχημα στο Τσέρνομπιλ**

#### **3.3.3.1 Τα αίτια και η κατάληξη του ατυχήματος<sup>11</sup>**

Στις 26 Απριλίου 1986 στον αντιδραστήρα 4 του πυρηνικού σταθμού του Τσέρνομπιλ, στην Ουκρανία της πρώην Σοβιετικής Ένωσης, συνέβη πολύ μεγάλο ατύχημα, το μεγαλύτερο που έχει συμβεί ποτέ στην πυρηνική βιομηχανία. Υπήρξαν χρονικά εκτεταμένες διαρροές μεγάλων ποσοτήτων ραδιενεργών ρύπων στην ατμόσφαιρα. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ατυχήματος και οι τότε επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες επέφεραν τη διασπορά πολλαπλών ραδιενεργών νεφών σε μεγάλη έκταση στο Βόρειο Ημισφαίριο. Ραδιενεργοί ρύποι από το ατύχημα μετρήθηκαν όχι μόνο στην Ευρώπη, αλλά και στον Καναδά, την Ιαπωνία και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Το Νότιο Ημισφαίριο δεν ρυπάνθηκε.

Ο πυρηνικός σταθμός του Τσέρνομπιλ βρίσκεται πολύ κοντά στα σύνορα Ουκρανίας, Λευκορωσίας και Ρωσίας, περίπου 130 χιλιόμετρα βόρεια από το Κίεβο, την πρωτεύουσα της Ουκρανίας. Σε ακτίνα 30 χιλιομέτρων από τον σταθμό κατοικούσαν σε πόλεις χωριά και οικισμούς 115.000 ως 135.000 άνθρωποι. Δίπλα στο σταθμό ρέει ο ποταμός Πρίπιατ, ο οποίος διέρχεται από το Κίεβο και είναι παραπόταμος του ποταμού Δνείπερου, ο οποίος καταλήγει στη Μαύρη Θάλασσα.

Από τους 4 αντιδραστήρες που λειτουργούσαν στον πυρηνικό σταθμό του Τσέρνομπιλ, όλοι του τύπου RMBK (συνοπτική τεχνική περιγραφή στο Παράρτημα III), η μονάδα 4 καταστράφηκε από το ατύχημα το 1986, η μονάδα 2 έκλεισε το 1991 μετά από πυρκαγιά στην αίθουσα του ατμοστροβίλου, η μονάδα 1 έκλεισε το 1977 και η μονάδα 3 το 2000, μετά από διεθνή πίεση.

Είχε προγραμματισθεί κλείσιμο ρουτίνας του αντιδραστήρα της μονάδας-4 στις 25 Απριλίου 1986, για λόγους συντήρησης. Είχε επίσης προγραμματισθεί για την ίδια μέρα, μετά τη μείωση της ισχύος του αντιδραστήρα, η διεξαγωγή του εξής πειράματος: διακοπή της παροχής ατμού στον ατμοστρόβιλο και μέτρησή της μετά τούτο χρονικής διάρκειας κατά την οποία ο άξονας του στροβίλου εξακολουθεί (λόγω αδράνειας) να περιστρέφεται, ώστε να εξακολουθεί η γεννήτρια να παράγει ηλεκτρική ισχύ. Το θέμα αυτό έχει πρακτικό ενδιαφέρον στην περίπτωση που σταματούσε η παροχή ηλεκτρικής ισχύος στην πυρηνική μονάδα (μπλακάουτ). Για τέτοιες περιπτώσεις προβλέπεται η αυτόματη θέση σε λειτουργία ηλεκτροπαραγωγών ζευγών για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στα συστήματα ασφάλειας της μονάδας. Σκοπός του πειράματος ήταν ο έλεγχος της ικανότητας του συστήματος να παρέχει ηλεκτρική ισχύ στα συστήματα ασφάλειας, μέχρις ότου εκκινήσουν τα ηλεκτροπαραγωγικά ζεύγη. Το ατύχημα υπήρξε συνέπεια της προσπάθειας, και της επιμονής, υλοποίησης αυτού του πειράματος. Παρόμοια πειράματα είχαν μέχρι τότε διεξαχθεί στο Τσέρνομπιλ και σε άλλους σταθμούς, παρά το γεγονός ότι ήταν γνωστή η αστάθεια των αντιδραστήρων αυτών σε χαμηλές τιμές ισχύος, λόγω σοβαρού λάθους σχεδιασμού.

Οι αιτίες του ατυχήματος είναι δυνατόν να συνοψιστούν ως εξής :

**Σοβαρό λάθος σχεδιασμού του αντιδραστήρα.** Ουσιώδεις και επικίνδυνος χαρακτηριστικό αυτού του αντιδραστήρα είναι ότι σε χαμηλές τιμές ισχύος (π.χ. λιγότερο από 700 MW θερμικής ισχύος) η ανάδραση κενού (δες Παράρτημα III) είναι ισχυρά θετική. Η ιδιότητα αυτή, καθιστούσε τον αντιδραστήρα ευάλωτο να τεθεί εκτός ελέγχου σε περίπτωση λανθασμένων χειρισμών, όπως ήταν αυτοί που συνέβησαν στο συγκεκριμένο ατύχημα. Αυτό δε συνέβαλε

---

<sup>11</sup> *Chernobyl Ten Years On. NEA OECD (1995),  
World Nuclear Association. Information and issue Briefs. Chernob (Marylch 2001)*

καθοριστικά στο ατύχημα. Η επιστημονική ιεραρχία της Σοβιετικής Ένωσης γνώριζε από καιρό αυτό το επικίνδυνο χαρακτηριστικό του αντιδραστήρα και ουδέν έπραξε για την αντιμετώπισή του. Είναι για τον λόγο αυτό, και όχι μόνον, η ευθύνη της για το ατύχημα μεγάλη. Μετά το ατύχημα εφαρμόσθηκε, με τεχνική και οικονομική βοήθεια της Δύσης, μια σειρά από τεχνικές επεμβάσεις στους εν λειτουργία αντιδραστήρες αυτού του τύπου στην πρώην Σοβιετική Ένωση, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του βαθμού θετικής ανάδρασης και τη σημαντική βελτίωση της ασφάλειας.

**Ελλιπής εκπαίδευση του προσωπικού**, το οποίο δεν είχε επαρκή γνώση της σοβαρότητας αυτού του λάθους σχεδιασμού και δεν γνώριζε ότι το πείραμα θα μπορούσε να οδηγήσει τον αντιδραστήρα σε τέτοια εκρηκτική κατάσταση. Δεν αντελήφθησαν επανειλημμένα σήματα του συστήματος που υπεδείκνυαν πορεία προς αστάθεια.

**Έλλειψη παιδείας ασφάλειας** ("safety culture"). Οι χειριστές **παραβίασαν επανειλημμένα τις προδιαγεγραμμένες διαδικασίες** ασφάλειας προκειμένου να πραγματοποιηθεί το πείραμα. **Έθεσαν εκτός λειτουργίας τα αυτόματα συστήματα ασφάλειας του αντιδραστήρα, τα οποία οδηγούσαν στο κλείσιμο του αντιδραστήρα**, πράγμα που συνεπάγεται τη ματαίωση του πειράματος. Αν είχαν αφήσει το αυτόματο σύστημα ασφάλειας εν λειτουργία, το ατύχημα θα είχε αποφευχθεί ή τουλάχιστον δεν θα είχε πάρει αυτήν την τραγική έκταση. Παρά τους ρητούς κανονισμούς, απέσυραν το σύνολο σχεδόν των ράβδων ελέγχου από την καρδιά, προκειμένου να διατηρήσουν την ισχύ για την πραγματοποίηση του πειράματος, με αποτέλεσμα, όταν τελικά αντελήφθησαν ότι ο αντιδραστήρας βρισκόταν σε προχωρημένη πορεία ατυχήματος και επιβαλλόταν το άμεσο κλείσιμο, ο απαιτούμενος χρόνος καθόδου στην καρδιά των ράβδων ελέγχου ήταν πολύ μεγάλος για να προλάβει την ταχύτατα προϋούσα καταστροφή.

Η ταχεία αύξηση της ισχύος, με την συνεπαγόμενη ταχεία αύξηση της θερμοκρασίας καυσίμου, προκάλεσε θρυμματισμό και κονιορτοποίηση μέρους του καυσίμου, επαφή του θρυμματισμένου καυσίμου με το υγρό ψυκτικό νερό, με αποτέλεσμα ταχεία μεταφορά θερμότητας στο υγρό ψυκτικό και ταχύτατη παραγωγή ατμού, δηλαδή έκρηξη ατμού. Αυτή η μεγάλη παραγωγή ατμού (κενού) επέφερε, λόγω της θετικής ανάδρασης κενού, περαιτέρω μεγάλη αύξηση της ισχύος, που οδήγησε στην εξάτμιση του καυσίμου στο κέντρο μερικών συστάδων καυσίμου. Αυτή τερματίστηκε με μεγάλη έκρηξη από την ταχεία εκτόνωση των ατμών του καυσίμου περίπου στις 01:24. Αυτή η έκρηξη διέλυσε την καρδιά, εκτίναξε το «καπάκι» της καρδιάς (οπότε αυτή εκτέθηκε στην ατμόσφαιρα) και κατάρτησε το μεγαλύτερο μέρος του κτηρίου. Καύσιμο, εξαρτήματα της καρδιάς και δομικά στοιχεία εκτινάχθηκαν από τον αντιδραστήρα στις στέγες διπλανών κτηρίων και στο έδαφος γύρω από το κτήριο του αντιδραστήρα. Ο αντιδραστήρας είχε καταστεί πλέον κρατήρας που περιείχε, μεταξύ άλλων, τηγμένο πυρηνικό καύσιμο. Επέφερε επίσης μείζονα διαρροή ραδιενεργών υλικών γύρω από το κτήριο του αντιδραστήρα. Τα διασκορπισμένα από την έκρηξη συντρίμια και ο κονιορτός της καρδιάς προκάλεσαν περισσότερες από 30 πυρκαγιές στις στέγες των κτηρίων του αντιδραστήρα και της στροβιλογεννήτριας, οι οποίες ήταν καλυμμένες με την εξαιρετικά εύφλεκτη πίσσα. Πυρκαγιές επεκτάθηκαν ως τα όρια του κτηρίου του αντιδραστήρα της μονάδας-3. Οι δραστηριότητες ελέγχου της πυρκαγιάς, κάτω από εξαιρετικά δύσκολες συνθήκες με πυκνό καπνό και πολύ υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας, προκάλεσαν τον θάνατο πέντε πυροσβεστών.

Περίπου στις 21:41, δηλαδή 20 ώρες μετά την έκρηξη, άρχισε μεγάλη πυρκαγιά, καθώς τα υλικά στον αντιδραστήρα απέκτησαν αρκετά υψηλές θερμοκρασίες ώστε να προκαλέσουν ανάφλεξη αερίων, π.χ. υδρογόνου (που προήλθε από χημικές αντιδράσεις του θερμού ζirkονίου του περιβλήματος των ράβδων καυσίμου με νερό) και CO (που προήλθε από αντιδράσεις του θερμού γραφίτη με ατμό). Η πυρκαγιά είχε μεγάλη φλόγα, που αρχικά έφτασε τα 50 μέτρα πάνω από τον κατεστραμμένο αντιδραστήρα. Ακολούθησε ανάφλεξη του γραφίτη.

Οι αυξημένοι ρυθμοί εκπομπής ραδιενεργών ρύπων στην ατμόσφαιρα από την 7<sup>η</sup> έως την 10<sup>η</sup> μέρα μετά το ατύχημα αποδόθηκαν στην αυξανόμενη θερμοκρασία του καυσίμου στον

αντιδραστήρα. Το απότομο τέλος της εκπομπής ραδιενεργών ρύπων στην ατμόσφαιρα συνέβη μετά το σταμάτημα της πυρκαγιάς του γραφίτη (5 Μαΐου).

Μετά την κατάσβεση της πυρκαγιάς του γραφίτη, άρχισαν εργασίες κατασκευής μιας τεράστιας πλάκας από προεντεταμένο σκυρόδεμα κάτω από τον αντιδραστήρα. Η πλάκα αυτή περιείχε σύστημα ψύξης. Αυτό έγινε με εκσκαφή σήραγγας που άρχιζε κάτω από τη μονάδα-3. Πήραν μέρος περίπου 400 άνθρωποι και η κατασκευή ολοκληρώθηκε σε 15 ημέρες. Αυτή η πλάκα θα χρησίμευε, αφ' ενός για να ψύξει το καύσιμο και, αφ' ετέρου για να εμποδίσει ενδεχόμενη διείσδυση τηγμένου ραδιενεργού υλικού στον υδροφόρο ορίζοντα.

Μετά το ατύχημα, ο κατεστραμμένος αντιδραστήρας εγκλωβίστηκε σε μια δομή από περίπου 300.000 τόνους σκυροδέματος και σιδήρου, η οποία ονομάστηκε «περίβλημα», ή «σαρκοφάγος». Η σαρκοφάγος αποτελεί προσωρινό φραγμό των ραδιενεργών περιεχομένων της και όχι κατασκευή μακροχρόνιας ασφαλούς διαχείρισης. Για την οριστική επίλυση του προβλήματος απαιτείται διεθνής επιστημονική, οικονομική και πολιτική συνεργασία. Σχετικές μελέτες έχουν γίνει από διεθνείς ομάδες στο πρόσφατο παρελθόν.

### **3.3.3.2 Διασπορά ραδιενεργών υλικών<sup>12</sup>**

Οι εκρήξεις στις 01:23 του Σαββάτου 26 Απριλίου 1986 εκτόξευσαν πίδακα από θερμά και ραδιενεργά σωματίδια στην ατμόσφαιρα. Η στήλη του καπνού και των ραδιενεργών σωματιδίων υψώθηκε έως ένα περίπου χιλιόμετρο στην ατμόσφαιρα. Τα πιο βαριά σωματίδια εναποτέθηκαν στο έδαφος σχετικά κοντά στον σταθμό. Τα ελαφρύτερα συστατικά, συμπεριλαμβανομένων προϊόντων της σχάσης, παρασύρθηκαν από τον άνεμο βορειοδυτικά του σταθμού. Οι εκροές ραδιενεργών ρύπων συνεχίστηκαν για 20 περίπου ημέρες μετά το ατύχημα, αλλά ήταν πολύ μικρότερες μετά την δέκατη ημέρα, οπότε σβήστηκε η πυρκαγιά. Η έντονη πυρκαγιά του γραφίτη ανύψωνε τους ραδιενεργούς ρύπους σε μεγάλα ύψη στην ατμόσφαιρα. Τα μεγαλύτερα και βαρύτερα σωματίδια, κυρίως σωματίδια κονιορτού του καυσίμου, έπεσαν και εναποτέθηκαν στο έδαφος σε έκταση 100 περίπου χιλιομέτρων από τον σταθμό. Τα μικρότερα σωματίδια παρασύρονταν από τους ανέμους σε μεγάλες αποστάσεις. Στις περιοχές όπου βρισκόταν το ραδιενεργό νέφος και συνέβαιναν ταυτόχρονα βροχοπτώσεις, εναποτίθεντο ραδιενεργοί ρύποι στα εδάφη. Κατά τη διάρκεια των δέκα πρώτων ημερών, κατά τις οποίες συνέβησαν οι σημαντικές διαρροές, οι μετεωρολογικές συνθήκες άλλαζαν συχνά, με αποτέλεσμα σημαντικές μεταβολές στις κατευθύνσεις διασποράς του ραδιενεργού νέφους.

Η μεγάλη χρονική διάρκεια των εκροών, τα μεγάλα ύψη στην ατμόσφαιρα στα οποία ανυψώθηκαν οι ρύποι λόγω πυρκαγιάς του γραφίτη και οι συχνές αλλαγές στην κατεύθυνση των ανέμων είχαν ως αποτέλεσμα τη διασπορά του ραδιενεργού νέφους και την εναπόθεση ραδιενεργών ρύπων σε εδάφη σε εξαιρετικά μεγάλη έκταση, που συμπεριλάμβανε ολόκληρο το Βόρειο ημισφαίριο. Αξιόλογη όμως, ρύπανση έξω από την πρώην Σοβιετική Ένωση υπήρξε σε τμήματα μόνο της Ευρώπης. Το μέγεθος της ρύπανσης των εδαφών είχε μεγάλες διαφορές από θέση σε θέση, ακόμα και μεταξύ μικρών αποστάσεων, λόγω διαφορετικών βροχοπτώσεων κατά τη δίοδο του νέφους και διαφορετικών διαμορφώσεων των επιφανειακών εδαφών. Αυτή η γεωγραφική ανομοιογένεια των εναποθέσεων υπήρξε ιδιαίτερα μεγάλη σε μεγάλες αποστάσεις από το Chernobyl, όπως π.χ. στη χώρα μας.

Στο Παράρτημα III παρατίθενται οι εκτιμήσεις (UNSCEAR 2000) για τις πιο σημαντικές συνολικές εκροές από άποψη δόσεων και, προκειμένου να υπάρξει αίσθηση της διάστασης των μεγεθών αυτών και μέτρο σύγκρισης, παρατίθενται στον ίδιο πίνακα οι αντίστοιχες τιμές της συνολικής έκλυσης ραδιενέργειας από τις δοκιμές των πυρηνικών όπλων στην ατμόσφαιρα στο διάστημα 1945 έως 1980. Προκύπτει ότι οι συνολικές εκλύσεις

<sup>12</sup> UNSCEAR 1998, UNSCEAR 2000

*Chernobyl Ten Years On. NEA OECD (1995)*

*International Atomic Energy Agency. Int. Conference: One decade after Chernobyl, Summing up the consequences of the accident (1996)*

ραδιενέργειας από τις πυρηνικές δοκιμές είναι μεγαλύτερες από αυτές του ατυχήματος κατά 517 φορές για το ιώδιο-131, κατά 18 φορές για το καίσιο-137 και κατά 85 φορές για το στρόντιο-90.

Παρόμοια είναι η σχέση μεταξύ ατυχήματος και πυρηνικών δοκιμών και για άλλα ραδιονουκλίδια. Σε κάθε περίπτωση, οι συνολικές εκλύσεις ραδιενέργειας από τις πυρηνικές δοκιμές στην ατμόσφαιρα είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του ατυχήματος του Τσέρνομπιλ. Οι διαφορές μεταξύ των δύο είναι ότι η διασπορά της ρύπανσης από τις πυρηνικές δοκιμές έγινε σε όλο τον πλανήτη και σε μεγάλο χρονικό διάστημα, ενώ η ρύπανση από το ατύχημα έγινε σε σημαντικά μικρότερες περιοχές και σε σημαντικά μικρότερο χρονικό διάστημα. Αλλά και οι δόσεις λόγω του ατυχήματος στους πληθυσμούς μακριά από το Τσέρνομπιλ, όπως π.χ. στη χώρα μας, είναι σημαντικά μικρότερες από τις δόσεις λόγω των πυρηνικών δοκιμών.

Ως δείκτης αναφοράς (ως μέτρο) της ρύπανσης των εδαφών έχει διεθνώς επιλεγεί το καίσιο-137 (σύμβολο Cs-137, προϊόν της σχάσης) και είναι σύνηθες να θεωρείται μια περιοχή ως ρυπασμένη από το ατύχημα του Τσέρνομπιλ εφόσον η εναπόθεση Cs-137 είναι μεγαλύτερη από 37 kBq/m<sup>2</sup> (kBq ανά τετραγωνικό μέτρο εδάφους<sup>13</sup>). Το 3% περίπου της επιφάνειας του ευρωπαϊκού τμήματος της πρώην Σοβιετικής Ένωσης ρυπάνθηκε με εναποθέσεις Cs-137 μεγαλύτερες από 37 kBq/m<sup>2</sup>. Ο συνολικός πληθυσμός στην περιοχή αυτή είναι περίπου 5 εκατομμύρια.

Περιοχές με εναποθέσεις Cs-137 μεγαλύτερες από 555 kBq/m<sup>2</sup> χαρακτηρίστηκαν ως **περιοχές αυστηρού ελέγχου**. Στις περιοχές αυτές γινόταν συστηματική παρακολούθηση των επιπέδων ραδιενέργειας και ελήφθησαν μέτρα μείωσης των δόσεων στον πληθυσμό. Αυτές βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από 240 χιλιόμετρα από τον σταθμό του Τσέρνομπιλ, με εξαίρεση μια μικρή περιοχή (δες Παράρτημα ΙΙΙ). Το 1986 ο πληθυσμός που ζούσε σε αυτές τις περιοχές ήταν περίπου 273.000 άτομα σε έκταση 10.300 τετραγωνικών χιλιομέτρων και το 1995 είχε μειωθεί σε περίπου 150.000 άτομα, λόγω μεταναστεύσεων.

Εναποθέσεις στο έδαφος Cs-137 μεγαλύτερες από 1.500 kBq/m<sup>2</sup> υπήρξαν κυρίως στην περιοχή με απόσταση 30 χιλιομέτρων από τον πυρηνικό σταθμό (ονομαζόμενη **ζώνη των 30 χιλιομέτρων** ή **ζώνη αποκλεισμού**). Η περιοχή εντός αποστάσεως 30 χιλιομέτρων από αντιδραστήρα θεωρείτο και εξακολουθεί να θεωρείται ως περιοχή σημαντικού κινδύνου για τον πληθυσμό, σε περίπτωση μεγάλου ατυχήματος. Για τη ζώνη αυτή προβλέπεται ότι σε περίπτωση μεγάλου ατυχήματος ενδέχεται να χρειαστεί εκκένωση του πληθυσμού. Πράγματι, στη ζώνη αυτή η εναπόθεση Cs-137 είχε τις μέγιστες τιμές. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έγινε πράγματι εκκένωση του πληθυσμού, κυρίως της ζώνης των 30 χιλιομέτρων, αλλά όχι μόνον αυτής. **Σχεδόν το σύνολο των περιοχών με εναποθέσεις μεγαλύτερες από 1.500 kBq/m<sup>2</sup> βρίσκονται εντός ακτίνας 60 περίπου χιλιομέτρων από τον πυρηνικό σταθμό.**

**Η εναπόθεση στο έδαφος πλουτωνίου-239 και πλουτωνίου-240 υπήρξε αξιόλογη, από ραδιολογική άποψη, μόνον μέσα στη ζώνη των 30 χιλιομέτρων. Το ίδιο ισχύει και για την εναπόθεση στρόντιου-90.** Περιοχές με εναποθέσεις στρόντιου-90 μεγαλύτερες από 100 kBq/m<sup>2</sup> βρίσκονται σχεδόν πλήρως εντός της ζώνης των 30 χιλιομέτρων. Περιοχές στις οποίες η εναπόθεση στρόντιου-90 ήταν μεγαλύτερη από 37 kBq/m<sup>2</sup> βρίσκονται σχεδόν όλες σε ακτίνα μικρότερη από 100 χιλιόμετρα από τον πυρηνικό σταθμό.

Νέφη με ραδιενεργούς ρύπους διεσπάρησαν στο Βόρειο Ημισφαίριο και με βροχές εναπόθεσαν ραδιενεργούς ρύπους σε χώρες της Βόρειας Ευρώπης. Υπήρξαν περιοχές στις οποίες η εναπόθεση Cs-137 υπήρξε μεγαλύτερη από 37 kBq/m<sup>2</sup>, σε μεγάλη έκταση κυρίως στη Σουηδία, τη Νορβηγία, τη Φινλανδία, την Αυστρία και τη Βουλγαρία. Σε αυτές τις χώρες η εναπόθεση Cs-137 δεν ξεπέρασε τα 185 kBq/m<sup>2</sup>, εκτός από μικρό αριθμό περιοχών

<sup>13</sup> kBq=1000 Bq. 1 Bq = 1 Bequerel = 1 ραδιενεργός διάσπαση ανά sec. Όταν λέγεται ότι έγινε εναπόθεση τόσων kBq/m<sup>2</sup> του τάδε ραδιενεργού υλικού, εννοείται ότι εναποτέθηκε στο έδαφος τόση ποσότητα του υλικού ώστε να προκύπτουν τόσες διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο και ανά τετραγωνικό μέτρο εδάφους.

περιορισμένης έκτασης. Για τέτοια επίπεδα εναποθέσεων δεν αναμένονται παρατηρήσιμες επιπτώσεις στην υγεία του πληθυσμού. Τέλος, σημειώνεται ότι τα δίκτυα ελέγχου ραδιενέργειας περιβάλλοντος του Νότιου Ημισφαιρίου δεν ανίχνευσαν ραδιενεργούς ρύπους από το ατύχημα του Τσέρνομπιλ. Περισσότερα στοιχεία για τη διασπορά των ραδιενεργών ρύπων παρέχονται στο Παράρτημα ΙΙΙ.

### **3.3.3.3 Επιπτώσεις στην υγεία των πληθυσμών της πρώην ΕΣΣΔ<sup>14</sup>**

Αρχικά (27 Απριλίου 1986) έγινε εκκένωση της πόλης Πρίπιατ (40.000 άτομα), που βρίσκεται 3 χιλιόμετρα από τον κατεστραμμένο αντιδραστήρα. Στη συνέχεια, μέχρι τις 7 Μαΐου του 1986, εκκενώθηκαν οι πόλεις και τα χωριά σε ακτίνα 30 χιλιομέτρων γύρω από τον αντιδραστήρα, με την απομάκρυνση 90.409 ατόμων. Με βάση γεωγραφικά και ραδιολογικά κριτήρια, μέχρι το φθινόπωρο του 1986, απομακρύνθηκαν από περιοχές πέραν της ζώνης των 30 χιλιομέτρων 42.636 άτομα. Απομακρύνθηκαν έτσι συνολικά 116.000 κάτοικοι μέχρι το φθινόπωρο 1986. Το σύνολο των περιοχών στις οποίες έγιναν εκκενώσεις πληθυσμών αποτελεί την «ζώνη αποκλεισμού».

Το ατύχημα είχε σοβαρές ραδιολογικές επιπτώσεις στην υγεία του πληθυσμού της ευρύτερης περιοχής, καθώς και κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις στην Ουκρανία, τη Λευκορωσία και την Ρωσία. Μέχρι το 2000 οπότε συντάχθηκε η έκθεση UNSCEAR 2000, δηλαδή 14 έτη μετά το ατύχημα, οι επιπτώσεις είχαν ως εξής:

#### **Άμεσες επιπτώσεις στους "εργαζομένους έκτακτης ανάγκης"**

Από την ομάδα των 600 "εργαζομένων έκτακτης ανάγκης", που εργάστηκαν από την πρώτη μέρα μέσα στο περιβάλλον του ατυχήματος για την αντιμετώπισή του και τον περιορισμό των συνεπειών του και που κατά τεκμήριο έλαβαν τις μεγαλύτερες δόσεις από οποιονδήποτε άλλον, 134 άτομα που δέχθηκαν εξαιρετικά μεγάλες δόσεις σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα υπέστησαν οξεία ακτινοπληξία<sup>15</sup>. Από αυτούς απεβίωσαν 28 άτομα εντός τεσσάρων μηνών και 11 εντός δύο ετών από το ατύχημα.

#### **Καθυστερημένες επιπτώσεις στην υγεία των πληθυσμών των περιοχών της πρώην ΕΣΣΔ που ρυπάνθηκαν από το ατύχημα.**

Το καλοκαίρι του 1986 δημιουργήθηκαν στην Σοβιετική Ένωση "Αρχεία Τσέρνομπιλ" για τη συνεχή παρακολούθηση της κατάστασης της υγείας των πληθυσμών που εκτέθηκαν στη ραδιενέργεια από το ατύχημα. Το 1987 επεβλήθη διά νόμου υποχρεωτική εγγραφή σε ειδικά αρχεία για την συνεχή παρακολούθηση της κατάστασης της υγείας των εξής ομάδων πληθυσμού :

1. Των «εκκαθαριστών»<sup>16</sup>.
2. Των ατόμων που εκκενώθηκαν από τις πλέον βεβαρημένες περιοχές (περιοχές με εναπόθεση Cs-137 στο έδαφος μεγαλύτερη από 1.480 kBq/m<sup>2</sup>).

<sup>14</sup> -UNSCEAR 1998, UNSCEAR 2000, Chernobyl Ten Years On. NEA OECD (1995)

- International Atomic Energy Agency. Int. Conference: One decade after Chernobyl, Summing up the consequences of the accident (1996)

-Chernobyl's legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts. The Chernobyl Forum:2003-2005. (IAEA, WHO, UNSCEAR et al, 2006)

<sup>15</sup> Οξεία ακτινοπληξία (acute radiation sickness): ασθένεια επερχόμενη μετά από πολύ μεγάλες δόσεις ακτινοβολίας, λαμβανόμενες σε μικρό χρονικό διάστημα, με καταστολή της λειτουργίας του νωτιαίου μυελού, υποδεικνυόμενη από την μείωση του αριθμού των λεμφοκυττάρων του αίματος και από συγκεκριμένα συμπτώματα.

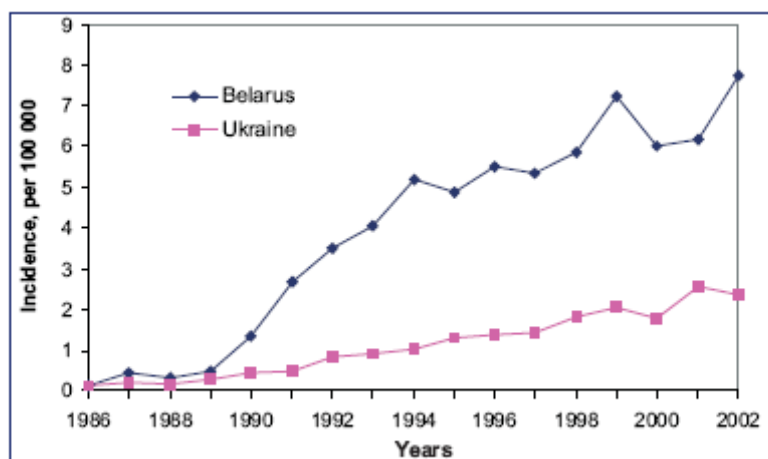
<sup>16</sup> Εκκαθαριστές: απόδοση στα ελληνικά της ονομασίας liquidator, που χρησιμοποιήθηκε από τους Σοβιετικούς, άτομα που στο διάστημα 1986 – 1990 ενεπλάκησαν στον σταθμό, ή στην περιοχή γύρω από αυτόν, σε εργασίες απορρύπανσης του σταθμού και δρόμων, σε άλλες εργασίες και στην κατασκευή της σαρκοφάγου (Μάιος-Νοέμβριος 1986).

3. Κατοίκων βεβαρημένων περιοχών (με εναπόθεση Cs-137 στο έδαφος μεγαλύτερη από 555 kBq/m<sup>2</sup>), στις οποίες δεν έγιναν εκκενώσεις πληθυσμών και

4. Παιδιών που γεννήθηκαν μετά το ατύχημα από γονείς που εγγράφησαν στις ομάδες 1-3.

Μέχρι το 1992, που κατέρρευσε η πρώην Σοβιετική Ένωση, είχαν συσσωρευτεί στα αρχεία δεδομένα για 659.292 άτομα, εκ των οποίων το 43% ήταν «εκκαθαριστές» (ομάδα 1), 11% ήταν άτομα περιοχών που εκκενώθηκαν (ομάδα 2) και 45% ήταν κάτοικοι των βεβαρημένων περιοχών στις οποίες δεν έγιναν εκκενώσεις πληθυσμών (ομάδα 3). Το υπόλοιπο 1% ήταν παιδιά των ομάδων 1 έως 3. Μετά το 1992 τα αρχεία εξακολούθησαν να τηρούνται από τις κυβερνήσεις των κρατών που προέκυψαν, με κάποιες διαφορές μεθοδολογίας στα διάφορα κράτη. Οι μελέτες για τις καθυστερημένες επιπτώσεις του ατυχήματος στην υγεία του πληθυσμού στην πρώην Σοβιετική Ένωση στηρίζονται και σε αυτά τα αρχεία καθώς και σε άλλα περισσότερο εξειδικευμένα. Οι μελέτες εστιάζονται κυρίως, αλλά δεν περιορίζονται, σε καρκίνο του θυρεοειδούς των παιδιών (ηλικίας ως 18 ετών το 1986), σε λευχαιμία και άλλα είδη καρκίνου στους «εκκαθαριστές» και στους κατοίκους των ρυπασμένων περιοχών. Από τις μελέτες προέκυψε ότι:

(α) η τάξη μεγέθους της αύξησης των παθήσεων καρκίνου του θυρεοειδούς, σε παιδιά πέραν αυτών που ανεμένετο να προκληθούν από άλλες συνήθεις αιτίες, δεν υπερέβη τα δεκαοκτώ παιδιά (ηλικίας ως 18 ετών το 1986) ανά έτος και ανά 100.000 παιδιά και τα 67 παιδιά ανά 100.000 παιδιά στην εξαετία 1991-1996, στις πιο βεβαρημένες από το ατύχημα περιοχές (Ουκρανία, Λευκορωσία, Ρωσική Ομοσπονδία). Σε αυτήν την κατηγορία παιδιών είχαν διαγνωστεί, μέχρι το 2002, 4000 περιπτώσεις του θυρεοειδούς. Η ετήσια αύξηση των περιπτώσεων αυτών δίνεται στο Σχήμα 3.3.



**Σχήμα 3.3:** Καρκίνοι του θυρεοειδούς, σε παιδιά ηλικίας ως 18 ετών το 1986, στις πιο βεβαρημένες από το ατύχημα περιοχές (Ουκρανία, Λευκορωσία, Ρωσική Ομοσπονδία, Jacob et al., 2005).

(β) σημαντική αύξηση του ποσοστού καρκίνου του θυρεοειδούς σε Ρώσους «εκκαθαριστές», σε σχέση με την κανονικά αναμενόμενη από τα εθνικά δεδομένα.

(γ) για τις έξι πιο ρυπασμένες περιοχές της Ρωσίας, παρατηρήθηκε αύξηση των περιστατικών καρκίνου του θυρεοειδούς σε ενήλικους, μεγαλύτερη από τη μέση αύξηση στο σύνολο της Ρωσικής Ομοσπονδίας. Δεν διαπιστώθηκε συσχέτιση μεταξύ των περιστατικών καρκίνου του θυρεοειδούς ενηλίκων και των επιπέδων της ραδιενεργού ρύπανσης.

(δ) μολονότι η λευχαιμία έχει διαπιστωθεί ότι είναι μία από τις σύντομα εμφανιζόμενες καρκινογενείς επιπτώσεις της ιοντίζουσας ακτινοβολίας, με περίοδο επώασης 2 έως 3 έτη, δεν έχει βρεθεί αυξημένο ποσοστό λευχαιμίας συσχετιζόμενο με ιοντίζουσα ακτινοβολία μεταξύ των «εκκαθαριστών» και των κατοίκων των βεβαρημένων περιοχών.

(ε) μέχρι την σύνταξη του UNSCEAR 2000 δεν έχει διαπιστωθεί αύξηση σε ανωμαλίες νεογνών συνδεδεμένη με το ατύχημα.

(στ) μεταξύ των «εκκαθαριστών», αυτοί που υπέφεραν από μεγαλύτερο βαθμό νευρωτικών διαταραχών με σημαντικά ψυχοσωματικά συμπτώματα ήταν όσοι δεν είχαν επαγγελματική εμπειρία με την ραδιενέργεια.

(ζ) είναι αδύνατον να εκτιμηθεί αξιόπιστα ο αριθμός των θανατηφόρων καρκίνων, που ενδεχομένως προκλήθηκαν σε ραδιενεργό έκθεση του πληθυσμού στην πλέον ρυπασμένη περιοχή, διότι μικρές διαφορές στις υποθέσεις οδηγούν σε μεγάλες διαφορές ως προς τις συνέπειες. Διεθνής ομάδα ειδικών εκτιμά ότι η συνολική μακροχρόνια αύξηση των καρκινογενών θανάτων, λόγω του ατυχήματος, μεταξύ των πλέον εκτεθέντων (εκκαθαριστές, άτομα από περιοχές που εκκενώθηκαν και των περιοχών αυστηρού ελέγχου) μπορεί να είναι μερικές χιλιάδες, επιπλέον των αναμενόμενων καρκινογενών θανάτων από άλλες αιτίες.

#### **3.3.3.4 Επιπτώσεις στην υγεία στις χώρες εκτός της πρώην ΕΣΣΔ**

Υπήρξαν περιοχές στην Ευρώπη, εκτός της πρώην Σοβιετικής Ένωσης, στις οποίες η εναπόθεση Cs-137 ήταν μεγαλύτερη από  $37 \text{ kBq/m}^2$ , σε μεγάλη έκταση κυρίως στη Σουηδία, τη Νορβηγία, τη Φινλανδία, την Αυστρία και τη Βουλγαρία. Σε αυτές τις χώρες η εναπόθεση Cs-137 δεν ξεπέρασε τα  $185 \text{ kBq/m}^2$ , εκτός από μικρό αριθμό περιοχών περιορισμένης έκτασης. Κατ' αρχήν, με τέτοια επίπεδα εναποθέσεων ραδιενεργών ρύπων δεν είναι δυνατόν να προκληθούν άμεσες επιπτώσεις στην υγεία και πράγματι δεν παρατηρήθηκαν στην Ευρώπη.

Έχουν διεξαχθεί μελέτες για ενδεχόμενες καθυστερημένες επιπτώσεις του ατυχήματος στην υγεία των πληθυσμών των εκτός Σοβιετικής Ένωσης χωρών της Ευρώπης και έχει γίνει κριτική ανασκόπηση και σύνοψη των μελετών αυτών. Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι οποιοσδήποτε αυξήσεις περιστατικών καρκίνου ή θνησιμότητας δεν θα μπορούσαν να αποδοθούν στη ραδιενεργό ρύπανση από το ατύχημα. Δεν διαπιστώθηκε αύξηση των περιστατικών καρκίνου του θυρεοειδούς παιδιών, μολονότι καμία μελέτη δεν εστιάσθηκε σε αυτό, διότι πρόκειται για τόσο σπάνια ασθένεια, οπότε μικρή αύξηση δεν θα μπορούσε να εντοπισθεί από αυτές τις μελέτες.

Το ατύχημα προκάλεσε έντονους φόβους στο κοινό, σε όλο τον κόσμο, ως προς τους κινδύνους από τους πυρηνικούς αντιδραστήρες. Επηρέασε επίσης την πολιτική κυβερνήσεων για τους πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος.

#### **3.3.3.5 Οι επιπτώσεις στη Ελλάδα<sup>17</sup>**

Ο κύριος όγκος του ραδιενεργού νέφους πρέπει να εισήλθε στην ατμόσφαιρα της Ελλάδας τις πρώτες πρωινές ώρες της 2ας Μαΐου 1986. Στις περιοχές όπου ακολούθησαν ισχυρές βροχοπτώσεις, η βροχή παρέσυρε από την ατμόσφαιρα τους ραδιενεργούς ρύπους και τους εναπόθεσε αφ' ενός μεν στα εδάφη, αφ' ετέρου δε στα φυλλώματα, στους κορμούς και στους

---

<sup>17</sup> M. Antonopoulos-Domis, A. Clouvas, P. Tervisidis, *Radioprotection*, Vol 23, No3 (1988)  
A. Clouvas, S.Xanthos, M.Antonopoulos-Domis, *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 94, No 3,(2001)  
Kritidis P and Florou E, *Health Physics*, 80(2000)5  
M. Antonopoulos-Domis, A.Clouvas et al , *Health Physics* 69(1995)  
M. Antonopoulos-Domis, A.Clouvas. M. Marseguerra. *Nuclear Science and Engineering* 121 (1995)  
Π. Κρητίδης. *Ραδιενεργός ρύπανση από το ατύχημα του Τσερνομπύλ, στο 'Εμείς και η ραδιενέργεια'*  
*Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 1989.*  
M. Antonopoulos-Domis, A.Clouvas, A. Gagianas. *Environmental Pollution* 68(1990)  
M.Antonopoulos-Domis, A.Clouvas, A. Gagianas. *Health Physics* 58(1990)  
M.Antonopoulos-Domis, A.Clouvas, A. Gagianas. *Health Physics* 61(1991)  
M.Antonopoulos-Domis, A.Clouvas, A. Gagianas. *Health Physics* 71,6(1996)

βλαστούς των φυτών. Τότε η ατμόσφαιρα κάθε περιοχής στην οποία έβρεξε πρακτικά απηλλάγη από τους ραδιενεργούς ρύπους, αλλά ρυπάνθηκαν τα εδάφη και τα φυτά.

Η μέγιστη ραδιενέργεια του αέρα στην ύπαιθρο μετρήθηκε στις αρχές Μαΐου 1986 και ήταν αισθητά μεγαλύτερη από τη φυσική ραδιενέργεια. Μετά τις βροχοπτώσεις της πρώτης εβδομάδας του Μαΐου, η ραδιενέργεια του αέρα μειώθηκε ραγδαία και επανήλθε σε φυσιολογικά επίπεδα μετά τις 10 Μαΐου. Περί τα τέλη Μαΐου 1986, οι συγκεντρώσεις των ραδιενεργών ρύπων στην ατμόσφαιρα της Ελλάδος καθίστανται αμελητέες σε σχέση με τις συγκεντρώσεις φυσικών ραδιονουκλιδίων.

Τις πρώτες ημέρες του Μαΐου και μέχρις ότου υπάρξουν ισχυρές βροχοπτώσεις, η κύρια οδός δόσεων στον πληθυσμό ήταν δια της αναπνοής. Εκτιμάται ότι οι μέσες πρόσθετες, λόγω του ατυχήματος, δόσεις από εισπνοή δεν υπερέβησαν το 2% της μέσης ετήσιας δόσης από φυσική ραδιενέργεια

Μετά την πρώτη εβδομάδα του Μαΐου, οι άνεμοι απομάκρυναν το ραδιενεργό νέφος από την ατμόσφαιρα του ελλαδικού χώρου, οι δε βροχές που ακολούθησαν ξέπλυναν τους ραδιενεργούς ρύπους από τα οδοστρώματα και, γενικά, από τις επιφάνειες των πόλεων. Μετά από αυτό, η εξωτερική έκθεση από τους ρύπους του ατυχήματος κατέστη στις πόλεις ασήμαντη. Οι ραδιενεργοί ρύποι παρέμειναν όμως στα χώματα των εδαφών της υπαίθρου.

Το μέγεθος της εναπόθεσης ραδιενεργών ρύπων στα εδάφη παρουσίασε μεγάλες διαφορές στις διάφορες περιοχές της χώρας, κυρίως λόγω των διαφορών των συγκεντρώσεων του νέφους και των διαφορών των βροχοπτώσεων τον Μάιο του 1986. Οι μεγαλύτερες εναποθέσεις Cs-137 μετρήθηκαν σε περιοχές της Βόρειας Θεσσαλίας και της Δυτικής Μακεδονίας. Στις άλλες περιοχές της χώρας οι εναποθέσεις Cs-137 υπήρξαν σημαντικά μικρότερες από αυτές της Βορείου Ελλάδος. Ελάχιστη εναπόθεση Cs-137 μετρήθηκε σε περιοχές της Πελοποννήσου, των νησιών του νοτίου Αιγαίου και της Κρήτης. Με βάση τις τιμές της ραδιενεργού εναπόθεσης, η από το ατύχημα πρόσθετη δόση από εξωτερική ακτινοβολία εκτιμάται ότι δεν υπερέβη για τον μέσο Έλληνα, για το 1<sup>ο</sup> έτος μετά το ατύχημα, το 2% της μέσης ετήσιας δόσης από φυσική ραδιενέργεια.

Ένα έτος μετά το ατύχημα, εξαφανίσθηκαν με ραδιενεργό διάσπαση τα βραχύβια ραδιονουκλίδια του ραδιενεργού νέφους και παρέμειναν στο χώμα των υπαίθριων εδαφών τα ραδιοϊσότοπα Cs-134 και Cs-137. Μετά από λίγα έτη εξαφανίσθηκε πρακτικά (από άποψη ακτινοπροστασίας) και το Cs-134 λόγω του μικρού χρόνου ημιζωής (2 έτη). Παρέμεινε όμως στα εδάφη και θα παραμείνει ως σημαντικός μακροπρόθεσμος ρύπος των εδαφών επί πολλές δεκαετίες το μακρόβιο Cs-137 (χρόνος ημιζωής = 30 έτη).

Εκτενείς μετρήσεις - αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν από το 1994 έως το 1999 σε 41 πόλεις της Ελλάδος δείχνουν σαφώς ότι η πρόσθετη δόση στην Ελλάδα από εξωτερική ακτινοβολία είναι αμελητέα σε σχέση με την αντίστοιχη δόση, και τις γεωγραφικές διακυμάνσεις της δόσης (π.χ. ο ρυθμός εξωτερικής δόσης είναι στη Θεσσαλονίκη περίπου διπλάσιος και στις Σέρρες περίπου τετραπλάσιος από αυτόν της Αθήνας), από τα φυσικά ραδιονουκλίδια. Αυτή η πρόσθετη δόση μειώνεται με την πάροδο του χρόνου λόγω της διάσπασης του Cs-137

Η σημαντικότερη πρόσθετη δόση είναι η εσωτερική δόση που προκύπτει από την κατανάλωση ρυπασμένων τροφίμων. Οι μηχανισμοί ραδιενεργού ρύπανσης των φυτικών προϊόντων ήταν οι εξής:

(α) **άμεση ρύπανση**, με εναπόθεση ραδιενεργών ρύπων, επί των καρπών και, γενικά, των φυτικών προϊόντων που βρισκόταν, τον Μάιο του 1986, επί των φυτών στο στάδιο της ανάπτυξης, ή ήταν ήδη ανεπτυγμένα, οι δε φυτικές ζωοτροφές αναπτύσσονταν, ή ήταν ανεπτυγμένες επί των εδαφών. Οι μέγιστες συγκεντρώσεις ραδιενέργειας φυτικών τροφίμων μετρήθηκαν κατά τον Μάιο - Ιούνιο του 1986 και οφειλόταν σχεδόν αποκλειστικά σε άμεση ρύπανση των καρπών. Μερικές εβδομάδες μετά την άφιξη του νέφους, τα βραχύβια ραδιονουκλίδια εξαφανίζονται με την ραδιενεργό διάσπασή τους και παύουν να αποτελούν ραδιενεργό ρύπανση του περιβάλλοντος και των τροφίμων. Το I-131 μειώθηκε γρήγορα και

οι τιμές του ήταν αμελητέες ήδη από τα μέσα του καλοκαιριού του 1986. Οι συγκεντρώσεις καϊσίου ήταν ελάχιστες σε όλα τα νέα λαχανικά και κηπευτικά ήδη από το 1986.

(β) **έμμεση ρύπανση:** ένα μέρος των ραδιενεργών ρύπων που εναποτέθηκαν στην επιφάνεια των φύλλων και των βλαστών των φυτών προσροφήθηκε και αποθηκεύθηκε στα φυτά. Οι αποθηκευμένοι ρύποι ήταν διαθέσιμοι για μεταφορά σε νέους καρπούς, φύλλα και βλαστούς, που αναπτύσσονταν αργότερα. Ως προς την παραγωγή αυτών μετά το 1986 ετών ο μηχανισμός αυτός υπήρξε καθοριστικός για τη ρύπανση των προϊόντων των πολυετών καλλιεργειών (καρποφόρων δένδρων, φρούτων κ.λπ.), ενώ προφανώς ο μηχανισμός αυτός δεν υφίσταται για τις μονοετείς καλλιέργειες, όπως π.χ. τα σιτηρά, για τις οποίες σχεδόν μοναδικός μηχανισμός ρύπανσης είναι η ριζική απορρόφηση. Κάθε έτος, αφού η ποσότητα καϊσίου που υπάρχει στο δένδρο μοιράζεται σε μεγαλύτερη μάζα, δηλαδή σε αυτήν που υπήρχε στο δένδρο ένα έτος πριν και στη μάζα των νέων βλαστών, φύλλων και καρπών που παρήχθησαν, η πυκνότητα του καϊσίου στο δένδρο μειώνεται κάθε έτος με τη νέα παραγωγή. Επί πλέον, κάθε έτος τα φύλλα πέφτουν και οι καρποί απομακρύνονται από το δένδρο, μεταφέροντας μαζί τους και αφαιρώντας έτσι κάποια ποσότητα καϊσίου από τη δεξαμενή του δένδρου, μειώνοντας συνεπώς τη συνολική ποσότητα του καϊσίου στο δένδρο. Με αυτόν τον μηχανισμό η πυκνότητα καϊσίου στους καρπούς μειώνεται κάθε έτος στο 35% έως 45% του προηγούμενου έτους. Ήδη από το 1987, η ραδιενέργεια του καϊσίου στα φρούτα και γενικά στους καρπούς των πολυετών καλλιεργειών είναι πολύ μικρή, τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους μικρότερη από τη ραδιενέργεια του φυσικού ραδιοϊσότοπου K-40, δηλαδή αμελητέα ως προς την ραδιολογική επιβάρυνση του ελληνικού πληθυσμού.

(γ) **ριζική απορρόφηση:** με αυτήν οι ρύποι που έχουν εναποτεθεί στο χώμα είναι δυνατόν να μεταφερθούν στο φυτό διά του ριζικού του συστήματος. Μετά το πρώτο έτος καθίσταται ο μοναδικός μηχανισμός ρύπανσης των μονοετών καλλιεργειών, όπως είναι π.χ. τα σιτηρά και οι ζωοτροφές (χορτάρι) και, μακροπρόθεσμα, όλων των φυτών. Μετά το πρώτο έτος, οι μόνοι αξιόλογοι ραδιενεργοί ρύποι που παραμένουν στο έδαφος είναι τα ισότοπα του καϊσίου και, μετά από μερικά έτη, μόνο το Cs-137. Δεδομένου ότι το Cs-137 έχει μεγάλο χρόνο ημιζωής (30 έτη), θα παραμείνει σε αξιόλογες ποσότητες στα εδάφη που έχουν ρυπανθεί. Θα μπορούσε να ρυπαίνει τη φυτική παραγωγή επί πολλές δεκαετίες. Ευτυχώς όμως ο μηχανισμός της ριζικής απορρόφησης αποδείχθηκε αμελητέος ως προς το καϊσίο διότι το καϊσίο εγκλωβίζεται στην κρυσταλλική δομή της αργίλου του χώματος και δεν είναι διαθέσιμο για ριζική απορρόφηση και μεταφορά στους ιστούς των φυτών. Έτσι, στη χώρα μας, τα εδάφη της οποίας είναι αργιλώδη, το μέγιστο ποσοστό του καϊσίου είναι εγκλωβισμένο και συνεπώς μη διαθέσιμο για διακίνηση. Το 95% βρισκόταν, το 1987, και παραμένει μέχρι σήμερα, στα πρώτα 10 cm αδιατάρακτου (δηλαδή μη καλλιεργημένου μετά το 1986) εδάφους. Η δε πυκνότητά του υποδιπλασιάζεται σε κάθε 1,5 cm βάθους. Η κατανομή αυτή του Cs στο έδαφος παραμένει σταθερή στον χρόνο από το 1987, που μετρήθηκε για πρώτη φορά. Αυτό σημαίνει ότι το μέγιστο ποσοστό του καϊσίου δεν είναι διαθέσιμο για διακίνηση εντός του εδάφους. Αυτό συνεπάγεται, πέραν της αμελητέας ριζικής απορρόφησης, και αδυναμία μεταφοράς του καϊσίου σε μεγάλα βάθη και συνεπώς, αδυναμία ρύπανσης του υδροφόρου ορίζοντα.

Οι συγκεντρώσεις Cs ήταν ελάχιστες σε όλα τα νέα λαχανικά και κηπευτικά ήδη από το 1986. Παρατηρήθηκε επίσης, δραστική μείωση των συγκεντρώσεων καϊσίου σε μονοετείς καλλιέργειες, όπως π.χ. των σιτηρών, ήδη από τη εσοδεία του 1987. Στις σοδειές μονοετών καλλιεργειών των ετών 1987, 1988 και 1989 η ρύπανση των καρπών (π.χ. σιταριού), ακόμα και της παραγωγής της πιο βεβαρημένης ανά την Ελλάδα περιοχής της Πτολεμαΐδας, είναι σχεδόν πάντα μικρότερη από 1 Bq/kg.<sup>18</sup> Όπως είναι αναμενόμενο, το ιστορικό της ρύπανσης των ζωικών προϊόντων ακολουθεί το ιστορικό των φυτικών ζωοτροφών, και από τον Αύγουστο του 1987 η ραδιενέργεια στα ζωικά προϊόντα επανέρχεται σε φυσιολογικά επίπεδα. Από όλα τα προηγούμενα προκύπτει ότι στην Ελλάδα η ραδιενέργεια των τροφίμων

<sup>18</sup> Για να γίνει αντιληπτό πόσο ασήμαντη είναι αυτή η συγκέντρωση από ραδιολογική άποψη, αρκεί να συγκριθεί με τη συγκέντρωση ραδιενέργειας από το φυσικό ραδιοϊσότοπο κάλιο-40, η οποία είναι π.χ. στο σιτάρι περίπου 160 Bq/kg.

επανήλθε στα φυσιολογικά επίπεδα περί τα τέλη του 1987 και ότι η επιβάρυνση του πληθυσμού υπήρξε κυρίως κατά το πρώτο έτος μετά το ατύχημα.

Σύμφωνα με τις επιστημονικές εκτιμήσεις, η πρόσθετη δόση από το ατύχημα κατά το πρώτο έτος, για τον μέσο Έλληνα είναι μικρότερη από το 28% της μέσης ετήσιας δόσης από φυσική ραδιενέργεια και από το 0,7% της τυπικής δόσης 50 ετών από φυσική ραδιενέργεια. Η θεωρητική πιθανότητα εκδήλωσης θανατηφόρου καρκίνου λόγω της δόσης αυτής κατά τα επόμενα 50 έτη ισούται με το 0,03% της συνολικής πιθανότητας θανατηφόρου καρκίνου στην Ελλάδα από όλες τις αιτίες για την ίδια περίοδο. Ως εκ τούτου η επίδραση του ατυχήματος στη δημόσια υγεία εκτιμάται ως αμελητέα σε σχέση με αυτήν πολλών άλλων υπαρκτών παραγόντων καρκινογένεσης.<sup>19</sup> Τέλος, ως σημαντικότερες επιπτώσεις στην υγεία του πληθυσμού της Ελλάδος πρέπει να θεωρούνται αυτές που προέκυψαν ως συνέπεια του πανικού που **προεκλήθη λόγω της αίσθησης ανασφάλειας** ενώπιον του αόρατου και της άγνωστης φύσης, για το ευρύ κοινό, κινδύνου και της άγνοιας των πραγματικών διαστάσεων του κινδύνου. Ιδιαίτερα σοβαρός παράγοντας της πρόκλησης πανικού και υπερβολικής φοβίας του πληθυσμού υπήρξε η έλλειψη οργανωμένης ετοιμότητας του κράτους για την αντιμετώπιση τέτοιου είδους πρωτόγνωρης διακινδύνευσης, με συνέπεια την **απώλεια της εμπιστοσύνης του κοινού όχι μόνον στους πολιτικούς**, αλλά ακόμη και στους επιστημονικούς αρμοδίους, συμπεριλαμβανομένων των ειδικών ιατρών. Και αν οι ψυχολογικές συνέπειες ενδέχεται, ως μη μετρήσιμες, να μην είναι ορατές, οι τρεις χιλιάδες αναίτιες εκτρώσεις που έγιναν τους πρώτους μήνες μετά το ατύχημα αποτελούν την μεγαλύτερη μετρήσιμη συνέπεια στην υγεία του πληθυσμού στη χώρα μας.

Το συμπέρασμα είναι ότι η έλευση του ραδιενεργού νέφους και η εναπόθεση ραδιενεργών ρύπων προκάλεσαν στη χώρα μας:

(α) σοβαρή και πολύ μακροχρόνια ρύπανση εδαφών με Cs-137, σε μεγαλύτερο βαθμό στη Βόρεια Θεσσαλία και τη Δυτική Μακεδονία

(β) σημαντικές οικονομικές συνέπειες, δεδομένου ότι αχρηστεύθηκε μεγάλο μέρος της αγροτικής παραγωγής του 1986

(γ) αμελητέες ραδιολογικές επιπτώσεις στην υγεία του πληθυσμού και

(δ) αξιόλογες επιπτώσεις στην ψυχική υγεία του πληθυσμού, ως συνέπεια υπερβολικού πανικού, που, όπως αποδεικνύεται, δεν ήταν επιστημονικά δικαιολογημένος, αλλά επιτάχθηκε από την έλλειψη κρατικής ετοιμότητας και από ανεύθυνη κινδυνολογία.

### 3.4 Σύγκριση με στατιστική ατυχημάτων στην παραγωγή ενέργειας

Στατιστική ατυχημάτων στην παραγωγή ενέργειας παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.1 και στο Παράρτημα IV. Ο κύριος λόγος για την κακή εικόνα στην περίπτωση του άνθρακα είναι ότι απαιτείται η εξόρυξη και η μεταφορά τεράστιων ποσοτήτων υλικών για την τροφοδοσία μιας μεγάλης μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αυτό εμπεριέχει κινδύνους. Στην πυρηνική βιομηχανία, με περίπου 12.700 έτη αντιδραστήρα μέχρι σήμερα, συνέβησαν δύο πολύ σημαντικά ατυχήματα: του TMI και του Τσερνομπίλ. Από όλα τα ατυχήματα και συμβάντα στην εμπορική πυρηνική βιομηχανία, **μόνο το ατύχημα του Τσερνομπίλ κατέληξε σε ραδιολογικές δόσεις στο κοινό μεγαλύτερες από τις δόσεις της φυσικής ραδιενέργειας**. Στα υπόλοιπα οι συνέπειες περιορίστηκαν στο εσωτερικό της μονάδας.

Εργαζόμενοι στην πυρηνική βιομηχανία, ή μέλη του κοινού, δεν έχουν ποτέ χάσει τη ζωή των από έκθεση σε συμβάν στην εμπορική πυρηνική βιομηχανία, εκτός από το ατύχημα του Τσερνομπίλ. Οι περισσότερες σοβαρές ραδιολογικές συνέπειες, υπερεκθέσεις (πάνω από τα θεσμοθετημένα όρια) και θάνατοι οφείλονται σε μεγάλες, μη-ελεγχόμενες (ονομαζόμενες «ορφανές»), ραδιενεργές πηγές, όπως π.χ. εγκαταλελειμμένες από ιατρικές και βιομηχανικές

<sup>19</sup> Πρακτικά Πανελληνίου Συνεδρίου "10 χρόνια μετά το ατύχημα στο Τσερνομπίλ. Οι επιπτώσεις του ατυχήματος στην Ελλάδα" ΕΚΕΦΕ 'Δημόκριτος' 1996. Συμπεράσματα του συνεδρίου.

πηγές<sup>20</sup>. Υπήρξαν ατυχήματα και σε πειραματικούς αντιδραστήρες και σε στρατιωτική μονάδα παραγωγής πλουτωνίου στο Windscale (Αγγλία, 1957), αλλά σε κανένα από αυτά δεν υπήρξε απώλεια ζωής έξω από τη μονάδα ή μακροχρόνια περιβαλλοντική ρύπανση.

Στα πυρηνικά εργοστάσια οι δόσεις ραδιενέργειας ελέγχονται με φυσικές θωρακίσεις των πηγών ραδιενέργειας και περιορισμό του χρόνου ενασχόλησης του προσωπικού σε περιοχές με αξιόλογα επίπεδα ραδιενέργειας. Πραγματοποιείται συνεχής επιτήρηση και καταγραφή των δόσεων σε κάθε εργαζόμενο και στους χώρους εργασίας, ώστε να εξασφαλίζεται πολύ χαμηλή ραδιολογική έκθεση σε σύγκριση με άλλες βιομηχανίες.

**Πίνακας 3.1:** Σύγκριση στατιστικής ατυχημάτων στην πρωτογενή παραγωγή ενέργειας

| (Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αντιστοιχεί σε περίπου <b>40%</b> της συνολικής πρωτογενούς ενέργειας) |                          |                       |                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Καύσιμο                                                                                                 | Άμεσοι θάνατοι 1970-1992 | Ποίοι?                | Θάνατοι ανά TWy* ηλεκ. ενέργειας |
| <b>Ανθρακας</b>                                                                                         | 6400                     | εργαζόμενοι           | 342                              |
| <b>Φυσικό αέριο</b>                                                                                     | 1200                     | εργαζόμενοι και κοινό | 85                               |
| <b>Υδροηλεκτρικά</b>                                                                                    | 4000                     | κοινό                 | 883                              |
| <b>Πυρηνικά</b>                                                                                         | 31**                     | εργαζόμενοι           | 8                                |

(\*) Εκατομμύρια MWe σε λειτουργία ενός έτους (δεν συμπεριλαμβάνεται η κατασκευή της μονάδας παραγωγής). Βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα, που είναι απίθανο να αντιπροσωπεύουν τα σύγχρονα επίπεδα ασφάλειας σε οποιαδήποτε από αυτές τις βιομηχανίες.

(\*\*) Πρόκειται για τους 31 νεκρούς από την έκρηξη ατμού και την πυρκαγιά στον αντιδραστήρα του Τσερνομπίλ το 1986. Μέχρι σήμερα, οι θάνατοι στην περιοχή έχουν αυξηθεί σε περίπου 56. Βεβαίως το ατύχημα είχε σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον και την υγεία του πληθυσμού.

Πηγή: Ball, Roberts & Simpson, Research Report #20, Centre for Environmental & Risk Management, University of East Anglia, 1994; Hirschberg et al, Paul Scherrer Institut, 1996; in: IAEA, Sustainable Development and Nuclear Power, 1997; Severe Accidents in the Energy Sector, Paul Scherrer Institut, 2001).

### 3.5 Σεισμοί

Οι πυρηνικές εγκαταστάσεις σχεδιάζονται ώστε σεισμοί, και άλλα εξωτερικά γεγονότα να μην θέτουν σε κίνδυνο την ασφάλεια της εγκατάστασης. Τα θέματα σεισμικότητας λαμβάνονται υπ' όψη στον προσδιορισμό της θέσης εγκατάστασης, τον σχεδιασμό και την κατασκευή των αντιδραστήρων, με κριτήρια εξαιρετικά πιο αυστηρά από αυτά των μη-πυρηνικών εγκαταστάσεων, π.χ. στη Γαλλία οι πυρηνικοί αντιδραστήρες σχεδιάζονται ώστε να αντέχουν σεισμό διπλάσιας έντασης από τον υπολογιζόμενο ισχυρότερο σεισμό που ενδέχεται να συμβεί εντός χιλιετίας, στην περιοχή εγκατάστασης του αντιδραστήρα.

Ακολουθεί αναφορά στους κανονισμούς και την εμπειρία της Ιαπωνίας, λόγω της έντονης σεισμικότητας που έχει και του μεγάλου αριθμού πυρηνικών αντιδραστήρων που λειτουργούν εκεί<sup>21</sup>. Τα Ιαπωνικά πυρηνικά εργοστάσια σχεδιάζονται να αντέχουν δύο

<sup>20</sup> Η Ελληνική επικράτεια ήταν διάσπαρτη με τέτοιες ορφανές πηγές. Με πολυετές πρόγραμμα του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος και της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας, στις αρχές της δεκαετίας, εντοπίστηκαν, συνελέγησαν, φυλάχτηκαν σε ειδικό, προς τούτο κατασκευασμένο, κτίριο στο Δημόκριτο και τελικά στάλθηκαν στο εξωτερικό.

<sup>21</sup> Nuclear Services Section, External Affairs, ANSTO; JAIF

“Nuclear Power Plants and Earthquakes” (2008) World Nuclear Association

προδιαγεγραμμένες εντάσεις σεισμών,  $S_1$  και  $S_2$ . Το αυτόματο σύστημα ασφάλειας περιέχει αισθητήρες σεισμικής δραστηριότητας. Αν καταγραφούν κινήσεις της γης στο προκαθορισμένο επίπεδο  $S_1$ , ενεργοποιείται αυτόματα το σύστημα ασφάλειας που επιφέρει άμεσο, ασφαλές, κλείσιμο του αντιδραστήρα. Η βάση σχεδιασμού σεισμικής κίνησης του εδάφους, ή η «κορυφαία» επιτάχυνση εδάφους (peak ground acceleration, PGA)  $S_1$  ορίζεται ως αυτή που προκύπτει από τον μέγιστο αναμενόμενο σεισμό, βάσει της γνωστής σεισμικότητας της περιοχής. Μολονότι, βάσει του σχεδιασμού, το εργοστάσιο μπορεί να συνεχίσει τη λειτουργία του κατά τη διάρκεια σεισμού επιπέδου  $S_1$ , το σύστημα ασφάλειας κλείνει τον αντιδραστήρα σε χαμηλότερα προκαθορισμένα επίπεδα. Μετά από αυτό το κλείσιμο, ο αντιδραστήρας αναμένεται να είναι σε θέση να επαναλειτουργήσει σύντομα. Οι Ιαπωνικοί κανονισμοί (του 2007) θέτουν για το  $S_1$  το ισοδύναμο του 6,7 της κλίμακας Richter. Το PGA μετράται σε μονάδες g της επιτάχυνσης της βαρύτητας ( $1\text{ g}=9,8\text{ m/s}^2$ ). Μεγαλύτερες σεισμικές κινήσεις του εδάφους, μολονότι έχουν μικρή πιθανότητα, επηρεάζουν επίσης τον σχεδιασμό. Η μεγαλύτερη αναμενόμενη κίνηση του εδάφους συνιστά το άνω όριο της βάσης σχεδιασμού (PGA) $S_2$ . Γενικά, γίνεται υπόθεση σεισμού 6,5 Richter, με επίκεντρο ακριβώς κάτω από τον αντιδραστήρα. Τα συστήματα ασφάλειας του σταθμού θα πρέπει να λειτουργήσουν κατά τη διάρκεια σεισμού  $S_2$  και να κλείσουν άμεσα και με ασφάλεια τον αντιδραστήρα, χωρίς διαρροή ραδιενέργειας. Ο αντιδραστήρας, μετά από σεισμό  $S_2$  μπορεί να επαναλειτουργήσει μετά από λεπτομερή, εκτεταμένο έλεγχο. Τα Ιαπωνικά σεισμικά κριτήρια βρίσκονται, μετά από σεισμούς στην περιοχή λειτουργίας αντιδραστήρων, υπό συνεχή ανασκόπηση. Νέοι κανονισμοί αναμένονται μέσα στο 2008. Γενικά, πολλοί αντιδραστήρες στην Ιαπωνία έχουν βρεθεί σε σεισμούς, χωρίς να προκληθεί σοβαρό ατύχημα. Ακόμα και ο σεισμός στο Kobe (17-01-1995) που κατέστρεψε το Kobe και τις γύρω περιοχές, δεν προκάλεσε βλάβη στους αντιδραστήρες που ευρίσκοντο σε ακτίνα 200 km από το επίκεντρο. Υπάρχουν αντιδραστήρες, όπως ο Hamaoka κοντά στο Τόκιο, σε περιοχές με αναμενόμενους σεισμούς μέχρι 8,5 Richter και έχουν σχεδιαστεί για ασφαλή λειτουργία σε αυτά τα επίπεδα.

Μεγάλοι σεισμοί έχουν συμβεί σε περιοχές αντιδραστήρων ανά τον κόσμο (π.χ στην Καλιφόρνια, την Αρμενία και αλλού). Γενικά θεωρείται τεχνικά εφικτό να σχεδιαστεί ασφαλής αντιδραστήρας για οποιονδήποτε σεισμό. **Το θέμα δεν είναι τεχνικό, είναι θέμα κόστους.**

### 3.6 Διαπιστώσεις

- Λειτουργία αντιδραστήρων περισσότερο από μισό αιώνα. Εν λειτουργία 437 αντιδραστήρες ισχύος και 200 σε υποβρύχια. Με περισσότερα από 12.000 έτη αντιδραστήρα το μόνο ατύχημα με σοβαρές συνέπειες στο περιβάλλον και την υγεία του πληθυσμού υπήρξε αυτό του Τσέρνομιλ.

- Δύο μείζονα ατυχήματα:

1. (TMI) χωρίς αξιόλογες επιπτώσεις στο περιβάλλον, χωρίς θύματα.

2. Τσέρνομιλ: το μέγιστο δυνατό ατύχημα ως προς τις συνέπειες. Συνέβη υπό τις δυσμενέστερες δυνατές συνθήκες ως προς τη διασπορά των ρύπων και στην πλέον κρίσιμη εποχή του έτους (Μάιος) ως προς τη γεωργική παραγωγή.

#### **Σημασία κουλτούρας ασφάλειας (έλλειψη στην τότε Σοβιετική Ένωση) και αυστηρής ευσταθούς διοικητικής δομής**

- Σεισμικότητα: δεν είναι τεχνικό πρόβλημα, είναι οικονομικό θέμα.

- Θεμελιώδης προϋπόθεση ασφάλειας είναι η ύπαρξη Ρυθμιστικής Αρχής, η οποία ελέγχει την εφαρμογή των κανονισμών ασφάλειας και τις πρακτικές στις πυρηνικές εγκαταστάσεις, έχει αρμοδιότητα αδειοδότησης πυρηνικών πρακτικών και ευθύνεται για την προστασία του πληθυσμού και του περιβάλλοντος από τις ιονίζουσες ακτινοβολίες. Διεθνείς συμβάσεις και νόμοι (π.χ. της ΕΕ) επιβάλλουν η Ρυθμιστική Αρχή να είναι ανεξάρτητη από την κυβέρνηση και να έχει επαρκή χρηματοδότηση, στελέχωση και τεχνογνωσία.

- Σε εφαρμογή της διεθνούς «Συνθήκης για την Ασφάλεια των Πυρηνικών Αντιδραστήρων», κάθε τρία έτη, κάθε χώρα εκθέτει σε σύνοδο ειδικών από όλο τον κόσμο τα θέματα ασφάλειας των πυρηνικών αντιδραστήρων της χώρας και ελέγχεται από τους ειδικούς της συνόδου. Τα ίδια ισχύουν και με τα κατάλοιπα, σε εφαρμογή της διεθνούς «Συνθήκης για την Ασφάλεια της Διαχείρισης των Πυρηνικών Καταλοίπων».

### 3.7 Διαχείριση των ραδιενεργών καταλοίπων

Ραδιενεργά κατάλοιπα θεωρούνται τα υλικά που περιέχουν αξιόλογη ποσότητα ραδιενεργών ισοτόπων, έχουν προκύψει από χρήση ραδιενεργών υλικών και, μετά από αυτήν τη χρήση, δεν θεωρούνται πλέον χρήσιμα. Διακρίνονται σε χαμηλού επιπέδου, ενδιάμεσου επιπέδου και υψηλού επιπέδου κατάλοιπα, με κριτήρια την ποσότητα και το είδος της ραδιενέργειας, καθώς και τους αναμενόμενους χρόνους επιβίωσης των ραδιενεργών ισοτόπων που περιέχουν<sup>22</sup>. Υπενθυμίζεται ότι βασικό χαρακτηριστικό της ραδιενέργειας είναι ότι μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Τα ραδιενεργά ισότοπα καταλήγουν εν τέλει, μέσω της διάσπασης, σε ευσταθή μη ραδιενεργά ισότοπα.

**Χαμηλού επιπέδου κατάλοιπα** παράγονται από τις εφαρμογές της πυρηνικής τεχνολογίας στην υγεία, στα ερευνητικά και άλλα εργαστήρια και τη βιομηχανία, καθώς και από την πυρηνική βιομηχανία. Συνίστανται από χαρτιά, εργαλεία, μπουκάλια, ρουχισμό, φίλτρα και άλλα, τα οποία περιέχουν μικρές ποσότητες κυρίως βραχύβιων ραδιοϊσοτόπων. Η διαχείρισή τους δεν είναι επικίνδυνη, αλλά η απόρριψή τους στο περιβάλλον πρέπει να γίνεται με περισσότερη προσοχή σε σχέση με τα κοινά απορρίμματα.

**Ενδιάμεσου επιπέδου κατάλοιπα** είναι αυτά που περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες ραδιενέργειας και που, ενδεχομένως, χρειάζονται θωράκιση. Περιλαμβάνουν ραδιενεργά υλικά, π.χ. ρητίνες, χημικά υγρά, εξαντλημένες ραδιενεργές πηγές από ιατρικές και βιομηχανικές χρήσεις, αντικείμενα από αντιδραστήρες και άλλα. Τέτοια κατάλοιπα ενδέχεται να κλειστούν σε θωράκιση τσιμέντου ή, αν πρόκειται για υγρά, να εμποτιστούν σε τσιμέντο πριν από τη φύλαξη, ή την εναπόθεση σε επιβλεπόμενους χώρους.

**Υψηλού επιπέδου κατάλοιπα** θεωρούνται τα μεγάλης ραδιενέργειας προϊόντα της σχάσης και κάποια βαρέα μακρόβια ραδιενεργά ισότοπα παραγόμενα στους αντιδραστήρες. Παράγουν σημαντικές ποσότητες θερμότητας, από τη διάσπαση των ραδιονουκλιδίων, οπότε απαιτείται ψύξη και ειδική θωράκιση κατά τον χειρισμό και τη μεταφορά τους. Το ζήτημα της ασφαλούς μακροχρόνιας διαχείρισής τους είναι αμφιλεγόμενο και συνιστά το σημαντικότερο ίσως πρόβλημα της πυρηνικής ηλεκτροπαραγωγής.

Πολλά από τα προϊόντα της σχάσης είναι ραδιενεργά. Επί πλέον, στον αντιδραστήρα παράγονται, με απορρόφηση νετρονίων από τα ισότοπα του ουρανίου, τα υπερουράνια ραδιενεργά ισότοπα, τα οποία είναι άκρως μακρόβια με μεγάλους χρόνους ημιζωής. Ενώ για την εξασθένιση της ραδιενέργειας των προϊόντων της σχάσης σε ανεκτά επίπεδα επαρκούν ενδεχομένως μερικές χιλιάδες έτη, η παρουσία των υπερουρανίων καθιστά απαραίτητη την ασφαλή διαχείριση των ραδιενεργών καταλοίπων από το πυρηνικό καύσιμο επί πολύ μεγαλύτερα διαστήματα. Πρέπει να υπάρξει ασφαλής διαχείριση των καταλοίπων επί πολλές χιλιετίες, προκειμένου τα ραδιενεργά προϊόντα να παραμείνουν απομονωμένα και να μην εισέλθουν στη βίωση και δι' αυτής στην τροφική αλυσίδα.

Οι συστάδες<sup>23</sup> του εξαντλημένου καυσίμου<sup>24</sup>, αφού εξαχθούν από την καρδιά, αποθηκεύονται

<sup>22</sup> Δεν υπάρχει γενική συμφωνία για τα κριτήρια κατάταξης στις κατηγορίες αυτές, ούτε κοινές πρακτικές στα διάφορα κράτη. Τα εδώ αναφερόμενα βασίζονται στο *Safety Series No 111-G-1.1 (1994)* του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας.

<sup>23</sup> Σύσταδα καυσίμου: το σύνολο των ράβδων που έχουν συναρμολογηθεί και στερεωθεί σε ενιαίο συγκρότημα, με κατάλληλη (συνήθως μεταλλική) δομή. Περιέχει, συνήθως, μερικές δεκάδες ράβδων καυσίμου. Αποτελεί τη μικρότερη μονάδα τοποθέτησης (ή απομάκρυνσης) καυσίμου στην καρδιά του αντιδραστήρα, η οποία περιέχει μερικές εκατοντάδες συστάδων.

προσωρινά σε δεξαμενή ύδατος στο πυρηνικό εργοστάσιο. Το νερό στη δεξαμενή λειτουργεί, αφ' ενός, ως ψυκτικό του χρησιμοποιημένου καυσίμου και, αφ' ετέρου, ως θωράκιση των ραδιενεργών συστάδων για την προστασία των εργαζομένων. Υπενθυμίζεται ότι στο εξαντλημένο καύσιμο παράγεται θερμότητα από τη διάσπαση των ραδιενεργών προϊόντων<sup>25</sup>. Οι συστάδες παραμένουν στην δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης για μερικά έτη, περίπου πέντε, μέχρις ότου η παραγόμενη θερμότητα και η παραμένουσα ραδιενέργεια μειωθούν σε επίπεδα που επιτρέπουν τον ασφαλή χειρισμό τους.

Οι περισσότερες χώρες που διαθέτουν πυρηνικούς αντιδραστήρες ισχύος έχουν αποφασίσει την τελική εναπόθεση των καταλοίπων σε μεγάλο βάθος (500 έως 1000 μέτρα) στη γη, σε κατάλληλους γεωλογικούς σχηματισμούς, και την παρεμβολή πολλαπλών φραγμάτων μεταξύ των καταλοίπων και της βιόσφαιρας. Τέτοια φράγματα θεωρούνται:

- ο μετασχηματισμός των καταλοίπων σε αδιάλυτη ευσταθή μορφή,
- ο εγκλωβισμός σε στεγανά δοχεία ανθεκτικά στη διάβρωση,
- η τοποθέτηση των δοχείων σε μεγάλο βάθος στο έδαφος σε ευσταθείς γεωλογικούς σχηματισμούς, διά των οποίων δεν διέρχονται υπόγεια ύδατα.

Έχουν επικρατήσει οι εξής δύο πολιτικές διαχείρισης:

**(α) ανακύκλωση** του εξαντλημένου καυσίμου για τον διαχωρισμό του ουρανίου και του πλουτωνίου από τα «λοιπά ραδιενεργά υλικά». Στην περίπτωση αυτή, αντιμετωπίζονται ως κατάλοιπα αυτά τα «λοιπά ραδιενεργά υλικά», τα οποία περιέχουν τα προϊόντα της σχάσης και τα υπερουράνια στοιχεία. Στόχοι της ανακύκλωσης είναι η απόκτηση των χρήσιμων ουρανίου και πλουτωνίου και ο περιορισμός του όγκου των καταλοίπων. Η πολιτική αυτή ακολουθείται από τις ευρωπαϊκές χώρες, πλην της Σουηδίας, και από την Ιαπωνία.

Οι συστάδες καυσίμου μεταφέρονται σε εργοστάσιο ανακύκλωσης<sup>26</sup> όπου διαχωρίζεται το ουράνιο και το πλουτώνιο από τα λοιπά ραδιενεργά προϊόντα. Το ουράνιο και το πλουτώνιο μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί ως σχάσιμο υλικό στους αντιδραστήρες. Τα εναπομένοντα ραδιενεργά προϊόντα θεωρούνται και είναι **κατάλοιπα** προς ασφαλή μακροχρόνια διαχείριση. Αποθηκεύονται προσωρινά σε υγρή μορφή σε κατάλληλες δεξαμενές πολλαπλών τοιχωμάτων από ανοξείδωτο χάλυβα, περιβαλλόμενες από προεντεταμένο σκυρόδεμα, όπου ψύχονται συνεχώς δεδομένου ότι συνεχίζουν να παράγουν σημαντικές ποσότητες θερμότητας. Μολονότι οι κανονισμοί ασφαλείας των εργοστασίων ανακύκλωσης και των εγκαταστάσεων προσωρινής αποθήκευσης είναι πολύ αυστηροί, διαρροές καταλοίπων από τα εργοστάσια αυτά στο περιβάλλον έχουν συμβεί.

Τα κατάλοιπα πρέπει, στη συνέχεια, να μετασχηματισθούν σε φυσικά ευσταθή και χημικά αδρανή μορφή. Η μέθοδος που εφαρμόζεται σήμερα σε βιομηχανική κλίμακα είναι η υαλοποίηση<sup>27</sup> των καταλοίπων. Αυτό γίνεται με αποξήρανση των καταλοίπων και συμπύκνωσή τους σε στεγνή πούδρα, η οποία αναμειγνύεται σε υγρό γυαλί παρόμοιο

---

<sup>24</sup> *Εξαντλημένο καύσιμο: σε αυτό, το ποσοστό του σχάσιμου υλικού έχει μειωθεί κάτω από κάποια τιμή, και δεν επαρκεί για να διατηρήσει τον αντιδραστήρα σε λειτουργία, οπότε πρέπει να εξαχθεί από την καρδιά και να αντικατασταθεί από «φρέσκο» καύσιμο.*

<sup>25</sup> *Παραδείγματος χάριν, αμέσως μόλις εξαχθεί εξαντλημένη συστάδα σύγχρονου αντιδραστήρα ελαφρού ύδατος, ηλεκτρικής ισχύος 1000 MW, είναι τόσο ραδιενεργός, ώστε εκλύει θερμότητα μερικών εκατοντάδων κιλοβάτ. Δεδομένου ότι η ραδιενέργεια μειώνεται με τον χρόνο, η παραγόμενη από τη συστάδα θερμότητα μετά από ένα έτος μειώνεται σε πέντε περίπου κιλοβάτ και μετά από πέντε έτη σε ένα κιλοβάτ.*

<sup>26</sup> *Τέτοια μεγάλα εμπορικά εργοστάσια λειτουργούν στη Γαλλία, στην Αγγλία και στη Ρωσία. Μικρότερα υπάρχουν στην Ινδία και την Ιαπωνία. Η Ιαπωνία εγκαθιστά μεγάλο εργοστάσιο ανακύκλωσης, ενώ μέχρι τώρα ανακυκλώνει το μεγαλύτερο μέρος του χρησιμοποιημένου καυσίμου της στην Ευρώπη.*

<sup>27</sup> *Η υαλοποίηση των καταλοίπων επελέγη διότι το γυαλί θεωρείται ευσταθές μη διαλυτό υλικό. Δεν έχει όμως αποδειχθεί πειραματικά ότι το γυαλί αυτό θα παραμείνει ευσταθές για τις χιλιάδες έτη που απαιτούνται. Είναι δύσκολο να αποδειχθεί για τέτοια χρονική κλίμακα. Η σχετική έρευνα συνεχίζεται.*

τύπου με το πυρέξ. Το υγρό γυαλί χύνεται σε μεγάλα δοχεία από ανοξείδωτο χάλυβα και εκεί συμπυκνώνονται σε «στερεό» γυαλί. Κάθε δοχείο περιέχει περίπου 400 kg τέτοιου γυαλιού. Τα δοχεία αυτά αποθηκεύονται προς το παρόν μεσοπρόθεσμα (για μερικές δεκαετίες), σε κατάλληλους επιβλεπόμενους χώρους.

Εργοστάσια υαλοποίησης λειτουργούν στη Γαλλία (από το 1978), στην Αγγλία, στο Βέλγιο, στη Ρωσία, στην Ινδία και ένα μικρό στην Ιαπωνία, η οποία μέχρι τώρα ανακυκλώνει το μεγαλύτερο μέρος των καταλοίπων της στην Ευρώπη, ενώ κατασκευάζει ένα μεγάλο εργοστάσιο υαλοποίησης. Αυτή είναι η κατάσταση βραχυπρόθεσμης διαχείρισης των καταλοίπων μετά από ανακύκλωση, σήμερα.

**(β) αντιμετώπιση του συνόλου της συστάδας εξαντλημένου καυσίμου ως καταλοίπου.** Η πολιτική αυτή ακολουθείται από τη Σουηδία, τις ΗΠΑ και τον Καναδά. Στις χώρες αυτές αξιολογείται ως οικονομικά μη ενδιαφέρον το «άρμεγμα» ουρανίου και πλουτωνίου, οπότε το σύνολο της συστάδας του εξαντλημένου καυσίμου, ως έχει, χωρίς οποιαδήποτε επεξεργασία, θεωρείται και υφίσταται διαχείριση ως κατάλοιπο.

Οι συστάδες του χρησιμοποιημένου καυσίμου φυλάσσονται, αρχικά, στους πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Βρίσκονται είτε στις δεξαμενές νερού του πυρηνικού σταθμού είτε σε ξηρά αποθήκευση. Με την ξηρά αποθήκευση, αφού η συστάδα καυσίμου μείνει επί μερικά έτη στη δεξαμενή νερού του πυρηνικού σταθμού, ώστε η παραγόμενη θερμότητα και η εκπεμπόμενη ραδιενέργεια να πέσουν σε ανεκτά επίπεδα, η συστάδα μεταφέρεται εκτός δεξαμενής και τοποθετείται σε δοχείο από μπετόν κατάλληλου πάχους, το οποίο λειτουργεί ως θωράκιση της ραδιενέργειας. Η ψύξη της συστάδας πραγματοποιείται με φυσική κυκλοφορία αέρα.

Εξαίρεση αποτελεί η Σουηδία, η οποία διαθέτει από το 1988 κεντρική εγκατάσταση αποθήκευσης καταλοίπων, όπου αποθηκεύονται σε δεξαμενή νερού, στην οποία προβλέπεται να παραμείνουν επί 40 έτη.

### **Οριστική εναπόθεση**

Ανεξάρτητα αν τα κατάλοιπα είναι από ανακύκλωση και υαλοποιημένα ή ολόκληρες συστάδες καυσίμου, η οριστική τους εναπόθεση προβλέπεται να γίνει βαθιά στο έδαφος. Πριν από αυτό θα παραμείνουν επί 40 έως 50 περίπου έτη στην προσωρινή αποθήκευση, όπως αυτή περιγράφηκε προηγουμένως, για τη μείωση της παραγόμενης θερμότητας και της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, ώστε ο χειρισμός τους να καταστεί ευκολότερος. Μετά προβλέπεται να τοποθετηθούν σε υδατοστεγή δοχεία από ανθεκτικό στη διάβρωση υλικό, π.χ. από ανοξείδωτο χάλυβα. Μετά, προβλέπεται να εναποτεθούν σε βάθος 500 έως 1.000 μέτρων σε γεωλογικό σχηματισμό, διά του οποίου δεν διέρχονται και δεν προβλέπεται να διέλθουν για πολλές χιλιετίες υπόγεια ύδατα. Τα δοχεία προβλέπεται επίσης να καλυφθούν με ικανού πάχους υλικό, που δυσχεραίνει τη διέλευση υδάτων, όπως η μπετονοτική άργιλος. Οι τύποι γεωλογικών σχηματισμών που είναι προς το παρόν υπό αξιολόγηση είναι σκληροί κρυσταλλικοί βράχοι και βράχοι άλατος.

Εάν, παρά τις προβλέψεις, διέλθουν υπόγεια ύδατα ικανά να μεταφέρουν «ουσίες» στην επιφάνεια της Γης και στο βιοσύστημα, θα πρέπει να μη διαβρώσουν τα δοχεία και να μην έλθουν σε επαφή με τα κατάλοιπα. Εάν, παρά ταύτα, διαβρώσουν τα σχεδιασμένα ως μη διαβρώσιμα στεγανά δοχεία, δεν θα πρέπει να διαλύσουν τα προβλεπόμενα ως αδιάλυτα κατάλοιπα (γυαλί, κεραμικό διοξειδίο του άνθρακα).

Είναι φανερό ότι εφαρμόζεται και εδώ η **φιλοσοφία της άμυνας σε βάθος**, με την έννοια ότι σχεδιάζονται διαδοχικά φράγματα αποτροπής της ρύπανσης της βιόσφαιρας, καθένα από τα οποία έχει μικρή πιθανότητα να διαρραγεί.

Υπάρχουν όμως κρίσιμα και ενδεχομένως αμφιλεγόμενα ζητήματα. Δεδομένου του τόσο μεγάλου χρονικού διαστήματος, που απαιτείται για την ασφαλή διαχείριση των καταλοίπων, η οποία συνεπάγεται την εμπλοκή πολλών επερχόμενων γενεών, ποίον βαθμό τεχνικής βεβαιότητας πρέπει να απαιτήσουμε ώστε :

- οι γεωλογικοί σχηματισμοί να παραμείνουν ευσταθείς και να μην διέλθουν δι' αυτών υπόγεια ύδατα,
- και αν διέλθουν, να μην διαβρωθούν τα δοχεία,
- και αν διαβρωθούν τα δοχεία τα κατάλοιπα να παραμένουν ευσταθή, μη διαλυτά.

Μέχρι σήμερα λειτουργεί μία μόνο εγκατάσταση εναπόθεσης ραδιενεργών καταλοίπων βαθιά στη Γη στις ΗΠΑ, για ραδιενεργά κατάλοιπα των ενόπλων δυνάμεων. Η Σουηδία προγραμματίζει εγκατάσταση οριστικής εναπόθεσης στο έδαφος μεταξύ των ετών 2015 και 2020.

Περιβαλλοντική ρύπανση από ραδιενεργά κατάλοιπα έχει συμβεί (διαρροές από δοχεία αποθήκευσης, ρύπανση γης) από τα πυρηνικά πολεμικά προγράμματα σε χώρες όπως οι ΗΠΑ και η πρώην Σοβιετική Ένωση.

### 3.8 Συμπεράσματα

Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η πυρηνική ενέργεια από σχάση και σύντηξη μπορεί να καλύψει τις αναπτυξιακές ανάγκες της ανθρωπότητας εις το διηνεκές, πράγμα που δεν είναι δυνατό με καμία άλλη διαθέσιμη πηγή ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια και οι άλλες ονομαζόμενες ήπιες μορφές ενέργειας, μολονότι πρέπει να αναπτυχθούν, διότι μπορούν να συμβάλουν σε αξιόλογη εξοικονόμηση ενέργειας, δεν είναι σε θέση να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες βάσης της σύγχρονης κοινωνίας, λόγω της ασυνεχούς διαθεσιμότητάς τους και του μικρού μεγέθους πυκνότητας ισχύος που παρέχουν.

Υπάρχουν εύλογες αντιρρήσεις για την εγκατάσταση και χρήση πυρηνικών εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αντιρρήσεις που σχετίζονται με τις συνέπειες μεγάλου ατυχήματος και την ανάγκη μακροχρόνιας διαχείρισης των ραδιενεργών καταλοίπων. Είναι αναγκαίο κατ' αρχήν να διευκρινιστεί ότι, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, η ρύπανση του περιβάλλοντος από τις πυρηνικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής είναι αμελητέα, σε σχέση με την πραγματικά μεγάλη ρύπανση του περιβάλλοντος που προκαλούν οι συμβατικές μονάδες που καίνε ορυκτά καύσιμα, με ρύπους συμβατικούς (διοξειδίο του άνθρακα, βαρέα μέταλλα κ.α.), αλλά και ραδιενεργούς (ράδιο, ουράνιο, θόριο). Η καύση ακόμη και του "πιο καθαρού" καυσίμου, του φυσικού αερίου, επιβαρύνει την ατμόσφαιρα με τις ίδιες περίπου ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα που εκλύεται από την καύση οποιουδήποτε άλλου συμβατικού καυσίμου, για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ενέργειας. Οι συνέπειες μεγάλου πυρηνικού ατυχήματος μπορεί πράγματι να είναι πολύ σοβαρές για το περιβάλλον και την υγεία πληθυσμών. Πολύ σοβαρές μπορεί να είναι και οι συνέπειες μεγάλου ατυχήματος σε άλλες σύγχρονες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπως π.χ. οι συνέπειες του ατυχήματος που συνέβη στο χημικό εργοστάσιο του Σεβέζο. Εδώ και μισό αιώνα λειτουργούν ανά τον κόσμο πολλοί πυρηνικοί αντιδραστήρες ισχύος. Στο διάστημα αυτό, από όλο αυτό το μεγάλο πλήθος αντιδραστήρων συνέβη σε έναν, αυτόν του Τσέρνομπιλ, το μεγάλο ατύχημα. Το ατύχημα του Τσέρνομπιλ υπήρξε το μέγιστο δυνατό ατύχημα ως προς τις συνέπειες. Συνέβη υπό τις δυσμενέστερες συνθήκες ως προς τη διασπορά των ρύπων και στην πλέον κρίσιμη εποχή του έτους (Μάιος) ως προς τη γεωργική παραγωγή. Μετά από αυτό το ατύχημα, η ασφάλεια των πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος έχει διεθνώς ενισχυθεί πολύ σημαντικά. Σε εφαρμογή της διεθνούς «Συνθήκης για την Ασφάλεια των Πυρηνικών Αντιδραστήρων», κάθε τρία έτη, κάθε χώρα εκθέτει σε σύνοδο ειδικών από όλο τον κόσμο τα θέματα ασφαλείας των πυρηνικών αντιδραστήρων της χώρας και ελέγχεται από τους ειδικούς της συνόδου. Τα ίδια ισχύουν και με τα κατάλοιπα, σε εφαρμογή της διεθνούς «Συνθήκης για την Ασφάλεια της Διαχείρισης των Πυρηνικών Καταλοίπων».

***Η διακινδύνευση από τη λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος δεν είναι μεγαλύτερη από τη διακινδύνευση από άλλες σύγχρονες βιομηχανικές διεργασίες μεγάλης κλίμακας, όπως π.χ. των χημικών εργοστασίων. Είναι δε δυνατή η αύξηση της ασφαλείας και η μείωση της διακινδύνευσης σε πολύ σημαντικό βαθμό, αν διατεθούν κεφάλαια, ομολογουμένως μεγάλης κλίμακας, για την ανάπτυξη των ονομαζόμενων ασφαλών αντιδραστήρων του μέλλοντος. Εν κατακλείδι, το ζήτημα της ασφαλείας των***

πυρηνικών αντιδραστήρων δεν είναι τεχνικό, αλλά οικονομικό πρόβλημα. Πέραν αυτών εκτιμάται ότι η λειτουργία του θερμοπυρηνικού αντιδραστήρα σύντηξης θα είναι ιδιαίτερα ασφαλής. Εκτιμάται ότι είναι δυνατόν να αναπτυχθεί αντιδραστήρας ελεγχόμενης σύντηξης, που θα παράγει περισσότερη ενέργεια από όση θα καταναλώνει, μέσα στις επόμενες δεκαετίες και ότι είναι δυνατόν να επιτευχθεί μέσα στον 21<sup>ο</sup> αιώνα βιομηχανική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αντιδραστήρες σύντηξης. Όταν αυτό επιτευχθεί, η ανθρωπότητα θα διαθέτει άφθονη ενέργεια εις το διηνεκές. Αξιόλογος αριθμός Ελλήνων ερευνητών συμμετέχει ενεργά στο Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Σύντηξης.

Όπως προαναφέρθηκε, το πρόβλημα των ραδιενεργών καταλοίπων από τους αντιδραστήρες σχάσης<sup>28</sup> συνίσταται στο γεγονός ότι πολλά από αυτά είναι πολύ μακρόβια, οπότε επιβάλλεται ασφαλής διαχείρισή τους επί πολλές χιλιετίες μετά την παραγωγή τους. Από τεχνική άποψη αυτό είναι εφικτό, αλλά επιβαρύνει πολλές επερχόμενες γενεές με τη μέριμνα και το κόστος της διαχείρισης. Από την άλλη πλευρά, τα κατάλοιπα των συμβατικών σταθμών παραγωγής ενέργειας (διοξειδίο του άνθρακα και του θείου, βαρέα μέταλλα κ.ά.) εκλύονται και συσσωρεύονται στην ατμόσφαιρα. Μετά την έκλυση **δεν υπάρχει δυνατότητα ελέγχου τους από τον άνθρωπο**, με όλα όσα συνεπάγεται αυτό, π.χ. για το κλίμα. Από τους συμβατικούς ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς εκλύονται ετησίως περίπου 2.500 εκατομμύρια τόνοι αερίων θερμοκηπίου<sup>29</sup> στις ΗΠΑ και περίπου 1.000 εκατομμύρια τόνοι ετησίως στην Ευρωπαϊκή Ένωση, ενώ η αντίστοιχη ετήσια έκλυση στην Ελλάδα είναι 30 εκατομμύρια τόνοι<sup>30</sup>. Η λειτουργία των 140 πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος που παράγουν το 35% της ηλεκτρικής ισχύος στην Ευρωπαϊκή Ένωση συνεπάγεται μείωση της παραγωγής τέτοιων αερίων κατά 300 περίπου εκατομμύρια τόνους ετησίως<sup>31</sup>. Η έκταση και η σοβαρότητα του προβλήματος μπορεί να γίνει αντιληπτή αν λάβουμε υπ' όψιν ότι η κατά κεφαλήν παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο μεγαλύτερο μέρος της ανθρωπότητας, αυτό του ονομαζόμενου τρίτου κόσμου, είναι ασήμαντη σε σχέση με αυτήν του ανεπτυγμένου κόσμου. Για να επιτευχθεί η ανάπτυξη, η ευημερία και η βελτίωση της υγείας και αυτού του μέρους της ανθρωπότητας θα χρειαστεί η εγκατάσταση σταθμών ηλεκτροπαραγωγής ισχύος πολλαπλάσιας αυτής που είναι σήμερα εγκατεστημένη παγκοσμίως. Αν αυτό γίνει με συμβατικές μονάδες καύσης ορυκτών καυσίμων, πέραν της ταχείας εξαντλήσεως των αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων που θα επιφέρει, θα επιβαρύνει περαιτέρω την ατμόσφαιρα με αντίστοιχα πολλαπλάσιες ποσότητες συμβατικών καταλοίπων. Συνεπώς, η επιλογή που έχουμε σήμερα είναι μεταξύ (α) συμβατικών μονάδων, με συνέπεια την άνευ ελέγχου έκλυση καταλοίπων στην ατμόσφαιρα, και (β) πυρηνικών αντιδραστήρων σχάσης, όπου η διαχείριση των καταλοίπων θα είναι μεν υπό τον έλεγχο του ανθρώπου, αλλά η ασφαλής διαχείριση επιβάλλεται να συνεχίζεται επί χιλιάδες έτη.

<sup>28</sup> Οι αντιδραστήρες σύντηξης δεν αναμένεται να παράγουν μακρόβια ραδιενεργά κατάλοιπα.

<sup>29</sup> Αέρια θερμοκηπίου: αέρια (κυρίως διοξείδιο του άνθρακα κ.α.) στην ατμόσφαιρα, τα οποία παγιδεύουν ενέργεια από τον Ήλιο, με συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας και τη μεταβολή του κλίματος. Είναι σχετικώς μακρόβια και, κατά συνέπεια, συσσωρεύονται και αναμειγνύονται στην ατμόσφαιρα. Οι επιπτώσεις τους είναι ανεξάρτητες του τόπου παραγωγής τους. Περίπου το 82% των εκπομπών αυτών των αερίων προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την κίνηση των αυτοκινήτων.

<sup>30</sup> United States Environmental Protection Agency.

<sup>31</sup> M. Hugon, S Casalta 'Results and Exploitation of FP4 and FP5 research in the area Future Systems', European Commission DG Research-J-4

## 4 Οικονομικά Στοιχεία

### 4.1 Κόστος κιλοβατώρας (kWh)<sup>32</sup>

Γενικά το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με συμβατικές ή πυρηνικές μονάδες, μεταβάλλεται σημαντικά με την γεωγραφική θέση του σταθμού παραγωγής. Κατά συνέπεια τα οικονομικά μεγέθη που παρατίθενται εδώ θα πρέπει να αναγνωσθούν ως ενδεικτικές τάξεις μεγέθους.

Περίπου το μισό κόστος του πυρηνικού καυσίμου οφείλεται στον εμπλουτισμό και την κατασκευή των συστάδων του καυσίμου<sup>33</sup>. Η διαχείριση του ραδιενεργού χρησιμοποιημένου καυσίμου, η τελική εναπόθεση του χρησιμοποιημένου καυσίμου, ή των καταλοίπων και η αποξήλωση των εγκαταστάσεων, έχουν ήδη ενσωματωθεί στο κόστος της κιλοβατώρας και έχουν ήδη σχηματισθεί σχετικά αποθεματικά κεφάλαια στις «πυρηνικές χώρες».

Στις ΗΠΑ, το 2007, το κόστος εξόρυξης, επεξεργασίας, εμπλουτισμού και κατασκευής του πυρηνικού καυσίμου εκτιμάται σε 0,5 ως 0,635 c/kWh (1\$=100 c). Η συμβολή του ορυκτού εκτιμάται σε 25% αυτού του κόστους, οπότε διπλασιασμός της τιμής του ορυκτού επιφέρει 50% αύξηση του κόστους καυσίμου.

Στις ΗΠΑ (i) το κόστος αποξήλωσης (decommissioning) εκτιμάται σε περίπου σε 9% ως 15% του αρχικού κόστους κεφαλαίου (εγκατάστασης) μιας πυρηνικής μονάδας και χρεώνεται με 0,1 ως 0,2 c/kWh και (ii) το κόστος διαχείρισης χρησιμοποιημένου καυσίμου και εναπόθεσης συμβάλει με περίπου 10% στο κόστος της kWh και χρεώνεται με 0,1 c/kWh. Αντίστοιχα συμβαίνουν και σε άλλες χώρες που διαθέτουν πυρηνικά εργοστάσια, π.χ. για τη διαχείριση και εναπόθεση χρησιμοποιημένου καυσίμου, στη Σουηδία χρεώνεται 0,13 US c/kWh (το κεφάλαιο που συγκεντρώνεται χρησιμοποιείται για έρευνα γεωλογικής εναπόθεσης), παρόμοια και στη Γαλλία. Στη Γαλλία και τη Σουηδία εκτιμούν το κόστος αποξήλωσης σε 10% ως 15% του κόστους κατασκευής και το χρεώνουν στην παραγόμενη kWh.

Ενδεικτικά, κυρίως για την ανάλυση κόστους και πολύ λιγότερο για τις τιμές καθαυτές, αναφέρεται ότι το 2007 το Energy Utility Cost Group των ΗΠΑ δημοσίευσε τις εξής μέσες τιμές.

|                          |             |
|--------------------------|-------------|
| Λειτουργία και συντήρηση | 1,832 c/kWh |
| Καύσιμο                  | 0,449 c/kWh |

<sup>32</sup> Πηγές των στοιχείων που παρατίθενται:

OECD/ IEA NEA 1998, *Projected Costs of Generating Electricity*.

OECD/ IEA NEA 2005, *Projected Costs of Generating Electricity- update*.

OECD, 1994, *The Economics of the Nuclear Fuel Cycle*.

Nuclear Europe Worldscan 7-8/97.

NEI: *US generating cost data*.

Tarjanne & Rissanen, 2000, in *Proceedings 25th International Symposium, Uranium Institute*.

Percebois J. 2003, *The peaceful uses of nuclear energy, Energy Policy* 31, 101-08, Jan 2003.

Nucleonics Week 20/2/03.

Royal Academy of Engineering 2004, *The costs of generating electricity*.

Canadian Energy Research Institute, August 2004, *Levelised Unit Electricity Cost Comparison - Ontario*.

University of Chicago, August 2004, *The Economic Future of Nuclear Power*.

Feretic D, & Tomsic Z, 2004, *Probabilistic analysis of electrical energy costs, Energy Policy* 33,1; Jan 2005.

EC Energy policy papers January 2007.

Economic Research Council 2008, *New Nuclear Build in the UK - the criteria for delivery*.

Congressional Budget Office May 2008 *Nuclear Power's Role in Generating Electricity*.

Nuclear Energy Institute, Aug 2008, *The cost of new generating capacity in perspective*.

<sup>33</sup> Το φυσικό ουράνιο έχει το σχάσιμο ισότοπο U-235 σε ποσοστό μάζας  $e = 0,7\%$ . Για τη λειτουργία των αντιδραστήρων ύδατος, που είναι οι πιο διαδεδομένοι, απαιτείται ουράνιο με ποσοστό μάζας (εμπλουτισμό)  $e = 3,5\%$  περίπου. Η διεργασία αύξησης του  $e$  ονομάζεται εμπλουτισμός.

Κεφάλαιο

0,585 c/kWh**Σύνολο****2,866 c/kWh**

Σημειώνεται ότι το κόστος καυσίμου συμβάλλει με λιγότερο από 20% στο κόστος της kWh. Δεδομένου ότι το κόστος του ορυκτού συμβάλλει με περίπου 25% στο κόστος του καυσίμου, έπεται ότι το κόστος του ορυκτού συμβάλλει κατά 5% περίπου στο κόστος της kWh. Είναι φανερό ότι η κτήση κοιτασμάτων ουρανίου δεν έχει τόσο οικονομική αξία, αλλά, κυρίως, **σημασία ενεργειακής αυτονομίας**.

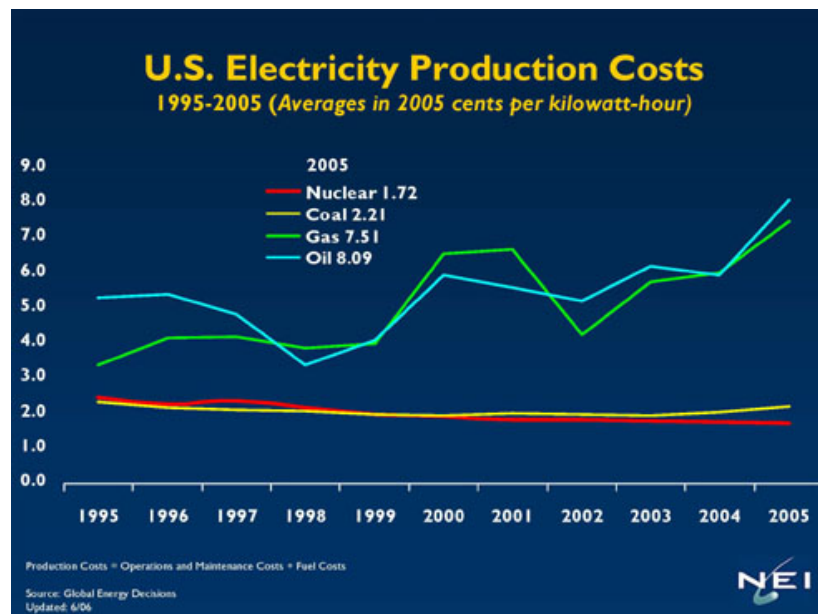
Το Nuclear Energy Institute των ΗΠΑ έδωσε (2008) το ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 4.1) μεταβολής του κόστους της kWh, στις ΗΠΑ, στο οποίο περιέχεται μόνο το κόστος καυσίμου, λειτουργίας και συντήρησης και όχι το κόστος κεφαλαίου, διότι αυτό διαφέρει πολύ σημαντικά μεταξύ εταιριών και πολιτειών των ΗΠΑ. Παρατίθεται, επίσης ενδεικτικά, ο συγκριτικός Πίνακας 4.1 του ΟΟΣΑ, US2003 cents/kWh, με επιτόκιο 5%, χρόνο λειτουργίας (απόσβεση σε) 40 έτη, συντελεστής φορτίου 85%. Πηγή: OECD/IEA NEA 2005

**Πίνακας 4.1:** Κόστος kWh, προβολή για το έτος 2010.

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

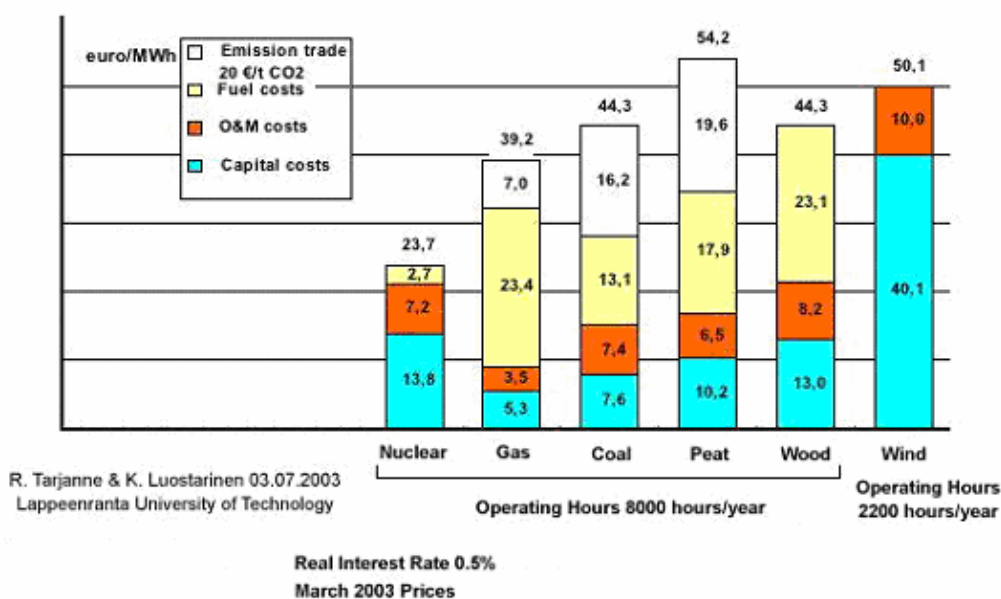
Στη μελέτη του ΟΟΣΑ δεν περιλαμβάνεται οικονομική επιβάρυνση των συμβατικών καυσίμων για εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η μελέτη βασίστηκε σε περίπου 100 μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μεταξύ των οποίων 13 πυρηνικές, οι οποίες θα λειτουργούσαν μεταξύ 2010 και 2015. Το κόστος κεφαλαίου για τις πυρηνικές μονάδες, χωρίς τόκους (overnight cost) εκυμαίνετο μεταξύ US\$ 1000/kW στην Τσεχία και US\$ 2500/kW στην Ιαπωνία, με μέσο όρο US\$ 1500/kW. Το (overnight) κόστος κεφαλαίου για τις μονάδες άνθρακα (coal) ήταν US\$ 1000-1500/kW, των μονάδων φυσικού αερίου US\$ 500-1000/kW και των ανεμογεννητριών US\$ 1000-1500/kW. Το κόστος για ανεμογεννήτριες εκτιμήθηκε σε 8 cents/kWh. Όπως φαίνεται από τον πίνακα το κόστος παραγωγής με πυρηνική ενέργεια

εκτιμάται σημαντικά μικρότερο από το κόστος με άνθρακα σε επτά από δέκα χώρες και μικρότερο από το κόστος παραγωγής με φυσικό αέριο σε όλες εκτός από μία χώρα. Στην Ιαπωνία το κόστος από πυρηνική ενέργεια είναι πολύ μεγαλύτερο από οποιαδήποτε άλλη χώρα.



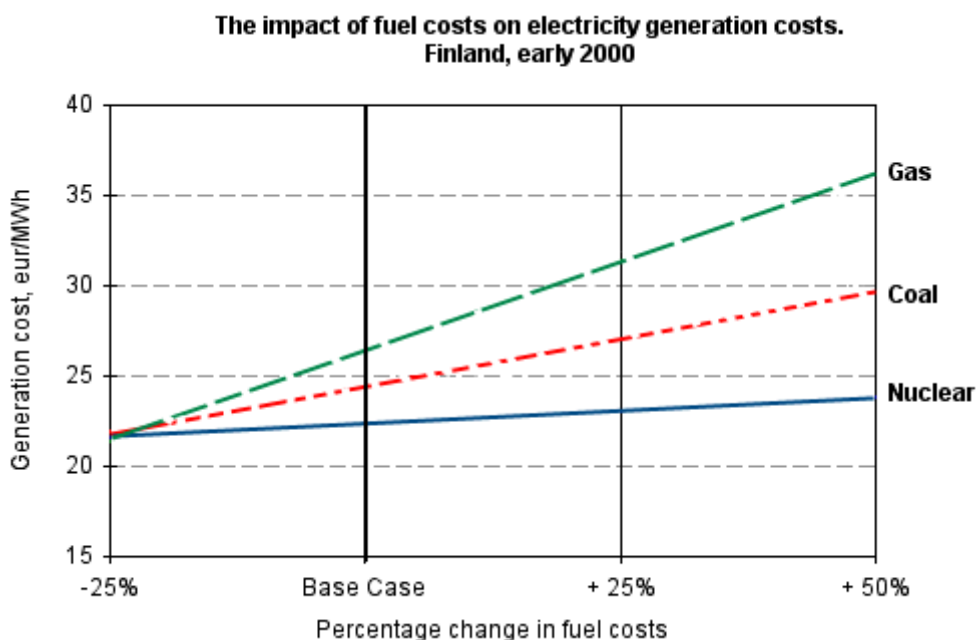
Σχήμα 4.1: Κόστος Παραγωγής Ηλεκτρισμού.

Τα αποτελέσματα λεπτομερούς μελέτης της Φινλανδίας για τα οικονομικά της ενέργειας συνοψίζονται στο Σχήμα 4.2. Με τιμές του 2003 (με 91% capacity factor, 5% επιτόκιο, ζωή μονάδος 40 έτη) το κόστος από πυρηνική ενέργεια εκτιμάται σε € 2,37 c/kWh, άνθρακα € 2,81 c/kWh και φυσικό αέριο € 3,23 c/kWh. Με επιβάρυνση των εκπομπών CO<sub>2</sub> με € 20/t CO<sub>2</sub> οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνονται σε € 4,43 c/kWh για άνθρακα και € 3,92 c/kWh για φυσικό αέριο.



Σχήμα 4.2: Οικονομικά ενέργειας Φινλανδίας.

Τα αποτελέσματα Φινλανδικής μελέτης του 2000 για την ευαισθησία της τιμής της kWh συνοψίζονται στο Σχήμα 4.3. Απ' αυτήν προκύπτει ότι διπλασιασμός της τιμής καυσίμου επιφέρει αύξηση του κόστους kWh περίπου 9% από πυρηνική ενέργεια, 31% από άνθρακα και 66% από φυσικό αέριο.



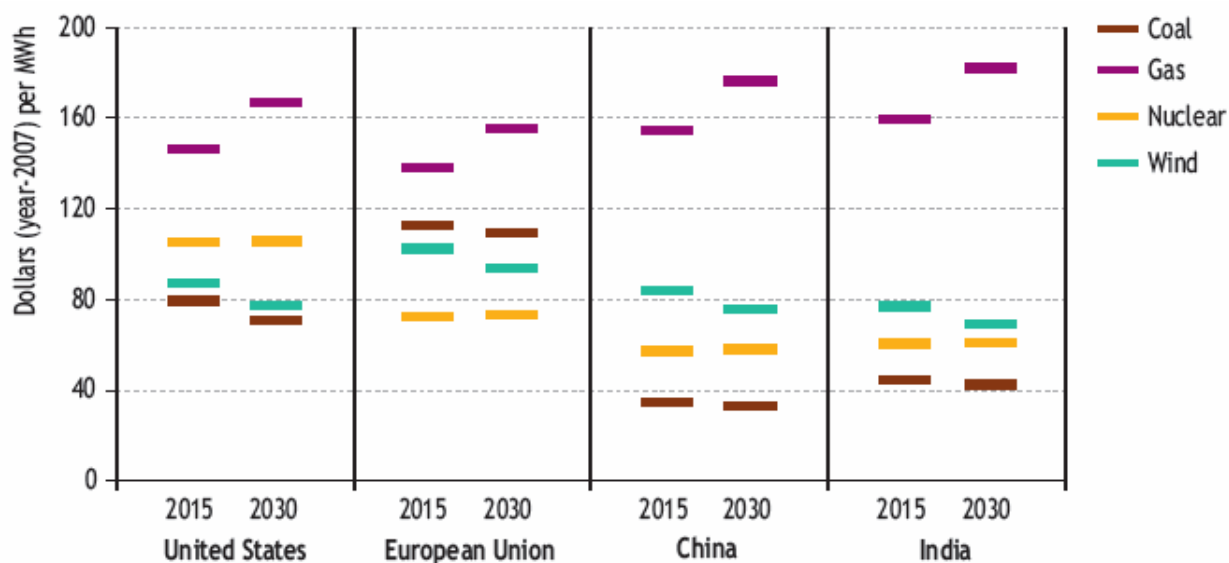
**Σχήμα 4.3:** Ευαισθησία της τιμής της kWh στην τιμή καυσίμου.

**Πίνακας 4.2:** Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (US cent/kWh).

|                          | MIT<br>2003 | France<br>2003 | UK 2004  | Chicago<br>2004 | Canada<br>2004 | EU 2007    |
|--------------------------|-------------|----------------|----------|-----------------|----------------|------------|
| <b>Nuclear</b>           | 4.2         | 3.7            | 4.6      | 4.2 - 4.6       | 5.0            | 5.4 - 7.4  |
| <b>Coal</b>              | 4.2         |                | 5.2      | 3.5 - 4.1       | 4.5            | 4.7 - 6.1  |
| <b>Gas</b>               | 5.8         | 5.8,<br>10.1   | 5.9, 9.8 | 5.5 - 7.0       | 7.2            | 4.6 - 6.1  |
| <b>Wind<br/>onshore</b>  |             |                | 7.4      |                 |                | 4.7 - 14.8 |
| <b>Wind<br/>offshore</b> |             |                | 11.0     |                 |                | 8.2 - 20.2 |

Σχετικές μελέτες έχουν δημοσιοποιηθεί από το French Energy Secretariat (2003), την UK Royal Academy of Engineering (2004), το Canadian Energy Research Institute (2004), το MIT (2003), το University of Chicago (2004), το US Congressional Budget Office (2008) και άλλους. Στον Πίνακα 4.2 συγκρίνονται τα συμπεράσματα κάποιων από αυτές τις μελέτες.

Υπάρχουν αρκετές πιθανές αιτίες μεταβλητότητας των εκτιμήσεων του κόστους κεφαλαίου, το οποίο επηρεάζει πολύ σημαντικά την εκτίμηση του κόστους της kWh. Αυτές οι αιτίες μεταβλητότητας δεν επιτρέπουν αξιόπιστη σύγκριση των εκτιμώμενων τιμών κόστους κεφαλαίου.



Note: Costs include a carbon value of \$30 per tonne of CO<sub>2</sub> in the European Union. In 2015, coal refers to supercritical steam. In 2030, coal refers to IGCC for the United States, ultrasupercritical steam for Europe and China, and supercritical steam for India. Gas refers to CCGT.

Source: IEA analysis.

**Σχήμα 4.4:** Κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά τύπο καυσίμου και γεωγραφική περιοχή.

**Πίνακας 4.3:** Παράγοντες που επηρεάζουν κόστος μονάδων ηλεκτροπαραγωγής

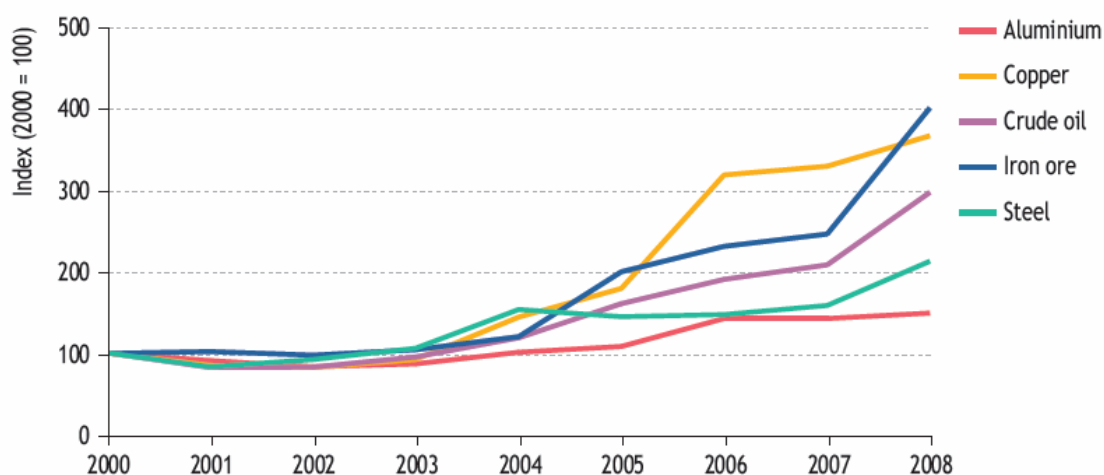
| Price trend since 2003                                  |                    |
|---------------------------------------------------------|--------------------|
| <b>Civil engineering</b>                                |                    |
| Construction materials (cement, steel, etc.)            | ↗                  |
| Labour costs (local, international)                     | ↗                  |
| <b>Power plant</b>                                      |                    |
| Main mechanical components (boiler, generator, turbine) | ↑ (approx. + 270%) |
| Other mechanical equipment (e.g. piping)                | ↑ (+150%)          |
| Electrical assembly and wiring:                         | ↑                  |
| - cables                                                | (+150%)            |
| - transformers                                          | (+60%-90%)         |
| Engineering and plant start up                          | ↗                  |
| <b>Additional factors</b>                               |                    |
| Transportation and logistic costs                       | ↗                  |
| Power plant demand                                      | ↗                  |
| Cost of capital and inflation                           | →                  |

Note: A vertical arrow denotes large increases, a slanted arrow moderate increases, and a flat arrow no increase.

Source: Siemens AG.

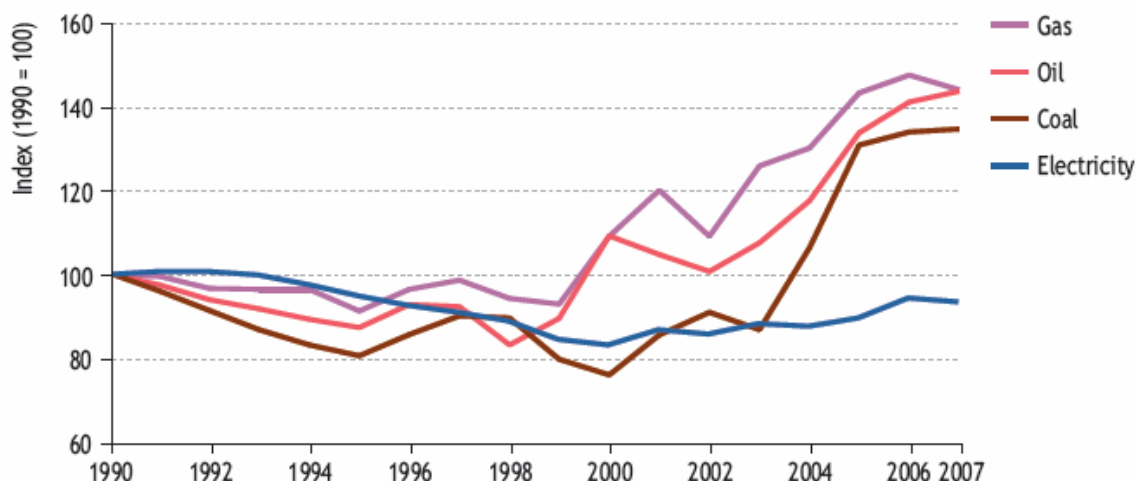
Τα πιο πρόσφατα στοιχεία κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά τύπο καυσίμου και γεωγραφική περιοχή, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.4 και δημοσιεύθηκαν το Νοέμβριο του 2008 από την IEA στο World Energy Outlook 2008<sup>34</sup>. Στην ίδια μελέτη, σχολιάζεται και αναλύεται το κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού (Πίνακας 4.3) καθώς και οι αυξητικές τάσεις που παρουσιάζει και οφείλονται κυρίως στην αύξηση:

- των πρώτων υλών (Σχήμα 4.5)
- του κόστους ενέργειας
- της αυξανόμενης ζήτησης
- του περιορισμένου δυναμικού παραγωγής εξοπλισμού
- της αύξησης του εργατικού κόστους



Sources: IMF (www.imf.org); CRU (cruonline.crugroup.com); and IEA databases.

**Σχήμα 4.5:** Εξέλιξη τιμών πρώτων υλών.

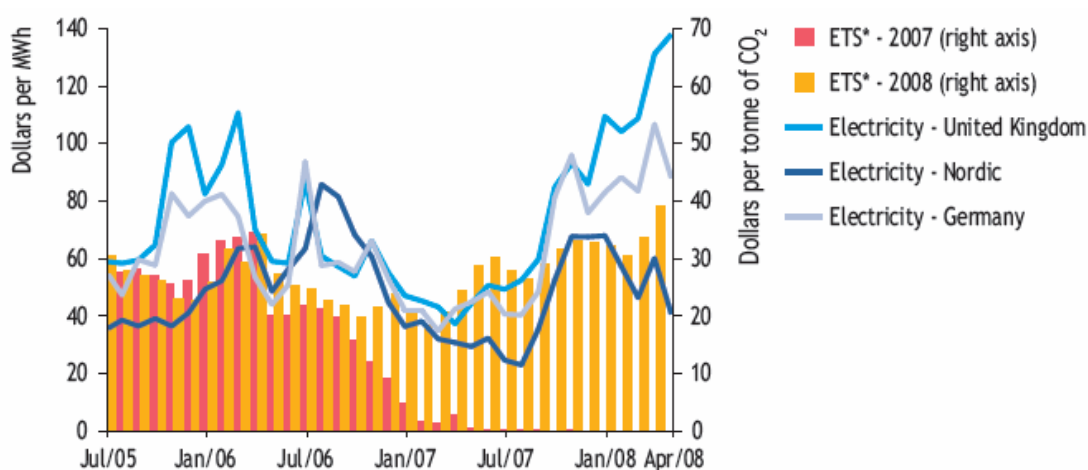


Source: IEA databases.

**Σχήμα 4.6:** Εξέλιξη τιμών ηλεκτρισμού και καυσίμων στις χώρες του ΟΟΣΑ

<sup>34</sup> International Energy Agency, IEA World Energy Outlook, 2008.

Η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας που πληρώνουν οι καταναλωτές, έχει αυξηθεί στις χώρες του ΟΟΣΑ από το 2000 και μετά, ακολουθώντας μία μικρή πτώση στη διάρκεια της δεκαετίας του '90 (Σχήμα 4.6). Η επίπτωση της τιμής καυσίμου στο τελικό κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού είναι περισσότερο εμφανής στις μονάδες φυσικού αερίου. Η τιμολόγηση του ηλεκτρισμού καθορίζεται από το οριακό κόστος παραγωγής, που στις περισσότερες αγορές διαμορφώνεται από τις μονάδες φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου. Παρόλο που το κόστος του άνθρακα και του ουρανίου αυξήθηκαν σημαντικά την τελευταία δεκαετία, ειδικά στην περίπτωση του ουρανίου, η επίπτωση της τιμής του καυσίμου στο συνολικό κόστος ηλεκτροπαραγωγής είναι ιδιαίτερα χαμηλή (5%). Το κόστος των δικαιωμάτων εκπομπών αέριων ρύπων αναμένεται να επιβαρύνει σημαντικά το κόστος ηλεκτροπαραγωγής από ανθρακικές μονάδες στο μέλλον (Σχήμα 4.7).



\*ETS – European Trading Scheme.

Sources: EEX ([www.eex.com/en/](http://www.eex.com/en/)); Elexon ([www.elexon.co.uk/](http://www.elexon.co.uk/)); Nord Pool ([www.nordpool.com/asa/](http://www.nordpool.com/asa/)); and Powerltext ([www.powernext.fr/](http://www.powernext.fr/)).

**Σχήμα 4.7:** Εξέλιξη τιμών ηλεκτρισμού και δικαιωμάτων αέριων ρύπων στην ΕΕ.

## 4.2 Διαθεσιμότητα πυρηνικού καυσίμου<sup>35</sup>

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι εκτιμήσεις για τις διαθέσιμες ποσότητες ορυκτού ουρανίου είναι συνάρτηση της τρέχουσας τιμής του ουρανίου. Ο Πίνακας 4.4 και το Σχήμα 4.8 είναι ενδείξεις της παρούσας γνώσης για τα παγκόσμια αποθέματα.

Η παρούσα ζήτηση είναι περίπου 65.000 tU/y. Κατά συνέπεια τα γνωστά αποθέματα (5,5 Mt) επαρκούν για τη λειτουργία των υπαρχόντων αντιδραστήρων για περίπου 80 έτη. Βάσει της υπάρχουσας γεωλογικής γνώσης, υψηλότερες τιμές και περαιτέρω γεωλογική εξερεύνηση εκτιμάται ότι θα καταστήσουν αξιοποιήσιμα και άλλα αποθέματα. Διπλασιασμός της σημερινής τιμής του ουρανίου εκτιμάται ότι θα αποδώσει δεκαπλάσιασμό των αποθεμάτων (διπλασιασμός της τιμής του φυσικού ουρανίου επιφέρει αύξηση του κόστους της κιλοβατώρας κατά 10%). Αυτό υποδεικνύεται στα δεδομένα των IAEA-NEA<sup>36</sup> που, λαμβάνοντας υπ' όψιν εκτιμήσεις όλων των συμβατικών πηγών ουρανίου, εκτιμούν τα

<sup>35</sup> Πηγές: WNA: *Can Uranium Supplies Sustain the Global Nuclear Renaissance?* (2005), *Supply of Uranium* (2008)

Euratom Supply Agency, *Analysis of the Nuclear fuel Availability at EU Level from a security of Supply Perspective. Final Report of the Task Force* (2005)

OECD NEA & IAEA, 2006, *Uranium 2005: Resources, Production and Demand*

<sup>36</sup> OECD NEA & IAEA, 2006, *Uranium 2005: Resources, Production and Demand*

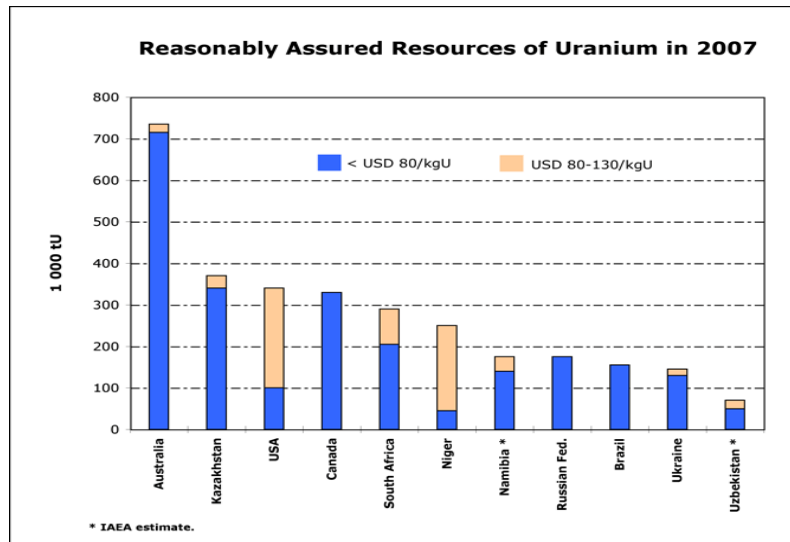
αποθέματα σε 10,5 Mt, επιπλέον των γνωστών οικονομικά αξιοποιήσιμων 5,5 Mt. Με τη σημερινή κατανάλωση αυτά επαρκούν για λειτουργία 200 ετών. Φαίνεται ότι υπάρχουν αξιόλογα κοιτάσματα ουρανίου στη Βόρεια Ελλάδα, αλλά η ΟΕ δεν κατάφερε να έχει επίσημη πληροφόρηση.

Εκτεταμένη χρήση του αναγεννητικού αντιδραστήρα ταχέων νετρονίων μπορεί να αυξήσει την αξιοποίηση του φυσικού ουρανίου κατά 50 περίπου φορές. Σε αυτούς τους αντιδραστήρες παράγεται το σχάσιμο πλουτώνιο (Pu-239), με μεταστοιχείωση του μη-σχάσιμου U-238 μετά από απορρόφηση ενός νετρονίου. Το φυσικό ουράνιο περιέχει το μη-σχάσιμο U-238 σε ποσοστό βάρους περισσότερο από 99% και το σχάσιμο U-235 σε ποσοστό 0,7%. Έτσι, αυτοί οι αντιδραστήρες μπορούν να παράγουν περισσότερο σχάσιμο υλικό (Pu-239) από όσο καταναλώνουν, εξ' ου και το όνομα «αναγεννητικοί».

Επίσης σε ειδικά σχεδιασμένους αντιδραστήρες μπορεί να χρησιμοποιηθεί θόριο για την παραγωγή σχάσιμου U-233. Σε αυτούς το Th-232, απορροφώντας ένα νετρόνιο, μεταστοιχείωνεται U-233. Μολονότι το θόριο δεν έχει, μέχρι σήμερα, εμπορική χρήση, κάποιοι προηγμένοι αντιδραστήρες είναι πιθανό να μπορούν να χρησιμοποιούν κύκλο θορίου. Εκτιμάται ότι οι ποσότητες θορίου στο φλοιό της γης είναι τριπλάσιες από αυτές του ουρανίου. Το IAEA-NEA "Red Book" (2005) αναφέρει ποσότητα αποθεμάτων 4,5 Mt.

**Πίνακας 4.4: Γνωστά αποθέματα ουρανίου (2007)**

|                     | tonnes U         | percentage of world |
|---------------------|------------------|---------------------|
| <b>Australia</b>    | 1,243,000        | 23%                 |
| <b>Kazakhstan</b>   | 817,000          | 15%                 |
| <b>Russia</b>       | 546,000          | 10%                 |
| <b>South Africa</b> | 435,000          | 8%                  |
| <b>Canada</b>       | 423,000          | 8%                  |
| <b>USA</b>          | 342,000          | 6%                  |
| <b>Brazil</b>       | 278,000          | 5%                  |
| <b>Namibia</b>      | 275,000          | 5%                  |
| <b>Niger</b>        | 274,000          | 5%                  |
| <b>Ukraine</b>      | 200,000          | 4%                  |
| <b>Jordan</b>       | 112,000          | 2%                  |
| <b>Uzbekistan</b>   | 111,000          | 2%                  |
| <b>India</b>        | 73,000           | 1%                  |
| <b>China</b>        | 68,000           | 1%                  |
| <b>Mongolia</b>     | 62,000           | 1%                  |
| <b>other</b>        | 210,000          | 4%                  |
| <b>World total</b>  | <b>5,469,000</b> |                     |



**Σχήμα 4.8:** Reasonably Assured Resources plus Inferred Resources, to US\$ 130/kg U, 1/1/07, from OECD NEA & IAEA, *Uranium 2007: Resources, Production and Demand* ("Red Book")

Σημαντική πηγή πυρηνικού καυσίμου είναι επίσης τα αποθέματα των πυρηνικών όπλων. Από το 1987 οι ΗΠΑ υπέγραψαν συνθήκες πυρηνικού αφοπλισμού, με χώρες της πρώην Σοβιετικής Ένωσης, για μείωση κατά περίπου 80% των πυρηνικών βομβών. Οι βόμβες περιέχουν ουράνιο με εμπλουτισμό σε U-235 μεγαλύτερο από  $\epsilon=90\%$  και κάποιες περιέχουν Pu-239. Από το 2000, περίπου 30 τόνοι στρατιωτικού ουρανίου αντικαθιστούν ετησίως περίπου 10.600 τόνους ουρανίου ορυχείων, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο αντικαθιστά περίπου το 13% των παγκοσμίων αναγκών.

Οι **σημαντικότεροι προμηθευτές φυσικού ουρανίου** παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.

Για την μετατροπή  $U_3O_8$  σε  $UF_6$ , μετά το κλείσιμο της γραμμής παραγωγής της British Nuclear Fuels, παραμένουν οι εξής παραγωγοί: Comurhex (Γαλλία), Convedyn (ΗΠΑ), Cameco(Καναδάς) και Techsnabexport (TENEX, Ρωσία).

Για τον εμπλουτισμό υπάρχουν οι εξής μεγάλοι παραγωγοί: Enrichment Corporation (USEC, ΗΠΑ), Eurodif ( με την Cogema, Γαλλία), Urenco ( με εγκαταστάσεις σε Γερμανία, Ολλανδία και Ηνωμένο Βασίλειο) και η TENEX (Ρωσία).

Οι μεγαλύτεροι κατασκευαστές πυρηνικού καυσίμου, εκτός της Ρωσίας, για αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος είναι: η BNFL Group (Αγγλία, για PWR και BWR, καλύπτει 25% με 30% της αγοράς), η Framatome ANP Group (Γαλλία, για PWR και BWR, καλύπτει περίπου 40% της αγοράς) και η GE Group ( ΗΠΑ, για BWR, καλύπτει περίπου 20% της αγοράς).

Παρατίθεται η περίληψη της Euratom Supply Agency (2005, αναφορά 31) για τη διαθεσιμότητα πυρηνικού καυσίμου στην ΕΕ. Πιο συγκεκριμένα:

- Υπάρχει κενό μεταξύ των απαιτήσεων των αντιδραστήρων σε καύσιμο και της πρωτογενούς διαθεσιμότητας ουρανίου και υπηρεσιών μετατροπής.
- Δευτερογενείς πηγές είναι δυνατόν να καλύψουν αυτό το κενό μέχρι το 2008, για μετατροπή, και μέχρι το 2010, για ουράνιο (από υψηλού εμπλουτισμού ουράνιο (από τα πυρηνικά όπλα), επανεμπλουτισμό απεμπλουτισμένου ουρανίου, αποθέματα κ.α.)
- Μετά από αυτές τις ημερομηνίες απαιτούνται νέες προμήθειες (πρωτογενείς ή δευτερογενείς).

- Εν απουσία επαρκούς πρόσθετου ουρανίου το κενό μπορεί να μειωθεί (μετά το 2008/2010) με προσαρμογή (μείωση) της περιεκτικότητας του απεμπλουτισμένου ουρανίου σε U-235 (δηλαδή άντληση περισσότερου U-235 από το φυσικό ουράνιο).
- Υπάρχει αρκετή τρέχουσα ή προβλεπόμενη δυνατότητα εμπλουτισμού.
- Η μείωση της περιεκτικότητας του απεμπλουτισμένου ουρανίου σε U-235 θα αυξήσει τη ζήτηση εμπλουτισμού. Ως συνέπεια,
  - ο Θα χρειάζονται νέες εγκαταστάσεις εμπλουτισμού γύρω στο 2013
  - ο Και / ή οι υπάρχουσες εγκαταστάσεις της Ρωσίας πρέπει να χρησιμοποιηθούν περισσότερο αποτελεσματικά.
- Υπάρχει αρκετή δυναμικότητα κατασκευής καυσίμου σε αυτή την περίοδο, αλλά είναι πολύ συγκεντρωμένη.

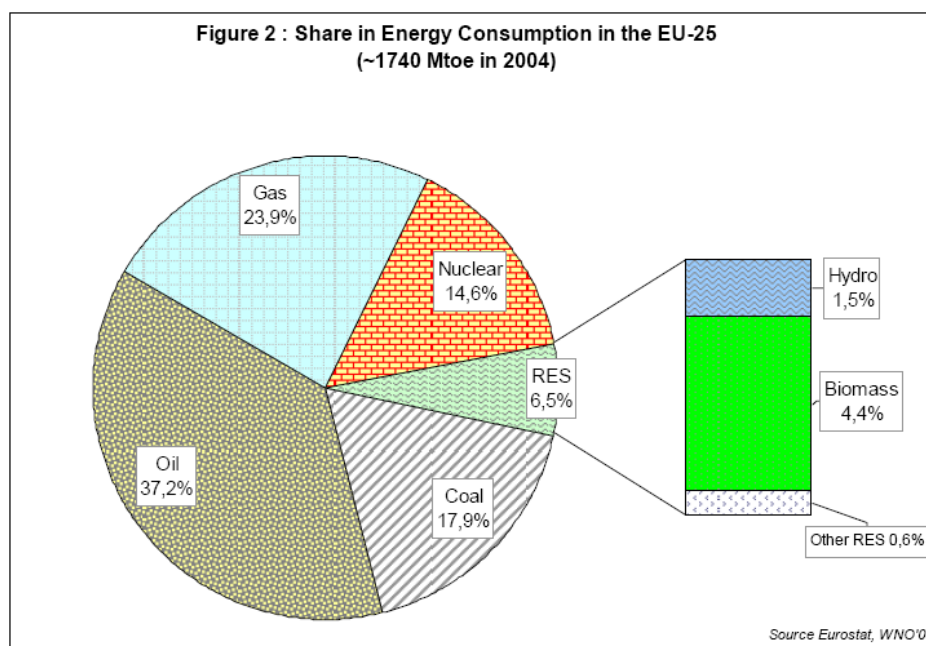
## 5. Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός

### 5.1 Ενεργειακή Επάρκεια

Η εξασφάλιση ενεργειακής επάρκειας και η διαφοροποίηση των ενεργειακών πηγών και διόδων μεταφοράς **μειώνουν την εξάρτηση** από ακριβές πρώτες ύλες. Η κοινή συνισταμένη των πολιτικών των ευρωπαϊκών χωρών είναι η εύρεση της χρυσής τομής στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και την προστασία του περιβάλλοντος με την οικονομική ανάπτυξη και κοινωνική ευημερία. Οι στόχοι της ενεργειακής πολιτικής της ΕΕ επιδιώκουν 20% μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, μερίδιο 20% των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας και εξοικονόμηση κατά 20% της μελλοντικής ενεργειακής ζήτησης για το έτος 2020.

Θέματα ανησυχίας σε σχέση με την ασφάλεια ενεργειακής τροφοδοσίας, την αύξηση των τιμών των συμβατικών ορυκτών καυσίμων και την αύξηση των εκπομπών CO<sub>2</sub> αναζωπύρωσαν τις συζητήσεις σε παγκόσμιο επίπεδο για το ρόλο της πυρηνικής ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα. Η πυρηνική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής αποτελεί τεχνολογία η οποία εφαρμόζεται για ευρεία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για κάλυψη φορτίου βάσης συμβάλλοντας στην ασφάλεια εφοδιασμού και τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>.

Στην έκθεση World Energy Outlook 2007 της IEA στο Σενάριο Αναμενόμενης Εξέλιξης προβλέπεται ότι η εγκατεστημένη ισχύς των πυρηνικών σταθμών θα αυξηθεί από τα 368 GW το 2004 στα 481 GW το 2030. Στο Εναλλακτικό Σενάριο προβλέπεται ότι μεγαλύτερη χρήση της πυρηνικής ενέργειας θα συμβάλει σημαντικά στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Πρόσθετες επενδύσεις σε πυρηνικούς σταθμούς μπορούν να αυξήσουν την εγκατεστημένη ισχύ στα 519 GW το 2030, σύμφωνα με το Εναλλακτικό Σενάριο.



**Σχήμα 5.1:** Ποσοστό συμμετοχής ενεργειακών πηγών στην κατανάλωση ενέργειας της ΕΕ

Στην ΕΕ σήμερα, το 1/3 του ηλεκτρικού που παράγεται και το 15% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται προέρχεται από πυρηνικά εργοστάσια, χωρίς την παραμικρή παραγωγή CO<sub>2</sub> (Σχήμα 5.1). Η πυρηνική ενέργεια συνεισφέρει στον ασφαλή ενεργειακό εφοδιασμό της ΕΕ ως κύρια πηγή ηλεκτρικών φορτίων βάσης. Η προμήθεια ουρανίου γίνεται και από κράτη

με πολιτική σταθερότητα (η Αυστραλία και ο Καναδάς καλύπτουν τις μισές ανάγκες της ΕΕ), ενώ υπάρχει σημαντικός αριθμός εναλλακτικών προμηθευτών.

Η μεγάλη διείσδυση αιολικής παραγωγής έχει σημαντικές επιπτώσεις στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, τόσο από τεχνικής, όσο και από οικονομικής άποψης<sup>37</sup>. Από τεχνικής σκοπιάς, ανακύπτουν διάφορες δυσκολίες και προκλήσεις, όπως θέματα ρύθμισης συχνότητας και τάσης, ικανότητας των υφισταμένων δικτύων μεταφοράς να εξυπηρετήσουν τα νέα αιολικά πάρκα, θέματα που αφορούν την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος, την παρακολούθηση και τον έλεγχο από τα κέντρα ελέγχου, την παροχή επικουρικών υπηρεσιών κλπ. Από την άλλη μεριά, μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ θα έχει σημαντική επίδραση στη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων, στα ενεργειακά ισοζύγια, στη συμμετοχή των εγχώριων πρωτογενών πηγών στην ηλεκτροπαραγωγή, στο κόστος ηλεκτροπαραγωγής, στις αγορές ηλεκτρισμού κλπ.

Ένα σημαντικό ζήτημα που προκύπτει είναι η μείωση του μεριδίου της παραγωγής των συμβατικών θερμικών μονάδων (κυρίως μονάδων ενδιάμεσου φορτίου). Η μεταβολή αυτή αναμένεται να επηρεάσει τους όρους εισόδου νέων μονάδων (συνδυασμένου κύκλου) στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Με αυτήν την έννοια, οι στόχοι για άνοιγμα των αγορών αφενός, και μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ αφετέρου, φαίνεται ότι μπορεί να είναι αντικρουόμενοι. Συνεπώς, οι ισχύουσες κανονιστικές ρυθμίσεις είναι ζωτικής σημασίας για την ταυτόχρονη επίτευξη των προαναφερθέντων στόχων και κατά τη λήψη αποφάσεων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της μεγάλης κλίμακας διείσδυσης ΑΠΕ στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Η δεδομένη πολιτική επιλογή μιας αυξημένης διείσδυσης των ΑΠΕ μπορεί να οδηγήσει σε ένα δραστικό ανασχηματισμό της ηλεκτρικής αγοράς που θα στηριχθεί σε πυρηνικούς σταθμούς που θα λειτουργούν ως μονάδες βάσης.

Το Συμβούλιο Εθνικής Ενεργειακής Στρατηγικής (ΣΕΕΣ) σε πρόσφατη έκθεσή του, αναδεικνύει τη δημιουργία των προϋποθέσεων για την εξασφάλιση διαθεσιμότητας, προσβασιμότητας και αποδεκτικότητας του ενεργειακού συστήματος ώστε να εξασφαλίζεται επάρκεια εφοδιασμού από αξιόπιστες πηγές, πρόσφορά στην κατανάλωση σε προσιτές τιμές που θα αντικατοπτρίζουν και το πραγματικό κόστος του αγαθού και με σεβασμό στην προστασία του περιβάλλοντος.

**Πίνακας 5.1:** Πρόβλεψη της εξέλιξης της Ζήτησης στο διασυνδεδεμένο σύστημα

| Έτος | Πρόβλεψη Ζήτησης –<br>Σενάριο Αναφοράς<br>(GWh) | Πρόβλεψη Ζήτησης –<br>Σενάριο Εξοικονόμησης (GWh) |
|------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 2010 | 61.080                                          | 60.650                                            |
| 2015 | 70.280                                          | 68.180                                            |
| 2020 | 79.340                                          | 72.120                                            |

**Πίνακας 5.2:** Προβλεπόμενη παραγωγή από ΑΠΕ

| Έτος                         | 2010  | 2015  | 2020   |
|------------------------------|-------|-------|--------|
| Παραγωγή από ΥΗ (GWh)        | 3.500 | 4.500 | 5.000  |
| Παραγωγή από άλλες ΑΠΕ (GWh) | 3.150 | 8.150 | 17.000 |

Με στόχο το 2020 παρουσιάζεται ένα Σενάριο Αναφοράς που προβλέπει αύξηση της ζήτησης κατανάλωσης ηλεκτρισμού σε 79.340 GWh από 53.750 GWh το 2007, καθώς και

<sup>37</sup> ΣΕΕΣ, “Ενέργειες και προϋποθέσεις για μία Εθνική Ενεργειακή Στρατηγική”, 2007

ένα σενάριο με εφαρμογή μέτρων εξοικονόμησης με αντίστοιχη αύξηση της ζήτησης σε 72.120 GWh (Πίνακας 5.1). Στον Πίνακα 5.2 δίνεται η πλέον αισιόδοξη πρόβλεψη για παραγωγή προερχόμενη από μονάδες ΑΠΕ με σχετική πιθανότητα υλοποίησης. Σημειώνεται ότι την περίοδο από το 2010 έως το 2015 υπάρχει μία σημαντική ανάγκη κάλυψης ηλεκτρικής ζήτησης λόγω απόσυρσης πολλών πετταλαιωμένων μονάδων της ΔΕΗ ενώ σχετικά μέτρια προβλέπεται η διείσδυση των ΑΠΕ. Η τελευταία εκτίμηση λαμβάνει υπόψη το ελληνικό παραγωγικό δυναμικό, την ανάγκη πραγματοποίησης πρόσθετων χερσαίων και υποθαλάσσιων διασυνδέσεων και τη δυνατότητα υπέρβασης γραφειοκρατικών διαδικασιών και τοπικών αντιδράσεων. Αυξητική με ταχύτερους ρυθμούς προβλέπεται η περίοδος 2015 – 2020 κατά την οποία **είναι και περισσότερο εφικτό** να προσεγγισθούν οι στόχοι της εξοικονόμησης και μεγαλύτερης διείσδυσης των ΑΠΕ.

Η αυξημένη ζήτηση πολύ δύσκολα θα μπορούσε να καλυφθεί με πρόσθετη λιγνιτική παραγωγή, λόγω της μείωσης των διαθέσιμων αποθεμάτων και τα συνεχώς αυξανόμενα κόστη εξόρυξης και δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub>. Το ενεργειακό μίγμα που προτείνεται ως η πιο αξιόπιστη και οικονομική λύση θα πρέπει να αποτελείται από <sup>38</sup>:

- λιγνιτικές μονάδες σε μειούμενο, λόγω εξάντλησης των κοιτασμάτων, ποσοστό,
- μονάδες φυσικού αερίου σε ποσοστό που προβλέπεται ότι θα μπορέσει να καλυφθεί από εισαγωγές του καυσίμου βάσει μακροχρόνιων συμβάσεων που πρέπει να εξασφαλιστούν,
- σε χρησιμοποίηση των μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων σε ποσοστό που προσδιορίζεται από το περιορισμένο αξιοποιήσιμο υδροδυναμικό,
- αιολικές και φωτοβολταϊκές μονάδες σε ποσοστό που υπαγορεύει η ευστάθεια του συστήματος και
- χρησιμοποίηση μονάδων λιθάνθρακα νέας τεχνολογίας που θα ανταποκρίνονται στις ευαισθησίες και απαιτήσεις των τοπικών κοινωνιών.

Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή αποτελεί μία **εναλλακτική ενεργειακή προοπτική**. Κατά τη λειτουργία μιας πυρηνικής μονάδας δεν εκλύονται αέριοι ρύποι στην ατμόσφαιρα, όπως συμβαίνει με τη χρήση συμβατικών μορφών ενέργειας, και η ρύπανση του περιβάλλοντος σε περίπτωση ομαλής λειτουργίας είναι αμελητέα. Αξίζει επίσης να υπογραμμιστεί ότι, όπως προαναφέρθηκε, τα κόστη παραγωγής στους πυρηνικούς σταθμούς είναι λιγότερο ευμετάβλητα στις μεταβολές τιμών σε σχέση με τους ανθρακικούς σταθμούς και τους σταθμούς αερίου.

Η Βουλγαρία, η Τσεχία, η Ουγγαρία, η Σλοβενία, η Ρουμανία και η Τουρκία εκδηλώνουν ανανεωμένο ενδιαφέρον για την κατασκευή πυρηνικών αντιδραστήρων. Η μη εγκατάσταση πυρηνικού εργοστασίου ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα σημαίνει εκτεταμένες εισαγωγές πετρελαίου και γαιάνθρακα, με τα αντίστοιχα μειονεκτήματα της περιβαλλοντικής ρύπανσης και της έντονης ενεργειακής εξάρτησης από τρίτες χώρες πολιτικά ασταθείς, ή στην καλύτερη περίπτωση, εξάρτηση από εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας από όμορα κράτη που θα εγκαταστήσουν πυρηνικούς αντιδραστήρες. Σε περίπτωση μεγάλου πυρηνικού ατυχήματος σε γειτονική χώρα, η πιθανότητα σημαντικών επιπτώσεων και στη χώρα μας δεν είναι αμελητέα.

## **5.2 Ενδεχόμενη εγκατάσταση αντιδραστήρων ισχύος στην Ελλάδα**

### **5.2.1 Πλεονεκτήματα**

Σε περίπτωση ενδεχόμενης εγκατάστασης πυρηνικών αντιδραστήρων ισχύος στη χώρα μας, ως πιθανά πλεονεκτήματα είναι δυνατό να αναφερθούν:

<sup>38</sup> ΣΕΕΣ, “Μέτρα και μέσα για μία βιώσιμη και ανταγωνιστική Ενεργειακή Πολιτική”, Αθήνα, Άνοιξη 2008

- Μείωση των αερίων θερμοκηπίου και αποφυγή της σχετικής οικονομικής ποινής.
- Χαμηλότερο κόστος κιλοβατώρας.
- Ενεργειακή αυτονομία επί πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με πετρέλαιο ή φυσικό αέριο<sup>39</sup>. Στην περίπτωση διαταραχών στην προμήθεια πετρελαίου ή αερίου ο συμβατικός σταθμός πρέπει να κλείσει όταν εξαντληθούν τα αποθέματα. Αυτά τα αποθέματα επαρκούν συνήθως για λειτουργία ενός έως τριών μηνών. Στις περισσότερες χώρες της ΕΕ τα στρατηγικά αποθέματα αντιστοιχούν σε λειτουργία τριών μηνών. Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες λειτουργούν, χωρίς ανάγκη επανατροφοδότησης καυσίμου, επί 12 ως 18 μήνες, εξασφαλίζοντας έτσι πολλούς μήνες λειτουργίας πριν να χρειάζεται να κλείσουν. Αν καθυστερήσει η παράδοση φρέσκου πυρηνικού καυσίμου, ο αντιδραστήρας μπορεί να λειτουργήσει επί 2 ως 6 μήνες πέραν του προγραμματισμένου χρόνου για επανατροφοδότηση καυσίμου με σταδιακή μείωση της ισχύος. Οι αντιδραστήρες παραλαμβάνουν το πλήρες φορτίο καυσίμου αρκετούς μήνες πριν από την επανατροφοδότηση και τα διαθέσιμα αποθέματά των επαρκούν για μήνες λειτουργίας. Το μεγαλύτερο μέρος του πυρηνικού καυσίμου της ΕΕ παράγεται στην ΕΕ (μέρος της μετατροπής και μείζονα τμήματα εμπλουτισμού και κατασκευής του καυσίμου), αλλά σχεδόν όλο το φυσικό ουράνιο εισάγεται. Όμως, οι εισαγωγές ουρανίου είναι, για γεωπολιτικούς λόγους, πολύ λιγότερο ευάλωτες απ' ό,τι οι εισαγωγές πετρελαίου και αερίου.
- Εισαγωγή και απόκτηση της προηγμένης τεχνογνωσίας που συνοδεύει την πυρηνική τεχνολογία σε πληθώρα τεχνολογικών πεδίων.

### 5.2.2 Υποδομές

Η προκήρυξη διαγωνισμού για προμήθεια, εγκατάσταση και λειτουργία, πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος προϋποθέτει την ύπαρξη: (i) επιστημονικού προσωπικού με επαρκή σχετική τεχνογνωσία, (ii) ανεξάρτητης ρυθμιστικής αρχής ικανής να ελέγξει τις προδιαγραφές, την εγκατάσταση και την λειτουργία του/των αντιδραστήρων και (iii) επαρκούς σχετικής νομοθεσίας.

Η σύνταξη προδιαγραφών για την προκήρυξη διαγωνισμού προμήθειας και εγκατάστασης, με σοβαρές συνέπειες στο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας και στην ασφάλεια του συστήματος, προϋποθέτει σημαντικό αριθμό ειδικευμένων επιστημονικών στελεχών. Βεβαίως, το μεγαλύτερο μέρος των προδιαγραφών θα ανατεθεί σε εξειδικευμένη εταιρία του εξωτερικού. Δεδομένου όμως του τεράστιου οικονομικού ενδιαφέροντος<sup>40</sup>, συνεπώς των αναμενόμενων διακρατικών πιέσεων και του θέματος της ασφάλειας, αυτή η εταιρία επιβάλλεται να ελέγχεται από Έλληνες ειδικούς. Συνεπώς, στην περίπτωση που αποφασιστεί εγχείρημα εγκατάστασης, επιβάλλεται να αξιοποιηθούν οι Έλληνες ειδικοί σε Ελλάδα, Ευρώπη και ΗΠΑ.

Στην Ελλάδα δεν εκπαιδεύονται στελέχη (δεν υπάρχει μεταπτυχιακό πρόγραμμα) πυρηνικής τεχνολογίας, με αποτέλεσμα να υπάρχει κενό τουλάχιστον μιας γενιάς μετά τους υπάρχοντες λίγους Έλληνες με σχετική μεταπτυχιακή παιδεία και πρακτική εμπειρία εργασίας, η οποία αποκτήθηκε σε ιδρύματα του εξωτερικού. Συνεπώς, επιβάλλεται η δημιουργία σχετικών μεταπτυχιακών σπουδών, ανεξάρτητα της απόφασης εγκατάστασης, ή μη, πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος. Τα στελέχη που θα παράγονται θα πρέπει να στελεχώσουν την ρυθμιστική αρχή ακτινοπροστασίας (ΕΕΑΕ, Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας),

<sup>39</sup> Το ίδιο ισχύει και για τον άνθρακα, αλλά η χώρα μας διαθέτει λιγνίτη (μέχρι πότε?)

ΣΕΕΣ : Μέτρα και μέσα για μια βιώσιμη και ανταγωνιστική ενεργειακή πολιτική, Αθήνα, Άνοιξη 2008.

<sup>40</sup> Η τάξη μεγέθους του κόστους εγκατάστασης εκτιμάται ως \$5000 ως \$6000/kWe (Nuclear Engineering International, August 2008). Η EDF (Γαλλική ΔΕΗ) ανακοίνωσε (<http://www.edf.fr>) κόστος 2000€/kWe της υπό εγκατάσταση πυρηνικής μονάδας της στο Flamanville

ερευνητικά κέντρα και τις βιομηχανίες που χρησιμοποιούν ραδιενεργές πηγές και συσκευές εκπομπής ιονίζουσων ακτινοβολιών<sup>41</sup>.

Η ρυθμιστική αρχή (ΕΕΑΕ) είναι σήμερα εντελώς ανεπαρκής για τον έλεγχο πυρηνικού αντιδραστήρα, ακριβώς διότι δεν διαθέτει στελέχη με κατάλληλη τεχνογνωσία. Συνεπώς, στην περίπτωση που αποφασιστεί εγχείρημα εγκατάστασης πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος, **επιβάλλεται ριζική αναδιάρθρωση της ΕΕΑΕ** και η στελέχωσή της με ικανό αριθμό επιστημόνων εκπαιδευμένων στην πυρηνική τεχνολογία.

Η ΕΕΑΕ επιβάλλεται να καταστεί ανεξάρτητη αρχή, για ουσιαστικούς λόγους σχετιζόμενους με την υγεία του πληθυσμού και την προστασία του περιβάλλοντος, αλλά και σε εφαρμογή διεθνών δεσμεύσεων της χώρας<sup>42</sup>, ανεξαρτήτως της απόφασης εγκατάστασης αντιδραστήρα ισχύος. Η ΕΕΑΕ, από γενέσεώς της, υπάγεται στον Υπουργό Ανάπτυξης, ο οποίος ταυτόχρονα επιβλέπει π.χ. την ΔΕΗ, και άλλες βιομηχανίες, τις οποίες η ΕΕΑΕ ελέγχει για την εφαρμογή των κανονισμών ακτινοπροστασίας. Προκειμένου να αποφεύγεται η σύγκρουση συμφερόντων στο ίδιο υπουργείο, πρέπει η ΕΕΑΕ να υπαχθεί είτε απ' ευθείας στον πρωθυπουργό, ή π.χ. στο Υπουργείο Περιβάλλοντος. Επίσης, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι κομματικές επιρροές, πρέπει η αντιπολίτευση να έχει σημαντική συμβολή στον ορισμό του διοικητικού συμβουλίου (ΔΣ) της ΕΕΑΕ. Π.χ. ο πρόεδρος των ΗΠΑ ορίζει τον πρόεδρο της ρυθμιστικής αρχής (Nuclear Regulatory Commission) και τα μισά από τα άλλα μέλη του ΔΣ, ενώ τα άλλα μισά ορίζονται από την αντιπολίτευση. Παρόμοια συμβαίνουν και στις άλλες αναπτυγμένες χώρες.

Μολονότι η υπάρχουσα νομοθεσία ακτινοπροστασίας αναθέτει τον έλεγχο πυρηνικών αντιδραστήρων και εγκαταστάσεων καταλοίπων στην ΕΕΑΕ, οι σχετικές διατάξεις είναι γενικές και δεν συνοδεύονται από επαρκείς κανονισμούς για τέτοιες εγκαταστάσεις. Είναι προφανής η αναγκαιότητα εκσυγχρονισμού και προσαρμογής.

Τέλος, είναι γνωστό ότι για τη λειτουργία πυρηνικού αντιδραστήρα ισχύος απαιτούνται εξειδικευμένες υπηρεσίες - προμήθειες εργοστασίων και εργαστηρίων προηγμένης τεχνολογίας. Προφανώς, για τη χώρα μας, το μεγαλύτερο μέρος αυτών των υπηρεσιών θα καλυφθεί από εταιρίες του εξωτερικού. Δεδομένης όμως της σχετικά μικρής εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος στην Ελλάδα, πρέπει να διερευνηθούν οι οικονομικές συνέπειες μικρού αριθμού πυρηνικών αντιδραστήρων.

---

<sup>41</sup> Στην Ελλάδα λειτουργούν 500 περίπου τέτοιες βιομηχανίες. Ο νόμος ακτινοπροστασίας (ΦΕΚ 539/ 19-07 1991) απαιτεί υπεύθυνο ακτινοπροστασίας (μη ιατρικών εφαρμογών), για αυτές τις εγκαταστάσεις. Για τον υπεύθυνο ακτινοπροστασίας (μη ιατρικών εφαρμογών) ο νόμος απαιτεί πτυχιούχο θετικών επιστημών με μεταπτυχιακή θεωρητική και πρακτική εκπαίδευση ή πολυετή εμπειρία στην ακτινοπροστασία. Ο νόμος δεν έχει εφαρμοστεί, διότι στην Ελλάδα δεν υπάρχουν σχετικές μεταπτυχιακές σπουδές στην πυρηνική τεχνολογία. Υπάρχει μόνο ένα μεταπτυχιακό πρόγραμμα «ακτινοφυσικής», δηλαδή ακτινοπροστασίας στις ιατρικές εφαρμογές.

<sup>42</sup> Διεθνείς Συμβάσεις που έχει επικυρώσει η Ελλάδα: (i) για την Ασφάλεια των Πυρηνικών Αντιδραστήρων και (ii) για την Ασφάλεια των Πυρηνικών Καταλοίπων.

## 6. Συμπεράσματα

Η πυρηνική ενέργεια συμβάλλει ήδη σημαντικά στο συνδυασμό ενεργειακών πηγών της ΕΕ περιορίζοντας έτσι τις ανησυχίες για δυνητικά ελλείμματα της ασφάλειας εφοδιασμού ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή ηλεκτρισμού από πυρηνική ενέργεια επηρεάζεται περιορισμένα από τις διακυμάνσεις του κόστους εισαγωγής ουρανίου και, όπως υπογραμμίζεται από το Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας, αποτελεί οικονομικά βιώσιμη λύση για την παραγωγή ενέργειας, **υπό την προϋπόθεση ότι λαμβάνονται δεόντως υπόψη οι προβληματισμοί για το περιβάλλον και οι ανησυχίες της κοινωνίας**. Η πυρηνική ενέργεια, η οποία έχει ουσιαστικά μηδενικές εκπομπές CO<sub>2</sub>, είναι δυνατό να συμβάλλει σημαντικά στον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής του πλανήτη, λόγω των μηδενικών εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου.

Η παγκόσμια ζήτηση παραγωγής πυρηνικής ενέργειας διευρύνεται. Η ΕΕ πρωταγωνιστεί σε ότι αφορά το βιομηχανικό κλάδο της πυρηνικής ενέργειας. Εναπόκειται στα κράτη-μέλη να αποφασίσουν κατά πόσο θα χρησιμοποιήσουν την πυρηνική ενέργεια. Σημαντικός αριθμός πυρηνικών αντιδραστήρων παραγωγής ενέργειας πρόκειται να κλείσει τα επόμενα 20 έτη. Αν τα κράτη μέλη επιλέξουν να διατηρήσουν το ισχύον ποσοστό πυρηνικής ενέργειας στη συνολική σύνθεση ενεργειακών πηγών, θα απαιτηθεί να κατασκευαστούν νέοι αντιδραστήρες ή/και να παραταθεί ο χρόνος λειτουργίας των υφιστάμενων αντιδραστήρων. Επιπλέον, η ΕΕ τηρεί όλες τις διεθνείς υποχρεώσεις, συμπεριλαμβανομένης της μη διάδοσης πυρηνικού υλικού και τεχνολογίας, της προστασίας της υγείας και της ασφάλειας των εργαζομένων και του κοινού, της πυρηνικής ασφάλειας και της προστασίας του περιβάλλοντος.

Ένας σημαντικός παράγοντας, που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και επηρεάζει τη συζήτηση για το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας, είναι **το ζήτημα της κοινής γνώμης**, λόγω του αντίκτυπου που έχει στις πολιτικές αποφάσεις και του εύλογου δικαιώματος των πληθυσμών να συμμετάσχουν στη λήψη τους. Οι ανησυχίες για την ασφάλεια των πυρηνικών σταθμών παραγωγής ενέργειας, τη διαχείριση των ραδιενεργών καταλοίπων, την ασφάλεια, τη διάδοση των πυρηνικών εξοπλισμών και την τρομοκρατία επηρέασαν αρνητικά την κοινή γνώμη. Σύμφωνα με έρευνα του Ευρωβαρόμετρου το 2005, το κοινό της ΕΕ δεν είναι καλά ενημερωμένο για τα πυρηνικά θέματα, **συμπεριλαμβανομένων των πιθανών ωφελειών** από την άποψη της μείωσης των κλιματικών αλλαγών και των κινδύνων που συνδέονται με τη μακροχρόνια διαχείριση των ραδιενεργών καταλοίπων. Από την έρευνα προέκυψε επίσης ότι από τους πολίτες που ανησυχούν για την πυρηνική ενέργεια, το 40% όσων αντιτίθενται σε αυτήν θα άλλαζαν γνώμη αν επείθεντο ότι υπάρχει ασφαλής λύση για τα πυρηνικά απόβλητα. Τονίζεται ότι επιλογή που έχουμε σήμερα είναι μεταξύ (α) συμβατικών μονάδων, με συνέπεια την άνευ ελέγχου έκλυση καταλοίπων στην ατμόσφαιρα, και (β) πυρηνικών αντιδραστήρων σχάσης, όπου η διαχείριση των καταλοίπων θα είναι μεν υπό τον έλεγχο του ανθρώπου, αλλά η ασφαλής διαχείριση επιβάλλεται να συνεχίζεται επί χιλιάδες έτη.

Η μελλοντική πορεία στην πολιτική για το κλίμα είναι κατά πρώτο λόγο οι βραχυπρόθεσμες μειώσεις των εκπομπών οι οποίες οφείλονται στους στόχους που έθεσε το Πρωτόκολλο του Κυότο. Η πυρηνικά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια προσφέρει ευρείας κλίμακας βασική παροχή για τη στήριξη των ενεργοβόρων βιομηχανιών και των καθημερινών οικιακών αναγκών με περιορισμένες εκπομπές. Οι πυρηνικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας καλύπτουν το 38% της αυξανόμενης ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια από το 1973. Αν γίνει δεκτό ότι, διαφορετικά, το αντίστοιχο δυναμικό θα κατανάλωνε ορυκτά καύσιμα, **η πυρηνική ενέργεια συνέβαλε σημαντικά στον περιορισμό των εκπομπών CO<sub>2</sub>**, το οποίο είναι το κυριότερο από τα αέρια του θερμοκηπίου (GHG). Για να παραχθεί ένα εκατομμύριο κιλοβατώρες ηλεκτρικής ενέργειας από γαιάνθρακα, εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα 230 μετρικοί τόνοι ενώσεων άνθρακα, από πετρέλαιο 190 μετρικοί τόνοι και από φυσικό αέριο 150 μετρικοί τόνοι. Ένας πυρηνικός σταθμός παραγωγής ενέργειας παράγει τις ίδιες κιλοβατώρες πρακτικά χωρίς εκπομπές ενώσεων άνθρακα (στη σύγκριση δεν

περιλαμβάνονται οι εκπομπές που οφείλονται στις δραστηριότητες εξόρυξης και κατασκευής των διαφόρων τύπων καυσίμων).

Το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας στην ΕΕ εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τα οικονομικά πλεονεκτήματά της, από την ικανότητά της να διαθέτει οικονομικά αποθεματική ηλεκτρική ενέργεια με αξιοπιστία ώστε να συμβάλει στην επίτευξη των στόχων της Λισαβόνας, τη συμβολή της στους κοινούς στόχους ενεργειακής πολιτικής, την ασφάλειά της, τον περιβαλλοντικό αντίκτυπό της και την κοινωνική αποδοχή της. Η αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας μπορεί να διαδραματιστεί σημαντικό ρόλο για την επίτευξη των στόχων της στρατηγικής ενεργειακής ανασκόπησης και ιδίως των κύριων προτεραιοτήτων που επισημαίνονται στην Πράσινη Βίβλο: **ασφάλειας του εφοδιασμού, ανταγωνιστικότητας και αιεφορίας**. Άλλοι σημαντικοί στόχοι που πρέπει να συνεχίσουν να επιδιώκονται ενεργά είναι η πυρηνική ασφάλεια, ο παροπλισμός πυρηνικών αντιδραστήρων που έχουν φθάσει στο τέλος της ενεργού ζωής τους, η διαχείριση, η μεταφορά και η τελική διάθεση ραδιενεργών καταλοίπων, καθώς και η μη διάδοση των πυρηνικών οπλικών συστημάτων και εξοπλισμών.

**Η ελληνική πραγματικότητα είναι αρκετά διαφορετική από την αντίστοιχη ευρωπαϊκή.** Το Συμβούλιο Εθνικής Ενεργειακής Στρατηγικής (ΣΕΕΣ) σε πρόσφατη έκθεσή του, αναδεικνύει τη δημιουργία των προϋποθέσεων για την εξασφάλιση διαθεσιμότητας, προσβασιμότητας και αποδεκτικότητας του ενεργειακού συστήματος ώστε να εξασφαλίζεται επάρκεια εφοδιασμού από αξιόπιστες πηγές, πρόσφορά στην κατανάλωση σε προσιτές τιμές που θα αντικατοπτρίζουν και το πραγματικό κόστος του αγαθού και με σεβασμό στην προστασία του περιβάλλοντος. **Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή αποτελεί μία εναλλακτική ενεργειακή προοπτική.**

Η Βουλγαρία, η Τσεχία, η Ουγγαρία, η Σλοβενία, η Ρουμανία και η Τουρκία εκδηλώνουν ανανεωμένο ενδιαφέρον για την κατασκευή πυρηνικών αντιδραστήρων. Η μη εγκατάσταση πυρηνικού εργοστασίου ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα συνεπάγεται εκτεταμένες εισαγωγές πετρελαίου και γαιάνθρακα, με τα αντίστοιχα μειονεκτήματα της περιβαλλοντικής ρύπανσης και της έντονης ενεργειακής εξάρτησης από τρίτες χώρες πολιτικά ασταθείς, ή στην καλύτερη περίπτωση, εξάρτηση από εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας από όμορα κράτη που θα εγκαταστήσουν πυρηνικούς αντιδραστήρες.

Εν κατακλείδι, η Ομάδα Εργασίας του ΤΕΕ/ΤΚΜ «Εφαρμογές της Πυρηνικής Τεχνολογίας στη Βιομηχανία Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας» υιοθετεί, θέση παρόμοια με αυτή που διατυπώθηκε το 1980 από τον τότε Πρόεδρο του ΤΕΕ κ. Ευάγγελο Κουλουμπή, στην εισήγησή του σε ημερίδα με τίτλο «Εγκατάσταση πυρηνικού αντιδραστήρος ισχύος (1980: Αθήνα. σελ. 4), και αναφέρει ότι:

«Το Τ.Ε.Ε. πιστεύει ότι το ενεργειακό πρόβλημα πρέπει να θεωρηθεί και μελετηθεί **σφαιρικά και όχι μονοδιάστατα και αποσπασματικά** (π.χ. πυρηνική ενέργεια ή πετρελαϊκή πολιτική). Έτσι το Τ.Ε.Ε. δεν είναι αντίθετο στην εγκατάσταση Πυρηνικού Εργοστασίου Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας στη χώρα μας με την προϋπόθεση ότι αυτή στηρίζεται σε **πλήρη μελέτη του θέματος** ενταγμένη στην ευρύτερη ενεργειακή πολιτική της χώρας. Πιο συγκεκριμένα θα πρέπει να μελετηθούν: α) το πρόβλημα της ρύπανσης του περιβάλλοντος, β) η εξασφάλιση προμήθειας ουρανίου, πώς και από ποιά χώρα θα γίνει η προμήθεια του εξοπλισμού του εργοστασίου και των απαραίτητων ανταλλακτικών, γ) τα συγκριτικά οικονομικά στοιχεία που στηρίζεται η επιλογή παραγωγής ενέργειας από πυρηνικό εργοστάσιο και όχι από άλλες συμβατικές μονάδες και δ) η κατάλληλη περιοχή για την εγκατάσταση του εργοστασίου που δεν θα είναι επικίνδυνη για τους κατοίκους των γύρων περιοχών. **Απαιτείται πλήρης μελέτη για μία ισόρροπη ανάπτυξη που η ποιότητα ζωής θα βελτιώνεται παράλληλα με την υλική ανάπτυξη.**»

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

## Παράρτημα Ι

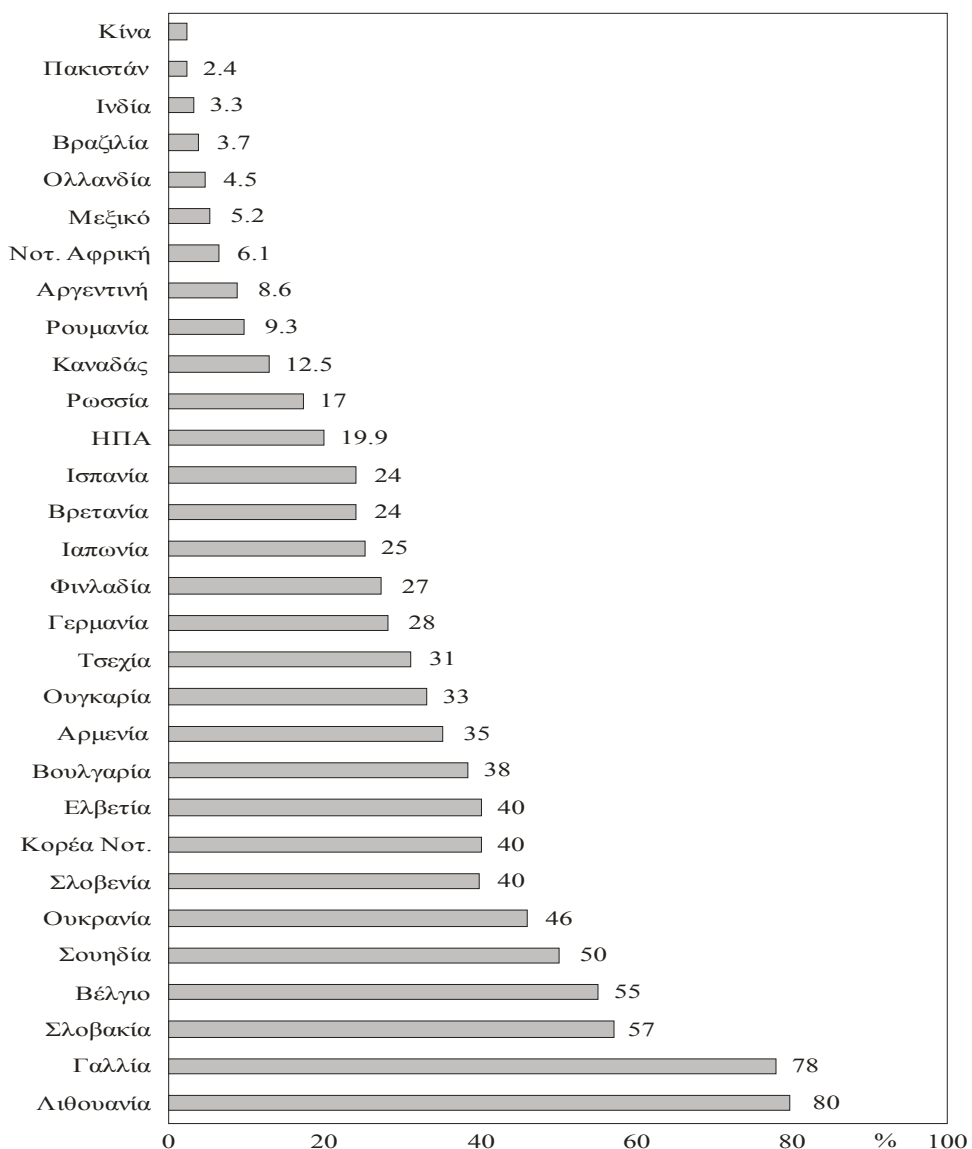
**Πίνακας Ι.1: Πυρηνική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αντιδραστήρες σε λειτουργία, υπό κατασκευή και προγραμματιζόμενοι<sup>43</sup>**

|           | Πυρην. παραγωγή ηλεκτρ. ενέργειας 2003 |      | Αντιδραστήρες σε λειτουργία 2004 |       | Αντιδραστήρες υπό κατασκευή 2004 |      | Προγραμματισμένοι αντιδραστήρες 2004 |       |
|-----------|----------------------------------------|------|----------------------------------|-------|----------------------------------|------|--------------------------------------|-------|
|           | 10 <sup>9</sup> kWh                    | % e  | Αριθ.                            | MWe   | Αριθ.                            | MWe  | Αριθ.                                | MWe   |
| Αργεντινή | 7,0                                    | 8,6  | 2                                | 935   | 0                                | 0    | 1                                    | 692   |
| Αρμενία   | 1,8                                    | 35   | 1                                | 376   | 0                                | 0    | 0                                    | 0     |
| Βέλγιο    | 44,6                                   | 55   | 7                                | 5728  | 0                                | 0    | 0                                    | 0     |
| Βουλγαρία | 16,0                                   | 38   | 4                                | 2722  | 0                                | 0    | 0                                    | 0     |
| Βραζιλία  | 13,3                                   | 3,7  | 2                                | 1901  | 0                                | 0    | 1                                    | 1245  |
| Γαλλία    | 420,7                                  | 78   | 59                               | 63473 | 0                                | 0    | 0                                    | 0     |
| Γερμανία  | 157,4                                  | 28   | 18                               | 20643 | 0                                | 0    | 0                                    | 0     |
| Ελβετία   | 25,9                                   | 40   | 5                                | 3220  | 0                                | 0    | 0                                    | 0     |
| Βρετανία  | 85,3                                   | 24   | 23                               | 11852 | 0                                | 0    | 0                                    | 0     |
| ΗΠΑ       | 763,7                                  | 19,9 | 103                              | 97485 | 1                                | 1065 | 0                                    | 0     |
| Ιαπωνία   | 230,8                                  | 25   | 54                               | 45521 | 3                                | 3294 | 12                                   | 14436 |
| Ινδία     | 16,4                                   | 3,3  | 14                               | 2493  | 9                                | 4128 | 0                                    | 0     |
| Ιράν      | 0                                      | 0    | 0                                | 0     | 1                                | 950  | 1                                    | 950   |
| Ισπανία   | 59,4                                   | 24   | 9                                | 7584  | 0                                | 0    | 0                                    | 0     |
| Καναδάς   | 70,3                                   | 12,5 | 17                               | 12080 | 1                                | 515  | 2                                    | 1030  |
| Κίνα      | 79,0                                   | **   | 15                               | 11471 | 4                                | 4500 | 4                                    | 3800  |
| Β. Κορέα  | 0                                      | 0    | 0                                | 0     | 1                                | 950  | 1                                    | 950   |
| Ν. Κορέα  | 123,3                                  | 40   | 19                               | 15880 | 1                                | 960  | 8                                    | 9200  |
| Λιθουανία | 14,3                                   | 80   | 2                                | 2370  | 0                                | 0    | 0                                    | 0     |
| Μεξικό    | 10,5                                   | 5,2  | 2                                | 1310  | 0                                | 0    | 0                                    | 0     |
| Ν. Αφρική | 12,7                                   | 6,1  | 2                                | 1842  | 0                                | 0    | 0                                    | 0     |
| Ολλανδία  | 3,8                                    | 4,5  | 1                                | 452   | 0                                | 0    | 0                                    | 0     |
| Ουγγαρία  | 11,0                                   | 33   | 4                                | 1755  | 0                                | 0    | 0                                    | 0     |
| Ουκρανία  | 76,7                                   | 46   | 13                               | 11268 | 2                                | 1900 | 0                                    | 0     |
| Πακιστάν  | 1,8                                    | 2,4  | 2                                | 425   | 0                                | 0    | 1                                    | 300   |
| Ρουμανία  | 4,5                                    | 9,3  | 1                                | 655   | 1                                | 655  | 0                                    | 0     |
| Ρωσία     | 138,4                                  | 17   | 30                               | 20793 | 6                                | 5475 | 0                                    | 0     |

<sup>43</sup> Nuclear Power "Reactors in the World", IAEA, 2004

|                   |             |           |            |               |           |              |           |              |
|-------------------|-------------|-----------|------------|---------------|-----------|--------------|-----------|--------------|
| Σλοβακία          | 17,9        | 57        | 6          | 2472          | 0         | 0            | 0         | 0            |
| Σλοβενία          | 5,0         | 40        | 1          | 676           | 0         | 0            | 0         | 0            |
| Σουηδία           | 65,5        | 50        | 11         | 9429          | 0         | 0            | 0         | 0            |
| Τσεχία            | 25,9        | 31        | 6          | 3472          | 0         | 0            | 0         | 0            |
| Φινλανδία         | 21,8        | 27        | 4          | 2656          | 0         | 0            | 1         | 1600         |
| <b>Παγκοσμίως</b> | <b>2525</b> | <b>16</b> | <b>437</b> | <b>362939</b> | <b>30</b> | <b>24392</b> | <b>32</b> | <b>34203</b> |

**Διάγραμμα Ι.1: Ποσοστό (%) πυρηνικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας**



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II: Γνωστά ατυχήματα πυρηνικών αντιδραστήρων

Τα γνωστά σοβαρά ατυχήματα που συνέβησαν σε στρατιωτικούς, ερευνητικούς και εμπορικούς πυρηνικούς αντιδραστήρες, από τη δεκαετία του 50 μέχρι σήμερα, και οι συνέπειές των συνοψίζονται στον Πίνακα II.1. Σε όλους αυτούς συνέβη βλάβη ή καταστροφή της καρδιάς, εκτός από τους Browns Ferry και Vandelos-1. Στον Browns Ferry, πυρκαγιά κατάστρεψε καλωδιώσεις του συστήματος ελέγχου, με αποτέλεσμα το κλείσιμο της μονάδας επί 18 μήνες για επισκευές. Στον Vandelos-1, πυρκαγιά προκάλεσε βλάβη στον στρόβιλο και κατέστησε μη-οικονομική την επισκευή της, τότε 17 ετών, μονάδας.

**Πίνακας II.1: Γνωστά ατυχήματα πυρηνικών αντιδραστήρων.**

| Αντιδραστήρας                                                    | έτος ατυχ. | αριθ. άμεσων θανάτων | επίπτωση στο περιβάλλον                                                               | ακόλουθες ενέργειες                              |
|------------------------------------------------------------------|------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| NRX, Καναδάς<br>(πειραματικός) 40 MW <sub>th</sub>               | 1952       | 0                    | ουδεμία                                                                               | επισκευάστηκε<br>(νέα καρδιά)<br>έκλεισε 1992    |
| Windscale1,<br>Ηνωμ. Βασίλειο (στρατιωτικός,<br>παραγωγή Pu-239) | 1957       | 0                    | ευρεία διασπορά<br>(εκροή 1,5<br>10 <sup>15</sup> Bq),<br>επηρεάσθηκαν<br>αγροκτήματα | διαλύθηκε,<br>εγκλωβίστηκε –<br>γέμισε με μπετόν |
| SL-1 ΗΠΑ (πειραματικός,<br>πειραματικός αναγεννητικός, MWe)      | 1961       | τρεις<br>χειριστές   | ουδεμία                                                                               | σταμάτησε<br>λειτουργία                          |
| Fermi-1, ΗΠΑ (πειραματικός,<br>Αναγεννητικός, MWe)               | 1966       | 0                    | ουδεμία                                                                               | επισκευάστηκε,<br>1972 επανα-<br>λειτούργησε     |
| Lucens, Ελβετία<br>(πειραματικός, 7,5 MWe)                       | 1969       | 0                    | εκροή ήσσονος<br>σημασίας                                                             | σταμάτησε<br>λειτουργία                          |
| Browns Ferry, ΗΠΑ<br>(εμπορικός, 2 x 1090 MWe)                   | 1975       | 0                    | ουδεμία                                                                               | επισκευάστηκε                                    |
| Three Mile Island-2, ΗΠΑ<br>(εμπορικός, 880 MWe )                | 1979       | 0                    | μικρές δόσεις<br>(εντός των<br>ορίων) στο<br>κοινό, εκροή 2<br>10 <sup>14</sup> Bq)   | σταμάτησε<br>λειτουργία,<br>καθαρισμός           |
| Saint- Laurent-A2, Γαλλία<br>(εμπορικός, 880 MWe)                | 1980       | 0                    | εκροή ήσσονος<br>σημασίας (8<br>10 <sup>10</sup> Bq)                                  | επισκευάστηκε<br>(1992 έκλεισε)                  |
| Chernobyl-4, Ουκρανία<br>(εμπορικός, 950 MWe)                    | 1986       | 31                   | μείζων εκροή<br>(11 10 <sup>18</sup> Bq )                                             | εγκλωβίστηκε<br>(«σαρκοφάγος»)                   |
| Vandelos-1, Ισπανία<br>(εμπορικός, 480 MWe)                      | 1989       | 0                    | ουδεμία                                                                               | έκλεισε                                          |

Επί πλέον αυτών: Στο εργοστάσιο Tokaimura (Ιαπωνία), κατασκευής πυρηνικού καυσίμου για πειραματικούς αντιδραστήρες, συνέβη το 1999 «ατύχημα κρίσιμότητας», δηλαδή περιορισμένη μη-ελεγχόμενη αυτοσυντηρούμενη αντίδραση αλυσωτών σχάσεων. Το ατύχημα προκάλεσε το θάνατο δύο εργαζόμενων. Πολλά παρόμοια «ατυχήματα

κρίσιμότητας» έχουν συμβεί σε στρατιωτικές εγκαταστάσεις και εργαστήρια, κυρίως των ΗΠΑ και της πρώην Σοβιετικής Ένωσης. Όλα, εκτός από δύο, συνέβησαν πριν από τις αρχές της δεκαετίας του 80. Ένα από αυτά, παρόμοιο με αυτό της Ιαπωνίας, συνέβη σε εμπορικό εργοστάσιο πυρηνικού καυσίμου το 1964 και προκάλεσε ένα θάνατο. Τριάντα επτά συνέβησαν σε στρατιωτικές εγκαταστάσεις πειραματικών αντιδραστήρων και εργαστηρίων και προκάλεσαν 10 θανάτους. Άλλα 22 συνέβησαν σε εγκαταστάσεις του κύκλου καυσίμου, 21 στρατιωτικές και 1 εμπορική, και προκάλεσαν 7 θανάτους. Σε κανένα από αυτά τα ατυχήματα δεν συνέβη αξιόλογη εκροή ραδιενεργών υλικών έξω από το κτήριο της εγκατάστασης.

*Πηγή: Appendix 2, “Serious reactor accidents”, World Nuclear Association, Information Papers (June 2008)*

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ III: Τα αίτια του ατυχήματος στο Τσερνομπίλ, εκροές και εναποθέσεις ραδιενεργών υλικών

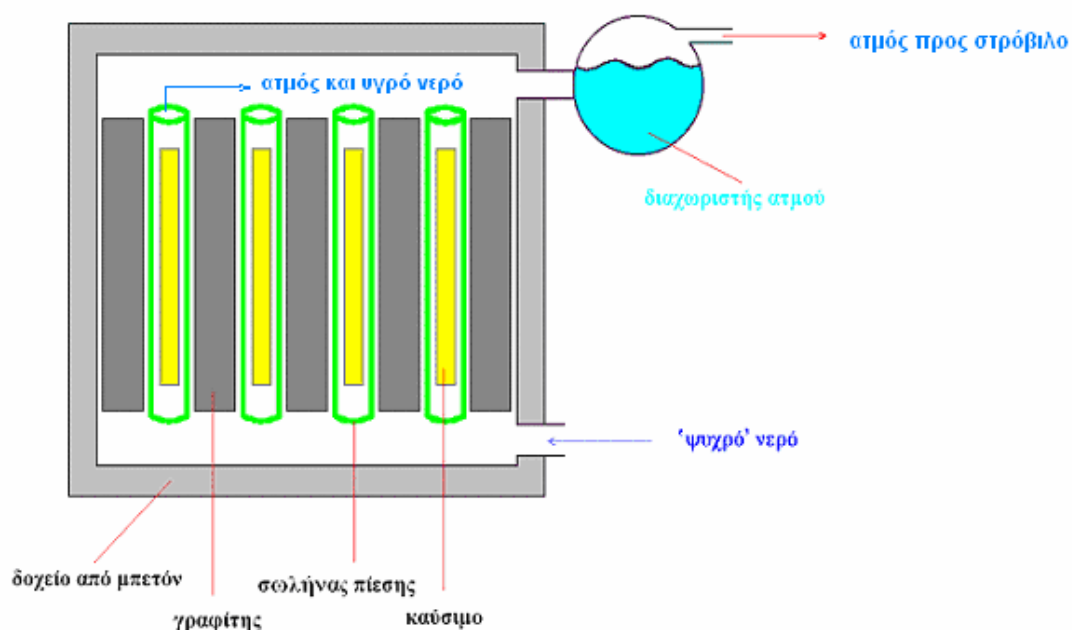
#### ➤ Χαρακτηριστικά του αντιδραστήρα RMBK του Τσερνομπίλ

Τα κύρια χαρακτηριστικά του αντιδραστήρα, απλοποιημένο διάγραμμα του οποίου δίνεται στο Σχήμα Π III.1, είναι τα εξής:

Κάθε συστάδα καυσίμου περιέχεται στο δικό της σωλήνα πίεσης, μέσα στον οποίο ρέει νερό, που αποτελεί το ψυκτικό της συστάδας. Έτσι, αντί για ένα μεγάλο δοχείο πίεσης που περιέχει όλες τις συστάδες καυσίμου στους αντιδραστήρες PWR και BWR, στον RMBK κάθε συστάδα καυσίμου έχει τον δικό της σωλήνα πίεσης, ο οποίος συνιστά τον δικό της διάυλο ψύξης. Το κίνητρο αυτού του σχεδιασμού είναι ότι ο μικρής διαμέτρου σωλήνας αντέχει σε πολύ μεγαλύτερες πιέσεις από ότι ένα μεγάλης διαμέτρου δοχείο πίεσης. Κάθε σωλήνας πίεσης περιβάλλεται από γραφίτη, ο οποίος αποτελεί τον επιβραδυντή<sup>44</sup> του αντιδραστήρα.

Το κίνητρο για τη χρήση του γραφίτη συνίσταται στο ότι, ενώ είναι αρκετά αποτελεσματικός επιβραδυντής, είναι διαθέσιμος σε αφθονία και ο χειρισμός του δεν απαιτεί ιδιαίτερα εξειδικευμένη και δαπανηρή τεχνολογία. Η παρουσία του γραφίτη υπήρξε σημαντική αιτία για τη μεγάλης έκτασης διασπορά των ραδιενεργών ρύπων, εξ αιτίας της ανάφλεξής του κατά το ατύχημα του Τσερνομπίλ.

Η καρδιά του αντιδραστήρα συγκροτείται από ένα σύνολο τέτοιων διαύλων-σωλήνων πίεσης περιβαλλόμενων από γραφίτη. Ο συνδυασμός γραφίτη ως επιβραδυντή και νερού ως ψυκτικού είναι μοναδικός, δεν συναντάται σε άλλους τύπους αντιδραστήρων.



Σχήμα Π III.1 Απλοποιημένο διάγραμμα αντιδραστήρα RMBK

Η πίεση λειτουργίας του ψυκτικού νερού ρυθμίζεται έτσι, ώστε το νερό να βράζει στο πάνω μέρος κάθε διαύλου της καρδιάς και να παράγεται ατμός<sup>45</sup>. Το μείγμα ατμού και υγρού νερού

<sup>44</sup> Επιβραδυντής: δες κεφάλαιο 1.2

<sup>45</sup> Οι ράβδοι του καυσίμου, κατά συνέπεια και η καρδιά, έχουν ύψος 3,65 μέτρα.

οδηγείται από την έξοδο κάθε διαύλου στον **διαχωριστή ατμού**. Απ' αυτόν, ο ατμός οδηγείται στον στρόβιλο και το υγρό νερό οδηγείται στην είσοδο των διαύλων της καρδιάς για τη συνέχιση της ψύξης των συστάδων του καυσίμου.

Η μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι 1.000 MW. Όταν παράγεται αυτή η ηλεκτρική ισχύς, η θερμική ισχύς που παράγεται στην καρδιά του αντιδραστήρα είναι περίπου 3.000 MW. Ουσιώδες και επικίνδυνο χαρακτηριστικό αυτού του αντιδραστήρα είναι ότι σε χαμηλές τιμές ισχύος (π.χ. λιγότερο από 700 MW θερμικής ισχύος) η ανάδραση κενού<sup>46</sup> ήταν ισχυρά θετική. Αυτό δε συνέβαλε καθοριστικά στο ατύχημα του Τσέρνομπιλ. Η επιστημονική ιεραρχία της Σοβιετικής Ένωσης γνώριζε από καιρό αυτό το επικίνδυνο χαρακτηριστικό του αντιδραστήρα και ουδέν έπραξε για την αντιμετώπισή του. Είναι για τον λόγο αυτό, και όχι μόνον, η ευθύνη της για το ατύχημα μεγάλη. Μετά το ατύχημα (1986) εφαρμόστηκε, με τεχνική και οικονομική βοήθεια της Δύσης, μια σειρά από τεχνικές επεμβάσεις στους εν λειτουργία αντιδραστήρες αυτού του τύπου στην πρώην Σοβιετική Ένωση, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του βαθμού θετικής ανάδρασης και τη σημαντική βελτίωση της ασφάλειας.

Η καρδιά του αντιδραστήρα περιβάλλεται από δοχείο από μπετόν (Σχήμα Π III.1), το οποίο λειτουργεί ως βιολογική θωράκιση για την προστασία των εργαζομένων από τις ακτινοβολίες που εκπέμπει η καρδιά. Το επάνω μέρος του δοχείου καλύπτεται με βαρύ «σιδερένιο καπάκι» (δεν φαίνεται στο Σχήμα Π III.1).

#### ➤ Εκροές και διασπορά ραδιενεργών υλικών. Ρύπανση του περιβάλλοντος.<sup>47</sup>

Στον Πίνακα Π III.1 παρατίθενται οι εκτιμήσεις (UNSCEAR 2000) για τις πιο σημαντικές συνολικές εκροές από άποψη δόσεων, αυτές του στρόντιου-90, του καϊσίου-137, του καϊσίου-134 και του ιωδίου-131. Προκειμένου να υπάρξει αίσθηση της διάστασης των μεγεθών αυτών και μέτρο σύγκρισης, παρατίθενται στον ίδιο πίνακα οι αντίστοιχες τιμές της συνολικής έκλυσης ραδιενέργειας από τις δοκιμές των πυρηνικών όπλων στην ατμόσφαιρα στο διάστημα 1945 έως 1980. Φαίνεται ότι οι συνολικές εκλύσεις ραδιενέργειας από τις πυρηνικές δοκιμές είναι μεγαλύτερες από αυτές του ατυχήματος κατά 517 φορές για το ιώδιο-131, κατά 18 φορές για το καϊσίο-137 και κατά 85 φορές για το στρόντιο-90.

Παρόμοια είναι η σχέση μεταξύ ατυχήματος και πυρηνικών δοκιμών και για άλλα ραδιονουκλίδια. Σε κάθε περίπτωση, οι συνολικές εκλύσεις ραδιενέργειας από τις πυρηνικές δοκιμές στην ατμόσφαιρα είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του ατυχήματος του

---

<sup>46</sup> **ανάδραση κενού:** ο χώρος κάθε φυσαλίδας ατμού ονομάζεται κενό, διότι η πυκνότητα των φυσαλίδων είναι αμελητέα σε σχέση με την πυκνότητα του υγρού νερού. Έστω ότι στην καρδιά του αντιδραστήρα υπάρχει ένα μέγεθος κενού και κάποια στιγμή συμβαίνει, για κάποιον λόγο, μικρή αύξηση της παραγόμενης θερμικής ισχύος. Η αύξηση ισχύος θα επιφέρει αύξηση του βρασμού, αύξηση της ποσότητας ατμού, δηλαδή αύξηση του μεγέθους του κενού. Ενδεχόμενη συνέπεια είναι μία εκ των εξής δύο:

(α) η αύξηση του μεγέθους του κενού να προκαλέσει μείωση της παραγόμενης ισχύος, οπότε τελικά το σύστημα θα επανέλθει στην αρχική του κατάσταση, στην αρχική ισχύ. Τότε το σύστημα έχει **αρνητική ανάδραση κενού** και είναι ευσταθές.

(β) η αύξηση του μεγέθους του κενού να προκαλέσει περαιτέρω αύξηση της παραγόμενης ισχύος, η οποία με τη σειρά της θα επιφέρει περαιτέρω αύξηση του βρασμού και του μεγέθους του κενού, η οποία θα προκαλέσει περαιτέρω αύξηση της παραγόμενης ισχύος κ.ο.κ. Συνεπώς, σε ένα τέτοιο σύστημα κάποια αρχική, έστω και μικρή, αύξηση της παραγόμενης ισχύος οδηγεί σε συνεχή αύξηση της ισχύος. Λέμε τότε ότι υπάρχει **θετική ανάδραση κενού** και το σύστημα είναι ασταθές και επιρρεπές να οδηγήσει σε ανεξέλεγκτη αύξηση της ισχύος και σε ατύχημα. Είναι προφανές ότι η ασφάλεια απαιτεί σχεδιασμό του αντιδραστήρα, ώστε η ανάδραση κενού να είναι αρνητική, ή, αν αυτό δεν είναι δυνατόν, ο βαθμός θετικής ανάδρασης να είναι επαρκώς μικρός, ώστε τυχόν αυξήσεις της ισχύος να ελέγχονται εύκολα και έγκαιρα από το σύστημα ελέγχου.

<sup>47</sup> UNSCEAR 1998, UNSCEAR 2000

Chernobyl Ten Years On. NEA OECD (1995)

International Atomic Energy Agency. Int. Conference: One decade after Chernobyl, Summing up the consequences of the accident (1996)

Τσέρνομπιλ. Οι διαφορές μεταξύ των δύο είναι ότι η διασπορά της ρύπανσης από τις πυρηνικές δοκιμές έγινε σε όλο τον πλανήτη και σε μεγάλο χρονικό διάστημα, ενώ η ρύπανση από το ατύχημα έγινε σε σημαντικά μικρότερες περιοχές και σε σημαντικά μικρότερο χρονικό διάστημα. Αλλά και οι δόσεις λόγω του ατυχήματος στους πληθυσμούς μακριά από το Τσέρνομπιλ, όπως π.χ. στη χώρα μας, είναι σημαντικά μικρότερες από τις δόσεις λόγω των πυρηνικών δοκιμών.

**Πίνακας ΠΙΙΙ.1:** Συνολικές εκροές ραδιενέργειας των τεσσάρων ραδιονουκλιδίων από το ατύχημα του Τσέρνομπιλ και αντίστοιχες συνολικές εκλύσεις από τις δοκιμές των πυρηνικών όπλων στην ατμόσφαιρα από το 1945 έως το 1980. Από τις πυρηνικές δοκιμές δεν εκλύεται καίσιο-134. Οι τιμές είναι σε μονάδες  $10^{18}$  μπεκερέλ (Bq)<sup>48</sup>.

|            | ατύχημα Τσέρνομπιλ | πυρηνικές δοκιμές |
|------------|--------------------|-------------------|
| Ιώδιο-131  | 1,76               | 910               |
| Καίσιο-137 | 0,085              | 1,3               |
| Καίσιο 134 | 0,054              | —                 |
| Στρόνιο-90 | 0,01               | 0,85              |

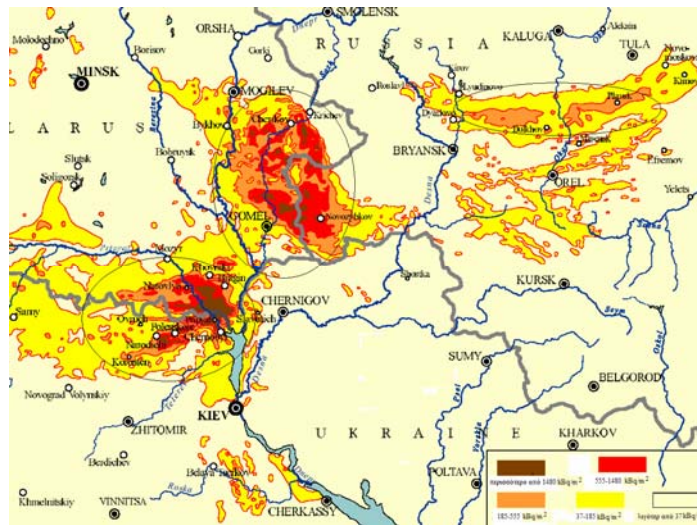
Στο Χάρτη Π ΙΙΙ.1 παρουσιάζονται τα επίπεδα εναπόθεσης καϊσίου-137 στα εδάφη των περιοχών με τις μεγαλύτερες εναποθέσεις στην Ουκρανία, Λευκορωσία και Ρωσία. Στην περιοχή βορειοανατολικά του Τσέρνομπιλ και του Gomel, σε απόσταση περίπου 200 χιλιομέτρων από το Τσέρνομπιλ (περιοχή μεταξύ των πόλεων Gomel, Mogilev και Bryansk), υπάρχουν μικρές περιοχές με εναπόθεση στο έδαφος καϊσίου-137 μεγαλύτερη από  $1.500 \text{ kBq/m}^2$ . Εναποθέσεις στο έδαφος καϊσίου-137 μεγαλύτερες από  $1.500 \text{ kBq/m}^2$  υπήρξαν κυρίως στην περιοχή με απόσταση 30 χιλιομέτρων από τον πυρηνικό σταθμό (ονομαζόμενη **ζώνη των 30 χιλιομέτρων** ή **ζώνη αποκλεισμού**) και σε μερικές περιοχές βόρεια, νότια και δυτικά της ζώνης των 30 χιλιομέτρων. Στην περιοχή που βρίσκεται μεταξύ των πόλεων Kaluga, Bryansk και Kursk, σε απόσταση 500 περίπου χιλιομέτρων βορειοανατολικά από το Τσέρνομπιλ, η εναπόθεση καϊσίου-137 ήταν γενικά μικρότερη από  $500 \text{ kBq/m}^2$ . **Σχεδόν το σύνολο των περιοχών με εναποθέσεις μεγαλύτερες από  $1.500 \text{ kBq/m}^2$  βρίσκονται εντός ακτίνας 60 περίπου χιλιομέτρων από τον πυρηνικό σταθμό** (Χάρτης Π ΙΙΙ.2).

Ο Χάρτης Π ΙΙΙ.2 παρουσιάζει τις εναποθέσεις καϊσίου-137 στη ζώνη των 30 χιλιομέτρων, καθώς και σε ακτίνα 60 χιλιομέτρων από τον πυρηνικό σταθμό του Τσέρνομπιλ. Η περιοχή εντός αποστάσεως 30 χιλιομέτρων από αντιδραστήρα θεωρείτο και εξακολουθεί να θεωρείται ως περιοχή σημαντικού κινδύνου για τον πληθυσμό, σε περίπτωση μεγάλου ατυχήματος. Για τη ζώνη αυτή προβλέπεται ότι σε περίπτωση μεγάλου ατυχήματος ενδέχεται να χρειαστεί εκκένωση του πληθυσμού. Πράγματι, στη ζώνη αυτή η εναπόθεση καϊσίου-137 είχε τις μέγιστες τιμές. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έγινε πράγματι εκκένωση του πληθυσμού, κυρίως της ζώνης των 30 χιλιομέτρων, αλλά όχι μόνον αυτής.

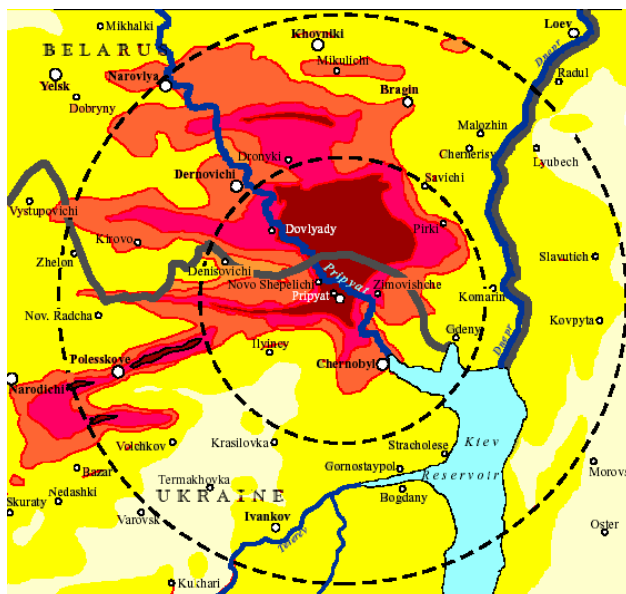
Περιοχές με εναποθέσεις καϊσίου-137 μεγαλύτερες από  $555 \text{ kBq/m}^2$  χαρακτηρίστηκαν ως **περιοχές αυστηρού ελέγχου**. Στις περιοχές αυτές γινόταν συστηματική παρακολούθηση των επιπέδων ραδιενέργειας και ελήφθησαν μέτρα μείωσης της ενεργού δόσης. Το 1986 ο πληθυσμός που ζούσε σε αυτές τις περιοχές ήταν περίπου 273.000 άτομα σε έκταση 10.300 τετραγωνικών χιλιομέτρων και το 1995 είχε μειωθεί σε περίπου 150.000 άτομα, λόγω μεταναστεύσεων. Στον Χάρτη Π ΙΙΙ.1 οι περιοχές αυτές σηματοδοτούνται, κατά προσέγγιση, με μαύρες ελλείψεις και είναι η κεντρική περιοχή γύρω από το Τσέρνομπιλ, περιοχή μεταξύ

<sup>48</sup> Οι τιμές για τις πυρηνικές δοκιμές είναι από το κεφάλαιο Ραδιενεργός ρύπανση του περιβάλλοντος του Π. Κρητίδη στο *Εμείς και η ραδιενέργεια, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, 1989* και έχουν ληφθεί από το USCEAR 1982.

των πόλεων Gomel, Mogilev και Bryansk και μια μικρή περιοχή νότια της Kaluga. Με εξαίρεση το μικρό τμήμα της περιοχής νότια της Kaluga, αυτές βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από 240 χιλιόμετρα από τον σταθμό του Τσέρνομπιλ.



**Χάρτης ΠIII.1:** Εναποθέσεις Καισίου-137 στα εδάφη των πιο ρυπασμένων περιοχών. Οι μαύρες ελλείψεις περικλείουν, κατά προσέγγιση, τις «περιοχές αυστηρού ελέγχου».<sup>49</sup>



**Χάρτης ΠIII.2:** Εναποθέσεις Καισίου-137 στη ζώνη των 30 χιλιομέτρων.

Σε πρώτη προσέγγιση μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι εναποθέσεις των περισσότερων ραδιονουκλιδίων των εκρών από το ατύχημα είναι αντίστοιχες σε μέγεθος με τις εναποθέσεις καισίου-137. Η αντιστοιχία αυτή δεν ισχύει για τα ραδιοϊσότοπα που εκλύθηκαν με τη μορφή μεγάλων βαρέων σωματιδίων, τα οποία έπεσαν και εναποτέθηκαν στο έδαφος σε σχετικά μικρές αποστάσεις από τον αντιδραστήρα. Η εναπόθεση στο έδαφος πλουτωνίου-239 και πλουτωνίου-240 υπήρξε αξιόλογη από ραδιολογική άποψη

<sup>49</sup> Ο χάρτης προκύπτει από το ATLAS OF CAESIUM DEPOSITION ON EUROPE AFTER THE CHERNOBYL ACCIDENT. Έκδοση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (1998, cat. Number CG-NA-16-733-29-C)

**μόνον μέσα στη ζώνη των 30 χιλιομέτρων. Το ίδιο ισχύει και για την εναπόθεση στροντίου-90.** Περιοχές με εναποθέσεις στροντίου-90 μεγαλύτερες από 100 kBq/m<sup>2</sup> βρίσκονται σχεδόν πλήρως εντός της ζώνης των 30 χιλιομέτρων. Περιοχές στις οποίες η εναπόθεση στροντίου-90 ήταν μεγαλύτερη από 37 kBq/m<sup>2</sup> βρίσκονται σχεδόν όλες σε ακτίνα μικρότερη από 100 χιλιόμετρα από τον πυρηνικό σταθμό.

**Πίνακας Π III.2:** Ρύπανση των περιοχών της Ευρώπης από το ατύχημα του Τσέρνομπιλ (από τον Πίνακα 5, σελ. 521, Παράρτημα J του UNSCEAR-2000).

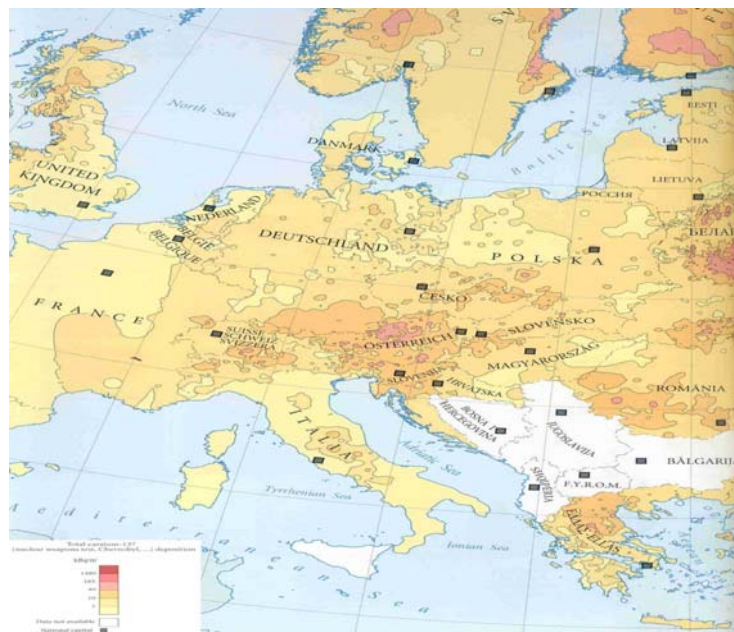
| Χώρα          | Έκταση σε τετραγωνικά χιλιόμετρα για κάθε εύρος ρύπανσης |                                |                                 |                                         |
|---------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|
|               | 37 έως 185 kBq/m <sup>2</sup>                            | 185 έως 555 kBq/m <sup>2</sup> | 555 έως 1480 kBq/m <sup>2</sup> | περισσότερο από 1480 kBq/m <sup>2</sup> |
| Ρωσία         | 49 800                                                   | 5700                           | 2100                            | 300                                     |
| Λευκορωσία    | 29 900                                                   | 10200                          | 4200                            | 2200                                    |
| Ουκρανία      | 37 200                                                   | 3200                           | 9                               | 600                                     |
| Σουηδία       | 12 000                                                   | —                              | —                               | —                                       |
| Φινλανδία     | 11 500                                                   | —                              | —                               | —                                       |
| Αυστρία       | 8 600                                                    | —                              | —                               | —                                       |
| Νορβηγία      | 5 200                                                    | —                              | —                               | —                                       |
| Βουλγαρία     | 4 800                                                    | —                              | —                               | —                                       |
| Ελβετία       | 1 300                                                    | —                              | —                               | —                                       |
| <b>Ελλάδα</b> | 1 200                                                    | —                              | —                               | —                                       |
| Σλοβενία      | 300                                                      | —                              | —                               | —                                       |
| Ιταλία        | 300                                                      | —                              | —                               | —                                       |
| Μολδαβία      | 60                                                       | —                              | —                               | —                                       |

Νέφη με ραδιενεργούς ρύπους διεσπάρησαν στο Βόρειο Ημισφαίριο και με βροχές εναπόθεσαν ραδιενεργούς ρύπους σε χώρες της Βόρειας Ευρώπης. Ο Χάρτης Π III.3 δείχνει την εναπόθεση καϊσίου-137 σε εδάφη της Ευρώπης<sup>50</sup>, ο δε Πίνακας Π III.2 παρουσιάζει την έκταση της εναπόθεσης σε χώρες της Ευρώπης. Όπως φαίνεται στον πίνακα, υπάρχουν περιοχές στις οποίες η εναπόθεση καϊσίου-137 υπήρξε μεγαλύτερη από 37 kBq/m<sup>2</sup>, σε μεγάλη έκταση κυρίως στη Σουηδία, τη Νορβηγία, τη Φινλανδία, την Αυστρία και τη Βουλγαρία. Σε αυτές τις χώρες η εναπόθεση καϊσίου-137 δεν ξεπέρασε τα 185 kBq/m<sup>2</sup>, εκτός από μικρό αριθμό περιοχών περιορισμένης έκτασης. Τέλος, σημειώνεται ότι τα δίκτυα ελέγχου ραδιενέργειας περιβάλλοντος του Νότιου Ημισφαιρίου δεν ανίχνευαν ραδιενεργούς ρύπους από το ατύχημα του Τσέρνομπιλ.

Τα ραδιενεργά υλικά που εναποτέθηκαν στις επιφάνειες θαλασσών, λιμνών και ποταμών διαλύθηκαν, ή/και αναμείχθηκαν γρήγορα σε μεγάλες ποσότητες υδάτων, οπότε προέκυψαν πολύ μικρές συγκεντρώσεις ραδιενεργών υλικών ανά λίτρο ύδατος. Σε μικρές λίμνες και μικρούς ποταμούς ο κύριος μηχανισμός ραδιενεργού ρύπανσης υπήρξε η διάβρωση

<sup>50</sup> Δεν υπάρχουν στοιχεία για τις χώρες της πρώην Γιουγκοσλαβίας και για τη Βουλγαρία.

επιφανειακών εδαφών και η μεταφορά τους από τα επιφανειακά ύδατα στις λίμνες και τους ποταμούς. Αυτό έγινε σε πολύ μικρό βαθμό για το καίσιο, καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό του καϊσίου προσροφήθηκε και εγκλωβίσθηκε στα αργιλώδη υλικά του εδάφους.



**Χάρτης Π ΙΙΙ.3:** Εναποθέσεις<sup>5</sup> καϊσίου-137 στα εδάφη της Ευρώπης.

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV: Ατυχήματα στην παραγωγή ενέργειας από το 1977**

| Place                  | Year | Number killed | Comments                           |
|------------------------|------|---------------|------------------------------------|
| Machhu II, India       | 1979 | 2500          | hydro-electric dam failure         |
| Hirakud, India         | 1980 | 1000          | hydro-electric dam failure         |
| Ortuella, Spain        | 1980 | 70            | gas explosion                      |
| Donbass, Ukraine       | 1980 | 68            | coal mine methane explosion        |
| Israel                 | 1982 | 89            | gas explosion                      |
| Guavio, Colombia       | 1983 | 160           | hydro-electric dam failure         |
| Nile R, Egypt          | 1983 | 317           | LPG explosion                      |
| Cubatao, Brazil        | 1984 | 508           | oil fire                           |
| Mexico City            | 1984 | 498           | LPG explosion                      |
| Tbilisi, Russia        | 1984 | 100           | gas explosion                      |
| northern Taiwan        | 1984 | 314           | 3 coal mine accidents              |
| Chernobyl, Ukraine     | 1986 | 31+           | nuclear reactor accident           |
| Piper Alpha, North Sea | 1988 | 167           | explosion of offshore oil platform |
| Asha-ufa, Siberia      | 1989 | 600           | LPG pipeline leak and fire         |
| Dobrnja, Yugoslavia    | 1990 | 178           | coal mine                          |
| Hongton, Shanxi, China | 1991 | 147           | coal mine                          |
| Belci, Romania         | 1991 | 116           | hydro-electric dam failure         |
| Kozlu, Turkey          | 1992 | 272           | coal mine methane explosion        |
| Cuenca, Equador        | 1993 | 200           | coal mine                          |
| Durunkha, Egypt        | 1994 | 580           | fuel depot hit by lightning        |
| Seoul, S.Korea         | 1994 | 500           | oil fire                           |
| Minanao, Philippines   | 1994 | 90            | coal mine                          |
| Dhanbad, India         | 1995 | 70            | coal mine                          |
| Taegu, S.Korea         | 1995 | 100           | oil & gas explosion                |
| Spitsbergen, Russia    | 1996 | 141           | coal mine                          |
| Henan, China           | 1996 | 84            | coal mine methane explosion        |
| Datong, China          | 1996 | 114           | coal mine methane explosion        |
| Henan, China           | 1997 | 89            | coal mine methane explosion        |
| Fushun, China          | 1997 | 68            | coal mine methane explosion        |

| Place                             | Year | Number killed | Comments                               |
|-----------------------------------|------|---------------|----------------------------------------|
| Kuzbass, Russia/Siberia           | 1997 | 67            | coal mine methane explosion            |
| Huainan, China                    | 1997 | 89            | coal mine methane explosion            |
| Huainan, China                    | 1997 | 45            | coal mine methane explosion            |
| Guizhou, China                    | 1997 | 43            | coal mine methane explosion            |
| Donbass, Ukraine                  | 1998 | 63            | coal mine methane explosion            |
| Liaoning, China                   | 1998 | 71            | coal mine methane explosion            |
| Warri, Nigeria                    | 1998 | 500+          | oil pipeline leak and fire             |
| Donbass, Ukraine                  | 1999 | 50+           | coal mine methane explosion            |
| Donbass, Ukraine                  | 2000 | 80            | coal mine methane explosion            |
| Shanxi, China                     | 2000 | 40            | coal mine methane explosion            |
| Muchonggou, Guizhou, China        | 2000 | 162           | coal mine methane explosion            |
| Zasyadko, Donetsk, E.Ukraine      | 2001 | 55            | coal mine methane explosion            |
| Jixi, China                       | 2002 | 115           | coal mine methane explosion            |
| Gaoqiao, SW China                 | 2003 | 234           | gas well blowout with H <sub>2</sub> S |
| Kuzbass, Russia                   | 2004 | 47            | coal mine methane explosion            |
| Donbass, Ukraine                  | 2004 | 36            | coal mine methane explosion            |
| Henan, China                      | 2004 | 148           | coal mine methane explosion            |
| Chenjiashan, Shaanxi, China       | 2004 | 166           | coal mine methane explosion            |
| Sunjiawan, Liaoning, China        | 2005 | 215           | coal mine methane explosion            |
| Shenlong/ Fukang, Xinjiang, China | 2005 | 83            | coal mine methane explosion            |
| Xingning, Guangdong, China        | 2005 | 123           | coal mine flooding                     |
| Dongfeng, Heilongjiang, China     | 2005 | 171           | coal mine methane explosion            |
| Bhatdih, Jharkhand, India         | 2006 | 54            | coal mine methane explosion            |
| Ulyanovskaya, Kuzbass, Russia     | 2007 | 108           | coal mine methane or dust explosion    |
| Zhangzhuang, Shandong, China      | 2007 | 181           | coal mine flooding                     |
| Zasyadko, Donetsk, E.Ukraine      | 2007 | 101           | coal mine methane explosion            |

Sources: contemporary media reports, Paul Scherrer Inst, 1998 report:, China State Admin. of Work Safety Bulletin.

Ατυχήματα με LPG και πετρέλαιο με λιγότερους από 300 νεκρούς και ατυχήματα ορυχείων άνθρακα με λιγότερους από 100 νεκρούς γενικά δεν καταχωρήθηκαν, εκτός αν είναι πρόσφατα. Οι θάνατοι σε ορυχεία, ανά ένα εκατομμύριο τόνους άνθρακα, κυμαίνονται από 0,009 στη Αυστραλία, 0,034 στις ΗΠΑ μέχρι 4 στην Κίνα και 7 στην Ουκρανία. Σύμφωνα με επίσημα στοιχεία οι θάνατοι σε ορυχεία άνθρακα ήταν 5300 το 2000, 5670 το 2001, 7200 το 2003, 6027 το 2004, 6000 το 2005, 4746 το 2006 και 3786 το 2007. Εντούτοις η κατάσταση βελτιώνεται: τη δεκαετία του 50 ο συνολικός ετήσιος αριθμός θανάτων σε ορυχεία άνθρακα ήταν 70000, στη δεκαετία του 80 ήταν 40000 και στην δεκαετία του 90 ήταν 10000.