



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΝΟΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΚΟΙΝΟΤΙΚΗΣ ΥΓΕΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ

ΤΙΤΛΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

“Πυρηνικά ατυχήματα μεγάλης κλίμακας: Αίτια, επιπτώσεις στην υγεία και στο περιβάλλον και διορθωτικά μέτρα”

Ονοματεπώνυμο Φοιτήτριας: Βαζαίου Ανδριάνα

Αριθμός Μητρώου: 11069

Επιβλέπων Καθηγητής: Κωνσταντίνος Ντελέζος, Λέκτορας Εφαρμογών

Αθήνα, 2022

Copyright © Ονοματεπώνυμο, 2021 . Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

All rights reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΝΟΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΚΟΙΝΟΤΙΚΗΣ ΥΓΕΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η προπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική επιτροπή:

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟ ΝΤΕΛΕΖΟ
Λέκτορας εφαρμογών

ΙΩΑΝΝΗ ΠΑΠΑΔΑ
Επίκουρος Καθηγητής

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΜΠΟΥΛΑΝΙΚΗ
Λέκτορας Εφαρμογών

--	--	--

Όνοματεπώνυμο: Βαζαίου Ανδριάνα

A.E.M.: 11069

Ηλεκτρονική διεύθυνση: vazaiou_andriana@hotmail.com

Έτος εισαγωγής: 2011

Κατεύθυνση: Δημόσια Υγεία

Τίτλος διπλωματικής εργασίας: “Πυρηνικά ατυχήματα μεγάλης κλίμακας: Αίτια, επιπτώσεις στην υγεία και στο περιβάλλον και διορθωτικά μέτρα”

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Βαζαίου Ανδριάνα του Δημητρίου, με αριθμό μητρώου 11069 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Δημόσιας Υγείας, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/ διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την όποια είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, λέξεων αλλά και εικόνων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολο τους με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από τον διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η πτυχιακή/ διπλωματική έχει συγγραφεί από εμένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου.

Ημερομηνία 09 - 10 – 2022

Η δηλούσα:

Βαζαίου Ανδριάνα

Andriana Vazaiou

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα κατ' αρχάς να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Ντελέζο, λέκτορα εφαρμογών για την πολύτιμη βοήθειά του, κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και για την καθοδήγηση και την στήριξη που μου προσέφερε απλόχερα. Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υπόλοιπους διδάσκοντες του παρόντος προπτυχιακού προγράμματος, που μέσω των μαθημάτων τους μου μετέδωσαν τις γνώσεις τους. Τέλος, για την εγκάρδια υποστήριξή τους και την πολύτιμη βοήθειά τους, θα ήθελα να πω ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και στους φίλους μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη δεκαετία του 1950 και του 1960, πολλές χώρες πίστευαν ότι θα μπορούσαν να γίνουν ενεργειακά αυτόνομες με τη βοήθεια πυρηνικών σταθμών. Για το λόγο αυτό, η πυρηνική ενέργεια παρουσίασε διεθνώς μια τεράστια άνθηση κατά τη διάρκεια αυτών των ετών. Τις επόμενες δεκαετίες σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν πολλοί πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής. Παρά τους μερικούς επικριτές, τόνισαν τους κινδύνους της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας, και η αναχαίτηση της άνθισης της τερματισμός της δεν ήταν προβλέψιμη. Οι ευρωπαίοι γνώρισαν για πρώτη φορά τον κίνδυνο από τους πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής το 1986, όταν σημειώθηκε η πυρηνική καταστροφή στον πυρηνικό σταθμό της Ουκρανίας στο Τσερνόμπιλ. Οι επιπτώσεις αυτής της πυρηνικής καταστροφής έγιναν επίσης αισθητές στην Κεντρική Ευρώπη. Πρόσφατα, η πυρηνική καταστροφή στο πυρηνικό εργοστάσιο της Φουκουσίμα προκάλεσε μια έντονη αναστάτωση σχετικά με την πυρηνική ενέργεια και τις συνέπειες της τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε διεθνές επίπεδο.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στις επιπτώσεις των πυρηνικών ατυχημάτων στα ανθρώπινα όντα, τα ζώα και το περιβάλλον και στον τρόπο διαχείρισης τέτοιων ατυχημάτων. Ακόμη, γίνεται εκτενής αναφορά στην έννοια και την σημασία της πυρηνικής ενέργειας ενώ αναλύονται διεξοδικά τα περιστατικά στο Τσερνόμπιλ και τη Φουκουσίμα, καθώς και τα αποτελέσματά τους.

ABSTRACT

In the decade 1950 and 1960, many countries believed they could become energy self-sufficient with the help of nuclear power plants. For this reason, nuclear energy has experienced a huge boom internationally during these years. Over the next few decades, many nuclear power plants were designed and built. Despite some critics, they emphasized the dangers of using nuclear energy, and the arrest of the boom and its termination was not foreseeable. Europeans first became aware of the danger of nuclear power plants in 1986, when the nuclear disaster occurred at the Chernobyl nuclear power plant in Ukraine. The effects of this nuclear disaster were felt in Central Europe as well. Recently, the nuclear disaster at the Fukushima nuclear power plant has caused a strong uproar about nuclear energy and its consequences both at European and international level.

This project focuses on the effects of nuclear accidents on human beings, animals and the environment and how such accidents can be managed. Also, extensive reference is made to the concept and importance of nuclear energy, while the incidents in Chernobyl and Fukushima, as well as their results, are thoroughly analyzed.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	5
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	7
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ ΚΑΙ ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	13
1.1. Γενικά για την πυρηνική ενέργεια και τις αλήθειες γύρω από αυτή.....	13
1.2 Το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ.....	22
2.1. Το ατύχημα του Chernobyl	22
2.1.1. Το ατύχημα του Τσερνόμπιλ το 1986	24
2.1.2. Άμεσες επιπτώσεις του ατυχήματος του Τσερνόμπιλ	26
2.1.3. Μακροχρόνιες Επιπτώσεις του ατυχήματος του Τσερνόμπιλ σε περιβάλλον και ανθρώπινες ζωές.	29
2.2. Το ατύχημα της Φουκουσίμα	32
2.2.1. Τα δύο εργοστάσια της Φουκουσίμα και η τοποθεσία τους.....	34
2.2.2. Εκδηλώσεις στο Fukushima Daiichi 1-3 & 4.....	36
2.2.3. Ραδιενεργές εκλύσεις στον αέρα	37
2.2.4. Έκθεση ακτινοβολίας στο εργοστάσιο	39
2.2.5. Έκθεση ακτινοβολίας σε περιοχές πέραν της Φουκουσίμα.....	41
2.2.6. Δημόσια Υγεία και επιστροφή των εκτοπισθέντων	43
2.2.7. Διαχείριση μολυσμένου νερού	45
2.2.8. Αξιολόγηση Διεθνούς Κλίμακας Πυρηνικών Γεγονότων.....	48
2.2.9. Ευθύνη ατυχήματος και αποζημίωση	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΔΥΣΑΡΕΣΤΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΑ ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΖΩΕΣ ΤΩΝ ΑΝΘΡΩΠΩΝ	54
3.1. Ραδιενεργή Ρύπανση της Ατμόσφαιρας και του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος.....	55
3.2. Έκθεση ανθρώπινης υγείας	60
3.3. Ο ρόλος του υγειονολόγου	62
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	64
ΤΡΟΠΟΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ.....	69
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	77

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Απεικόνιση του New Safe Confinement (NSC) με τη μονάδα 4 του Τσερνόμπιλ πίσω του. Η δομή των 36.000 τόνων ωθήθηκε 327 μέτρα σε σιδηροτροχιές στη θέση του πάνω από το κτίριο του αντιδραστήρα τον Νοέμβριο του 2016. (Ευρωπαϊκή Τράπεζα Ανασυγκρότησης και Ανάπτυξης).....26

Εικόνα 2. . Απεικόνιση του πυρηνικού αντιδραστήρα μετά την έκρηξη το 1986. 30 άνθρωποι έχασαν εκείνη τη μέρα τη ζωή τους, ενώ χιλιάδες ακόμα εκτέθηκαν στη ραδιενέργεια που απελευθερώθηκε στην ατμόσφαιρα... ..22

Εικόνα 3. Ο σταθμός παραγωγής ενέργειας Fukushima Daiichi πριν από το τσουνάμι και το ατύχημα του 2011 (Terco)..... 33

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ ΚΑΙ ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

TMI	Τρία νησιά Mile
ΗΠΑ	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
RBMK-1000	Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalnyy (High Power Channel-type Reactor)
ΕΣΣΔ	Ένωση Σοβιετικών Σοσιαλιστικών Δημοκρατιών
ΔΟΑΕ	Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας
ΟΗΕ	Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών
ΟCHA	Office for the Coordination of Humanitarian Affairs
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
JPY	Japanese yen
EOPs	Extended Opportunity Programs and Services
ERO	European Research Overview
UBS AG	Investment banking company Group AG
MIT	Massachusetts Institute of Technology

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής πρέπει να λειτουργούν με τον πλέον ασφαλή τρόπο, τηρώντας όλα τα μέτρα ασφαλείας και τις αρχές που υιοθετούνται σε εθνικό, περιφερειακό και διεθνές επίπεδο. Όταν τα μέτρα και οι αρχές ασφαλείας αγνοούνται ή δεν τηρούνται σωστά από τους χειριστές πυρηνικών σταθμών, μπορεί να συμβεί πυρηνικό ατύχημα με σοβαρές συνέπειες για το περιβάλλον, την ανθρώπινη υγεία και την κοινή γνώμη. Για το λόγο αυτό, η πυρηνική αξιολόγηση της λειτουργίας των πυρηνικών σταθμών θα πρέπει να διενεργείται περιοδικά από τις κυβερνήσεις και τους ιδιοκτήτες πυρηνικών σταθμών.

Πυρηνικά ατυχήματα μπορεί να συμβούν έχοντας καταστροφικές συνέπειες για την ανθρωπότητα και τον πλανήτη, παρόλο που υπάρχει η φιλοδοξία ότι πρέπει να καταβληθούν όλες οι πιθανές προσπάθειες για την αποφυγή τους. Επιπλέον, η συνειδητοποίηση της ανθρώπινης και φτωχής φύσης οδηγεί επίσης στο να θεσπιστούν τεχνικές που θα περιορίσουν αυτές τις συνέπειες αλλά και σχέδια έκτακτης ανάγκης, καθώς μπορεί να υπάρξει απώλεια ελέγχου των διαδικασιών της πυρηνικής σχάσης καθώς και απώλεια ψύξης και να προκληθούν πυρηνικά ατυχήματα όπως των τριών νησιών Mile (TMI), του Τσερνόμπιλ και της Φουκουσίμα.

Οι καταστροφές του Τσερνόμπιλ και της Φουκουσίμα-Νταϊτσι είναι απόδειξη ότι η οι συνέπειες ενός μεγάλου πυρηνικού ή ραδιολογικού ατυχήματος μπορεί να επηρεάσουν όλα τα επίπεδα της κοινωνίας. Αυτές οι προκλήσεις είναι σημαντικές και αφορούν:

- **Δημόσια υγεία:** Ένα μη ελεγχόμενο πυρηνικό ατύχημα μπορεί να έχει άμεσες συνέπειες (θάνατο, τραυματισμό, ακτινοβολία) καθώς και μακροπρόθεσμες συνέπειες που μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένο κίνδυνο ανάπτυξης ασθενειών που προκαλούνται από την ακτινοβολία (όπως ορισμένοι τύποι καρκίνου).

- **Περιβαλλοντική ποιότητα:** Η μόλυνση από την ακτινοβολία μπορεί να διαρκέσει για αρκετές δεκαετίες και, σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να οδηγήσει σε μια περιοχή που έκλεισε οριστικά για το κοινό.
- **Οικονομική και κοινωνική συνέχεια:** Τα πυρηνικά ατυχήματα κάνουν τον άνθρωπο να σταματήσει τη δραστηριότητα σε μολυσμένες περιοχές, διαταράσσοντας την οικονομική του κατάσταση και την κοινωνική τάξη ολόκληρης της χώρας. Ως εκ τούτου, μπορεί να είναι απαραίτητο να προσαρμοστούν τα οικονομικά και κοινωνικά συστήματα και να πραγματοποιηθεί εκκαθάριση σε επιχειρήσεις εάν έχουν εκτοπιστεί άτομα και επιχειρήσεις.
- **Ποιότητα των διεθνών σχέσεων:** Σχετίζεται με την εκπλήρωση των υποχρεώσεων ειδοποίησης και ενημέρωσης των ευρωπαϊών και διεθνών εταίρων.

Επιπρόσθετα, ανάλογα ατυχήματα έχουν συμβεί και παλαιότερα με μικρότερους αντιδραστήρες και με λιγότερο σοβαρές συνέπειες. Είναι σκόπιμο να καθορίζονται εξ αρχής οι ενέργειες και οι διαδικασίες για την πρόληψη των ατυχημάτων και τον περιορισμό των άμεσων συνεπειών τους. Υπάρχουν όμως και μακροπρόθεσμες επιπτώσεις που μπορεί να επεκταθούν κατά τη διάρκεια των ετών, των δεκαετιών ακόμη και των αιώνων.

Η εμπειρία στα βραχυπρόθεσμα γεγονότα, τις συνέπειες και τις διορθωτικές ενέργειες συνήθως μεταδίδεται μεταξύ των ομάδων που εργάζονται πάνω στην ετοιμότητα και προστασία από την ραδιενεργή ακτινοβολία, αλλά η εκπαίδευση και η έγκυρη ενημέρωση είναι ελλιπής όσον αφορά τις μακροπρόθεσμες συνέπειες. Επιπλέον, αυτές οι συνέπειες μπορεί να είναι πολύ δύσκολο να εντοπιστούν εκ των προτέρων, δεδομένου ότι οι αποφάσεις για μακροπρόθεσμα ζητήματα ενδέχεται να ληφθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά από ατύχημα. Ατυχήματα όπως αυτό στο Τσερνόμπιλ και στην Φουκουσίμα δείχνει την αναγκαιότητα της ύπαρξης πόρων για την αντιμετώπιση τέτοιων επικίνδυνων καταστάσεων.

Έτσι, θεωρείται σκόπιμο, όποιοι έχουν στην κατοχή τους τεχνογνωσία σχετικά με μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της έκθεσης σε ραδιενεργή ακτινοβολία να τις

τεκμηριώνουν έτσι ώστε να υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες για τα άτομα που απασχολούνται σε πυρηνικά εργοστάσια και μπορεί να αντιμετωπίσουν οποιοδήποτε μελλοντικό σοβαρό ατύχημα.

Επιπλέον, για να αποφευχθεί ένα μελλοντικό πυρηνικό ατύχημα, σημαντικό ρόλο σε αυτό διαδραματίζει και η αξιολόγηση της ασφάλειας, η οποία θα πρέπει να είναι μια συστηματική διαδικασία που πρέπει να διεξάγεται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του πυρηνικού σταθμού, με στόχο τον εντοπισμό των κινδύνων ακτινοβολίας που προκύπτουν για τους εργαζόμενους, των επιπτώσεων στο κοινό και στο περιβάλλον κατά την κανονική λειτουργία ενός πυρηνικού σταθμού ηλεκτρισμού. Ως εκ τούτου, η αξιολόγηση ασφάλειας έχει ως στόχο στο να προσδιοριστεί εάν έχουν ληφθεί επαρκή μέτρα από τις κυβερνήσεις και τους φορείς εκμετάλλευσης πυρηνικών σταθμών για τον έλεγχο των κινδύνων ακτινοβολίας σε αποδεκτό επίπεδο, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την πρόληψη μη φυσιολογικών συμβάντων όσο και τον μετριασμό των συνεπειών τους (Pedraza, 2013).

Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι να προσδιορίσει τα βασικότερα πυρηνικά ατυχήματα που έλαβαν χώρα στον κόσμο. Ειδικότερα, γίνεται αναφορά στο πυρηνικό ατύχημα του Τσερνόμπιλ και στο πυρηνικό ατύχημα Φουκουσίμα. Επίσης, γίνεται αναφορά στις επιπτώσεις που είχαν αυτά τα πυρηνικά ατυχήματα στην υγεία των ανθρώπων και όλων αυτών που προσβλήθηκαν από την έκλυση της ραδιενέργειας. Επιπρόσθετα, γίνεται προσπάθεια ώστε να προσδιοριστεί εάν έχει επιτευχθεί επαρκές επίπεδο ασφάλειας και εάν πληρούνται οι στόχοι και τα κριτήρια ασφαλείας όπως καθορίζονται από τον σχεδιαστή της εγκατάστασης, τον οργανισμό λειτουργίας και τον ρυθμιστικό φορέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

1.1. Γενικά για την πυρηνική ενέργεια και τις αλήθειες γύρω από αυτή

Κάθε φορά που το ανθρώπινο είδος κατόρθωνε να νικήσει τη φύση, είχε την ευκαιρία να απολαύσει τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης νίκης. Παράλληλα, ωστόσο, τα ανθρώπινα όντα ερχόντουσαν αρκετές φορές αντιμέτωπα και με τις αρνητικές συνέπειες της εν λόγω νίκης (Δερβιτσιώτης, 2013).

Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα απρόβλεπτα αποτελέσματα που ακολουθούσαν τη νίκη του ανθρώπου έναντι της φύσης κατέδειξαν ότι οι νικηφόρες συνέπειες ήταν σε μεγάλο βαθμό αναξιόπιστες. Η αραίωση του στρώματος του όζοντος, το «ανώμαλο» φαινόμενο του θερμοκηπίου, η τεράστια καταστροφή των δασών και η αύξηση της στάθμης της θάλασσας αποδεικνύουν εμφανώς την αμφίβολης ποιότητας νίκη που κατάφερε το ανθρώπινο είδος πάνω στη φύση, αποσκοπώντας στην οικονομική ανάπτυξη, αλλά και το γεγονός ότι τα περιβαλλοντικά ζητήματα είναι παγκόσμιας εμβέλειας (Δερβιτσιώτης, 2013).

Το καθοριστικό στοιχείο, βέβαια, το οποίο δύναται να επιφέρει όχι μόνο την περιβαλλοντική καταστροφή, αλλά και την εξάλειψη του ανθρώπινου είδους είναι η αλόγιστη χρησιμοποίηση της πυρηνικής ενέργειας. Η πυρηνική ενέργεια αποτελεί σπουδαίο προνόμιο και παράλληλα συνιστά και σημαντικό εφιάλτη. Συνιστά προνόμιο, καθώς παρέχει ενέργεια για τη βιομηχανία, αλλά παράλληλα μπορεί να μετατραπεί σε εφιάλτη, διότι μπορεί να προκαλέσει συνεχή υπαρξιακή ανασφάλεια σε παγκόσμιο επίπεδο (Δερβιτσιώτης, 2013).

Πιο συγκεκριμένα, πυρηνική ενέργεια αποκαλείται η ενέργεια που απελευθερώνεται όταν μετασχηματίζονται ατομικοί πυρήνες. Η πυρηνική ενέργεια συνιστά στην πραγματικότητα ένα είδος δυναμικής ενέργειας, η οποία εγκλωβίζεται στους πυρήνες των ατόμων, η οποία αποδίδεται στην αλληλεπίδραση των σωματιδίων από τα οποία απαρτίζεται. Η διεργασία με την οποία απελευθερώνεται η πυρηνική ενέργεια αποκαλείται σχάση ή σύντηξη των πυρήνων. Στην περίπτωση κατά την οποία η διεργασία αυτή είναι ελεγχόμενη, η πυρηνική ενέργεια δύναται να αξιοποιηθεί για να καλύψει ενεργειακές απαιτήσεις.

Η τεχνολογία της πυρηνικής ενέργειας στηρίζεται στις θεωρητικές και πειραματικές έρευνες, που διενεργήθηκαν από σπουδαίους επιστήμονες προς τα τέλη του 19ου αιώνα και στις απαρχές του επόμενου αιώνα. Με τη διάσπαση των πυρήνων των ατόμων γίνεται η μετατροπή της ύλης σε μεγάλες ποσότητες ενέργειας και αυτό το γεγονός ώθησε τους επιστήμονες να θεωρήσουν ότι είχαν καταφέρει να λύσουν το ενεργειακό ζήτημα της ανθρωπότητας. Παράλληλα, σε άλλους πολύ λιγότερο κοινωνικούς κύκλους, διαπιστώθηκε ότι άνοιγαν καινούργιοι δρόμοι προς την κατασκευή ισχυρών οπλικών συστημάτων ή προς την επίτευξη σημαντικών οικονομικών κερδών.

Η υπόθεση, εν τέλει, δεν είχε την προσδοκώμενη εξέλιξη, αφού εγκαταστάσεις μετατροπής της πυρηνικής ενέργειας σε ηλεκτρικό ρεύμα θεωρήθηκαν αρκετά επικίνδυνες για το περιβάλλον και το ανθρώπινο είδος. Ακόμη, οι περιβαλλοντικές βλάβες που προκύπτουν σε περίπτωση ατυχημάτων από την παραγωγή και εκπομπή επικίνδυνων αποβλήτων δύναται να επιφέρουν αρνητικές συνέπειες στον πλανήτη και να θέσουν σε επικινδυνότητα τη συνέχιση της ύπαρξης ζωής σε αυτόν.

Η ιστορία έχει καταδείξει ότι ο κίνδυνος είναι τεράστιος, αφού δεν είναι λίγα τα πυρηνικά ατυχήματα που έχουν γίνει και αυτά είχαν ανυπολόγιστες συνέπειες για τις περιοχές, στις οποίες η ραδιενέργεια διοχετεύτηκε σε μεγάλο βαθμό και επέφερε αρκετά προβλήματα για πολλά έτη στους κατοίκους.

Αξίζει να αναφερθεί ότι υφίστανται αρκετές αλήθειες, αλλά και αρκετοί μύθοι για ζητήματα αναφορικά με την πυρηνική ενέργεια:

- Η πυρηνική ενέργεια είναι περιττή. Οι πιο θετικές προβλέψεις για την εξέλιξη της πυρηνικής ενέργειας θεωρούν ότι η πυρηνική ενέργεια θα φτάσει περίπου το 15% της ηλεκτροπαραγωγής έως το 2030 σε παγκόσμια βάση, όταν οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στις μέρες μας καλύπτουν κατά προσέγγιση το 18% της ηλεκτροπαραγωγής. Ακόμη και οι πιο συντηρητικές προβλέψεις για τις δυνατότητες της εξοικονόμησης ενέργειας εκτιμούν ότι είναι εφικτή η ελάττωση της κατανάλωσης ενέργειας σε διεθνές επίπεδο κατά 20%.
- Η πυρηνική ενέργεια δεν είναι ασφαλής. Η πυρηνική ενέργεια, όπως μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό, είναι αρκετά επικίνδυνη και σχετίζεται με σημαντικά ατυχήματα. Τα τελευταία 25 έτη μετά το πυρηνικό ατύχημα του Τσερνόμπιλ,

έχουν σημειωθεί σχεδόν οκτακόσια σημαντικά περιστατικά, που συνδέονται με διαρροή ραδιενέργειας από εργοστάσια σε όλον τον πλανήτη. Πέρα ωστόσο, από τα εν λόγω ατυχήματα δε πρέπει να λησμονείται ότι τα πυρηνικά απόβλητα, αλλά και τα πυρηνικά όπλα παραμένουν ραδιενεργά για αρκετά έτη και προκαλούν απρόβλεπτες και αρνητικές περιβαλλοντικές συνέπειες.

Καταξιωμένοι επιστήμονες, που υποστηρίζουν τη χρήση πυρηνικής ενέργειας, πιστεύουν ότι υφίστανται πολλές μέθοδοι ελάττωσης της τοξικότητας των καταλοίπων και απομάκρυνσης τους από τη βιόσφαιρα και ότι η ραδιενέργειά τους ελαττώνεται σε σημαντικό βαθμό με την παρέλευση των ετών. Θεωρούν ότι τα πυρηνικά κατάλοιπα δύναται να ανακυκλωθούν ή να ενταφιαστούν δίχως ανακύκλωση, προκειμένου να περιοριστεί σε μεγάλο βαθμό ο όγκος των καταλοίπων (Δερβιτσιώτης, 2013).

Από την άλλη μεριά, οι πολέμιοι της χρησιμοποίησης της πυρηνικής ενέργειας θεωρούν ότι καμία περιοχή έως σήμερα δεν έχει βρει ασφαλή μέθοδο και τόπο για να προβεί σε αποθήκευση των ραδιενεργών καταλοίπων. Σήμερα, καμία χώρα δεν έχει στην διάθεση της ασφαλείς χώρους εναπόθεσης των ραδιενεργών αποβλήτων. Το «θάψιμο» δε συνιστά λύση, διότι δε μπορεί να διασφαλιστεί ένα «θαμμένο» φορτίο για αρκετά χρόνια, όσο δηλαδή «επιβιώνουν» τα πυρηνικά απόβλητα.

Επιπρόσθετα, υφίστανται σημαντικοί κίνδυνοι από την ενδεχόμενη χρησιμοποίηση των πυρηνικών καταλοίπων που ανακυκλώνονται για τρομοκρατικές δράσεις με την αξιοποίηση του παραγόμενου πλουτωνίου. Κατά την άποψη του Κατσίκη (2016), τα πυρηνικά εργοστάσια απελευθερώνουν ραδιενέργεια (Κατσίκης, 2016).

Η ακτινοβολία που συνδέεται με μία πυρηνική διάσπαση είναι αρκετά ιονίζουσα και επιφέρει σημαντικές βλάβες σε κάθε μορφή ζωής. Συγκεκριμένα, δύναται να επιφέρει τον άμεσο θάνατο, τη βραχυχρόνια ή μακροχρόνια ανάπτυξη διαφόρων μορφών καρκίνου και να αλλοιώσει σημαντικά το γονότυπο των ζωντανών κυττάρων.

Επίσης, η διαχείριση των αποβλήτων είναι το σημαντικότερο έως σήμερα και άλυτο ζήτημα της πυρηνικής ενέργειας (Κατσίκης, 2016).

- Η πυρηνική ενέργεια δεν είναι καθαρή. Εκτός από την πιθανότητα να συμβεί ένα επικίνδυνο πυρηνικό ατύχημα, η ύπαρξη των παραπροϊόντων της επεξεργασίας

του ραδιενεργού υλικού θεωρείται αναπόφευκτη. Τα εν λόγω επικίνδυνα απόβλητα είναι τα λεγόμενα «πυρηνικά απόβλητα». Τα χρόνια της ζωής τους ποικίλλουν και εξαρτώνται από τα υλικά που χρησιμοποιούνται για κάθε πυρηνικό αντιδραστήρα και μπορεί να είναι κάποιες δεκαετίες έως και χιλιάδες έτη (Δεληγιάννη, 2013).

Συνεπώς, τα ραδιενεργά απόβλητα δύναται να επιφέρουν ρύπανση στην ατμόσφαιρα, στο έδαφος, στον υδροφόρο ορίζοντα και επομένως δεν είναι εφικτό να καταστούν πρακτικά προς χρήση, κατοίκηση και οικονομική αξιοποίηση για αρκετούς αιώνες (Δεληγιάννη, 2013).

Σε φυσιολογικές συνθήκες, τα πυρηνικά κατάλοιπα στην ουσία θάβονται στο έδαφος κάτω από αυστηρές προδιαγραφές και αυξημένο κόστος και παραμένουν εκεί στη συνέχεια, έως ότου να αναζητηθεί στο μέλλον ένας τρόπος εξουδετέρωσής τους. Ωστόσο, τα ενδεχόμενα ρύπανσης του περιβάλλοντος χώρου κατά την ταφή, δε είναι δυνατόν να αποκλειστούν (Δεληγιάννη, 2013).

- Η πυρηνική ενέργεια δεν είναι φθηνή. Η παραγωγή ενέργειας από πυρηνικά εργοστάσια, εκτιμάται ότι είναι σχετικά φθηνή και αποδοτική. Ωστόσο, αν ληφθούν υπόψιν και άλλοι παράγοντες, αρχίζουν να δημιουργούνται έντονες αμφιβολίες για το αν είναι τελικά «φθηνή» και αποτελεσματική (Δεληγιάννη, 2013).
- Αν υπολογιστεί το αρχικό κόστος κατασκευής, δανεισμού κεφαλαίων, λειτουργίας, διαχείρισης των αποβλήτων, αποσυναρμολόγησης και διασφάλισης του χώρου, η πυρηνική ενέργεια αποτελεί την πιο ακριβή μορφή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Μάλιστα, σε περίπτωση πυρηνικών ατυχημάτων, το κόστος είναι υπερβολικά μεγάλο. Δεν είναι τυχαίο φυσικά που καμία ασφαλιστική εταιρεία δε αναλαμβάνει να καλύψει τελείως το κόστος ενός ατυχήματος, αλλά μόνο ένα μέρος αυτού (Δεληγιάννη, 2013).

Ένα βασικό επιχείρημα του πυρηνικού λόμπι είναι ότι το κόστος παραγωγής της πυρηνικής κιλοβατώρας είναι μικρό και μικρότερο είναι το κόστος παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Φυσικά, εξαρτάται τι περιλαμβάνεται στο κόστος που μεταφέρεται στην πυρηνική κιλοβατώρα. Έτσι, δεν συνυπολογίζεται η διάλυση του παλιού αντιδραστήρα, καθώς και η διαχείριση της διάλυσης. Έπειτα από

τριάντα έτη περίπου κάθε αντιδραστήρας είναι αναγκαίο να διαλυθεί και να μετατραπεί σε απόβλητο (Κατσίκης, 2016).

Επίσης, τα ασφάλιστρα για τη μεταφορά του φορτίου είναι τεράστια. Το μεγαλύτερο ποσοστό του κόστους της πυρηνικής ηλεκτρικής ενέργειας αποδίδεται στα επιπρόσθετα μέτρα πρόληψης ενδεχόμενων κινδύνων, στη μείωση της πιθανότητας ατυχήματος και στην ετοιμότητα διαχείρισης των επιπτώσεων σε περίπτωση ατυχήματος. Στην τιμή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη το κόστος κατασκευής ενός πυρηνικού εργοστασίου που είναι αρκετά αυξημένο, σχεδόν δέκα δισεκατομμύρια δολάρια, ο χρόνος κατασκευής, το κόστος συντήρησης, η ασφαλής αντιμετώπιση των πυρηνικών αποβλήτων και τέλος η διάλυση του αντιδραστήρα.

Υπολογίζοντας όλα τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η παραγόμενη ενέργεια από πυρηνικά εργοστάσια είναι αρκετά ακριβή (Κατσίκης, 2016).

Επίσης, στο σύνολο της δαπάνης είναι απαραίτητο να συνυπολογιστεί το κόστος κατεδάφισης και εξαφάνισης των ραδιενεργών υλικών, εφόσον έπειτα από περίπου εξήντα έτη ένα εργοστάσιο έχει γίνει αρκετά ραδιενεργό, σε σημείο που θεωρείται αναγκαίο να διακοπεί η λειτουργία του, καθώς μεταβάλλεται και το ίδιο σε ραδιενεργό απόβλητο (Γαλδαδάς, 2009).

Η ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας, όπως συστήνει η Διεθνής Επιτροπή Ενέργειας, θα δεσμεύσει υπέρογκα χρηματικά ποσά, τα οποία θα υπήρχε η δυνατότητα να επενδυθούν σε ουσιαστικές και οικονομικές λύσεις, όπως είναι η εξοικονόμηση ενέργειας.

Ύστερα από πενήντα έτη και εκατοντάδες δισεκατομμύρια δολαρίων σε επιδοτήσεις, κανένας πυρηνικός σταθμός δεν είναι πια ανταγωνιστικός σε οικονομικό επίπεδο στο πλαίσιο της ελεύθερης αγοράς. Η παραγωγή πυρηνικής ενέργειας έχει δέκα φορές μεγαλύτερο κόστος από την ενέργεια που παράγεται από τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας ή την ενέργεια που εξοικονομείται.

- Η πυρηνική ενέργεια δεν παρέχει ενεργειακή ανεξαρτησία. Καμία από τις περιοχές που προτίμησαν με αυτό το επιχείρημα την αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας, κατά τη δεκαετία του 1970, δεν έχει διασφαλίσει στην ουσία ενεργειακή ασφάλεια. Δε θα μπορούσε να επιτευχθεί, εξάλλου, αφού τα τρία τέταρτα των διεθνών αποθεμάτων της πρώτης ύλης -του ουρανίου- είναι συγκεντρωμένα σε τέσσερις κυρίως χώρες (Κατσίκης, 2016).

Επίσης, η τεχνολογία των πυρηνικών έχει εξαπλωθεί σε ελάχιστες μόνο χώρες, όπως είναι η Γαλλία, οι ΗΠΑ, η Ρωσία και ο Καναδάς. Σαν συνέπεια αυτού, η χώρα που αποκομίζει πυρηνικό πρόγραμμα είναι εξαρτημένη για την παροχή τεχνογνωσίας, εξαρτημάτων και μεταχείρισης των πυρηνικών σταθμών από τις χώρες-κηδεμόνες. Το πρόβλημα εντείνεται από το πεπερασμένο των πρώτων υλών (Κατσίκης, 2016).

Τα αποθέματα ουρανίου αρχίζουν να εξαντλούνται και η κατοχή ή η χρησιμοποίησή τους ωθεί σε υπεραξία και σε μονοπωλιακές καταστάσεις. Όσο δειλεαστικό κι αν είναι το ενδεχόμενο μια μικρή ποσότητα ουρανίου να είναι σε θέση να φωταγωγει αρκετές πόλεις για ένα ολόκληρο έτος, η αλήθεια είναι ότι ακόμα και όλο το ουράνιο της γης να αξιοποιείται σε πυρηνικά εργοστάσια, δε θα έφτανε παρά μόνο για σαράντα έτη παραγωγής ενέργειας (Κατσίκης, 2016).

- Η πυρηνική ενέργεια συνεισφέρει στην υποβάθμιση των κοινωνιών σε τοπικό επίπεδο και στην παραβίαση των ανθρωπίνων δικαιωμάτων στις υποβαθμισμένες χώρες. Όπως συμβαίνει εξάλλου και με τον άνθρακα, καθώς και με άλλα σημαντικά ορυκτά και μέταλλα, η διεργασία εξόρυξης ουρανίου συνδέεται με άσχημες πρακτικές, περιβαλλοντική υποβάθμιση και παραβίαση των δικαιωμάτων των ανθρώπων στις φτωχές χώρες.
- Η πυρηνική ενέργεια δε συνεισφέρει στην αντιμετώπιση των αλλαγών σε κλιματικό επίπεδο, αλλά συνιστά σημαντικό εμπόδιο σε αυτήν. Η πυρηνική ενέργεια δεν είναι εφικτό να συμβάλλει αποδοτικά στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Αξιοποιείται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (σχεδόν το 16% της διεθνούς ηλεκτροπαραγωγής) και αντιστοιχεί σε λιγότερο από το 6% της διεθνούς κατανάλωσης ενέργειας. Η ηλεκτροπαραγωγή μόνη της οφείλεται σχεδόν για το 1/3 των ανθρωπογενών εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου.

Από την άλλη μεριά, η πυρηνική ενέργεια συνιστά εμπόδιο για την ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Αυτό ισχύει, όχι μόνο διότι οι σημαντικές επενδύσεις σε πυρηνικούς σταθμούς σπαταλούν σπουδαίους πόρους, που δύνανται να αξιοποιηθούν σε πολύ πιο αποδοτικές και ασφαλείς λύσεις, όπως είναι οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, καθώς και η εξοικονόμηση ενέργειας.

Εξίσου σπουδαίο είναι το γεγονός ότι τα πυρηνικά, όπως είναι και ο άνθρακας αποτελούν τεχνολογίες μη συμβατές με τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, δηλαδή δεν είναι εφικτό να συνυπάρξουν σε ένα ενεργειακό σύστημα.

Ένα σενάριο στο οποίο παρέχεται προτεραιότητα στη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, παράλληλα με την υιοθέτηση μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας και τη σταδιακή απόσυρση πυρηνικών και ανθρακικών μονάδων, ελαττώνει συνεχώς και αποδοτικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στα επίπεδα που συστήνει η επιστήμη, ενώ επιφέρει και αρκετές θέσεις απασχόλησης και αναπτυξιακές προοπτικές σε οικονομικό επίπεδο.

1.2 Το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας

Το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας κινείται με διαφορετικές ταχύτητες στις χώρες της Ευρώπης και σε όσες βρίσκονται Ανατολικά της Γηραιάς Ηπείρου. Το μάθημα της Φουκουσίμα ήταν για κάποιους να επανεξετάσουν τη σχέση τους με την πυρηνική ενέργεια. Χώρες, όπως η Γερμανία, η Ιταλία και η Ελβετία, προχώρησαν στην επανεκκίνηση του πυρηνικού τους προγράμματος, αποφασίζοντας τη σταδιακή κατάργηση όλης της πυρηνικής ισχύος ή την απαγόρευση της κατασκευής νέων πυρηνικών αντιδραστήρων (Ζευγίτης, 2016).

Στον αντίποδα βρίσκονται χώρες, όπως η Κίνα, η Ινδία και η Ρωσία, στις οποίες τρέχουν συνολικά πάνω από σαράντα υπό κατασκευή αντιδραστήρες και πάνω από τους διπλάσιους έχουν προγραμματιστεί να ξεκινήσουν στο εγγύς μέλλον. Οι τελευταίες στη βιασύνη τους, φαίνεται να μην έχουν κατανοήσει το βασικό δίδαγμα από τη Φουκουσίμα, τη σημαντικότητα δηλαδή ενός αυστηρού και συνολικού καθεστώτος ασφάλειας. Η πιο ανησυχητική περίπτωση είναι αυτή των χωρών με πυρηνικές φιλοδοξίες, όπως π.χ. το Βιετνάμ, το Ιράν και τελευταία η Βόρεια Κορέα. Αν και η κινητικότητα που παρατηρείται για τα πυρηνικά εντοπίζεται μάλλον μακριά, ωστόσο προφανώς και πρέπει να υπάρξει προβληματισμός στη διεθνή κοινότητα (Ζευγίτης, 2016).

Οι οικονομίες παγκοσμίως γίνονται όλο και πιο ενεργοβόρες. Τόσο οι ανεπτυγμένες, όσο και οι αναπτυσσόμενες χώρες, προκειμένου να τροφοδοτήσουν την οικονομική

τους ανάπτυξη, γίνονται όλο και πιο αχόρταγες ενεργειακά, καταναλώνοντας με φρενήρεις ρυθμούς ενεργειακούς πόρους. Βεβαίως, γίνεται όλο και ευρύτερα αποδεκτό πως το μέλλον ανήκει στις ΑΠΕ, που είναι ανεξάντλητες και σαφώς πιο καθαρές. Όμως, για αρκετές χώρες, η πυρηνική ενέργεια συνιστά μια αρκετά φθηνή λύση ενεργειακά (Δεληγιάννη, 2013).

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια σχετική στροφή προς την πυρηνική ενέργεια στις αναπτυσσόμενες -και ως εκ τούτου αρκετά «πεινασμένες»- οικονομίες. Συγκεκριμένα, Κίνα, Ινδία, Νότια Κορέα και Ρωσία, ζητούν όλο και περισσότερους πόρους για παραγωγή ενέργειας από πυρηνικά (Δεληγιάννη, 2013).

Ενδεικτικά, μπορεί να αναφερθεί η Γαλλία, ως η δεύτερη μεγαλύτερη οικονομία της Ευρώπης, η οποία καλύπτει το 75% των ενεργειακών της αναγκών με χρήση πυρηνικής ενέργειας, τόσο για την κατανάλωση των νοικοκυριών, όσο και της βιομηχανίας. Οι ΗΠΑ, η Γαλλία, η Ιαπωνία, η Ρωσία, η Νότια Κορέα, η Ουκρανία, η Γερμανία, ο Καναδάς, η Κίνα και η Ινδία, είναι κατά σειρά οι χώρες του κόσμου με τη μεγαλύτερη πυρηνική ισχύ, για ειρηνικούς σκοπούς. Το πιο βασικό υλικό, που χρησιμοποιούν οι πυρηνικές μονάδες παγκοσμίως, είναι το ουράνιο (Δεληγιάννη, 2013).

Το όραμα μιας καθαρής ενέργειας, η οποία θα ήταν η πυρηνική, ανήκει οριστικά στο παρελθόν. Από το 1956 μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1970 λειτουργούσαν στη σημερινή Ευρωπαϊκή Ένωση και την Ελβετία συνολικά ογδόντα επτά πυρηνικά εργοστάσια. Τη δεκαετία του 1980, η πυρηνική βιομηχανία έφτασε στο απόγειο και εκατό δύο νέοι πυρηνικοί αντιδραστήρες ξεκίνησαν να λειτουργούν. Η πυρηνική καταστροφή, όμως, στο Τσερνόμπιλ έβαλε φρένο. Τα περισσότερα σχέδια για επέκταση των πυρηνικών εργοστασίων ματαιώθηκαν. Μετά το 1990 κατασκευάστηκαν μόλις δεκαπέντε πυρηνικά εργοστάσια, ενώ πενήντα τέσσερις πυρηνικοί αντιδραστήρες έκλεισαν. Τα πυρηνικά εργοστάσια στην Ευρώπη είναι, εν τω μεταξύ, πολύ παλιά και ο φόβος δυστυχημάτων διαρκώς αυξάνεται (Ρύτερ & Ρηγούτσου, 2016).

Επιπλέον, η συντήρηση των παλαιών αντιδραστήρων αποδεικνύεται πολύ ακριβή. Γύρω στα τετρακόσια με πεντακόσια εκατομμύρια ευρώ υπολογίζεται το κόστος της δαπάνης συντήρησης ενός πυρηνικού εργοστασίου που παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η ακριβή συντήρησή τους, αλλά και οι κίνδυνοι που σχετίζονται, για παράδειγμα, με

δυστυχήματα ή τρομοκρατικές επιθέσεις τα καθιστούν πλέον μη ελκυστικά. Οι φωνές πολιτικών και πρωτοβουλιών πολιτών που ζητούν την κατάργηση της πυρηνικής ενέργειας πυκνώνουν και κάποιες φορές, μάλιστα, οι κυβερνήσεις καταφεύγουν ακόμη και σε νομικά μέσα για να προστατευθούν από τον κίνδυνο της πυρηνικής ενέργειας γειτονικών χωρών (Ρύτερ & Ρηγούτσου, 2016).

Το παγκόσμιο οικολογικό κίνημα είναι απόλυτα αντίθετο προς την παραγωγή ενέργειας από πυρηνικούς σταθμούς, θεωρώντας ότι η πλήρης εξάλειψη τέτοιων εγκαταστάσεων από τον πλανήτη αποτελεί μια από τις βασικές προϋποθέσεις για τη συνέχιση της ζωής και τη μεταστροφή σε μια δίκαιη, ισόρροπη και αειφόρο οικονομική και κοινωνική δραστηριότητα του ανθρώπινου είδους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ

2.1. Το ατύχημα του Chernobyl

Η καταστροφή του Απριλίου 1986 στο πυρηνικό εργοστάσιο του Τσερνόμπιλ στην Ουκρανία ήταν το προϊόν ενός ελαττωματικού σχεδιασμού του σοβιετικού αντιδραστήρα σε συνδυασμό με σοβαρά λάθη που έγιναν από τους διαχειριστές του εργοστασίου. Ήταν μια άμεση συνέπεια της απομόνωσης του Ψυχρού Πολέμου και της επακόλουθης έλλειψης οποιασδήποτε κουλτούρας ασφάλειας (IAE, 2014).

Το συγκρότημα ηλεκτρισμού του Τσερνόμπιλ, που βρίσκεται περίπου 130 χλμ. βόρεια του Κιέβου, στην Ουκρανία, και περίπου 20 χλμ νότια των συνόρων με τη Λευκορωσία, αποτελούνταν από τέσσερις πυρηνικούς αντιδραστήρες του σχεδίου RBMK-1000. Οι μονάδες 1 και 2 κατασκευάστηκαν μεταξύ του 1970 και του 1977, ενώ οι μονάδες 3 και 4 του ίδιου σχεδιασμού ολοκληρώθηκαν το 1983. Δύο ακόμη αντιδραστήρες RBMK ήταν υπό κατασκευή, στο σημείο, τη στιγμή του ατυχήματος. Στα νοτιοανατολικά του εργοστασίου, μια τεχνητή λίμνη περίπου 22 τετραγωνικών χιλιομέτρων, που βρίσκεται δίπλα στον ποταμό Pripyat, παραπόταμο του Dniepr, κατασκευάστηκε για να παρέχει νερό ψύξης στους αντιδραστήρες (Burgherr, et al 2008).

Αυτή η περιοχή της Ουκρανίας περιγράφεται ως δάσος του Λευκορωσικού τύπου με χαμηλή πυκνότητα πληθυσμού. Περίπου 3 χιλιόμετρα μακριά από τον αντιδραστήρα, στο Pripyat, υπήρχαν 49.000 κάτοικοι. Η παλιά πόλη του Τσερνόμπιλ, η οποία είχε πληθυσμό 12.500 κατοίκων, βρίσκεται περίπου 15 χιλιόμετρα νοτιοανατολικά του συγκροτήματος. Σε ακτίνα 30 χιλιομέτρων από το εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας, ο συνολικός πληθυσμός ήταν μεταξύ 115.000 και 135.000 τη στιγμή του ατυχήματος (Black, et al 2011).

Ο RBMK-1000 είναι ένας, σοβιετικής σχεδίασης και κατασκευής, αντιδραστήρας τύπου σωλήνα με μέτρια πίεση γραφίτη, που χρησιμοποιεί ελαφρώς εμπλουτισμένο (2% U-235) καύσιμο διοξειδίου του ουρανίου. Είναι ένας αντιδραστήρας ελαφρού νερού που βράζει, με δύο βρόχους που τροφοδοτούν με ατμό απευθείας τις τουρμπίνες, χωρίς να παρεμβάλλεται εναλλακτής θερμότητας. Το νερό που αντλείται

στο κάτω μέρος των καναλιών καυσίμου βράζει καθώς προχωρά στους σωλήνες πίεσης, παράγοντας ατμό που τροφοδοτεί δύο στρόβιλους 500 MWe. Το νερό λειτουργεί ως ψυκτικό υγρό και παρέχει επίσης τον ατμό που χρησιμοποιείται για την κίνηση των στρόβιλων. Οι σωλήνες κάθετης πίεσης περιέχουν το καύσιμο διοξειδίου του ουρανίου με επένδυση από κράμα ζirkονίου γύρω από το οποίο ρέει το νερό ψύξης. Οι προεκτάσεις των καναλιών καυσίμου διαπερνούν την κάτω πλάκα και την πλάκα κάλυψης του πυρήνα και συναντιούνται σε μια. Ένα ειδικά σχεδιασμένο μηχανήμα ανεφοδιασμού επιτρέπει την αλλαγή των δεσμίδων καυσίμου χωρίς να σβήσει ο αντιδραστήρας (OECD, 2015).

Ο συντονιστής, η λειτουργία του οποίου είναι να επιβραδύνει τα νετρόνια για να τα κάνει πιο αποτελεσματικά στην παραγωγή σχάσης στο καύσιμο, είναι ο γραφίτης, που περιβάλλει τους σωλήνες πίεσης. Ένα μείγμα αζώτου και ηλίου κυκλοφορεί μεταξύ των μπλοκ γραφίτη για να αποτρέψει την οξείδωση του γραφίτη και να βελτιώσει τη μετάδοση της θερμότητας που παράγεται από τις αλληλεπιδράσεις νετρονίων στον γραφίτη στο κανάλι καυσίμου. Ο ίδιος ο πυρήνας έχει ύψος περίπου 7 μέτρα και διάμετρο περίπου 12 μέτρα. Σε καθέναν από τους δύο βρόχους, υπάρχουν τέσσερις κύριες αντλίες κυκλοφορίας ψυκτικού, η μία από τις οποίες είναι πάντα σε αναμονή. Η αντιδραστικότητα ή η ισχύς του αντιδραστήρα ελέγχεται ανυψώνοντας ή κατεβάζοντας 211 ράβδους ελέγχου, οι οποίες, όταν χαμηλωθούν στον συντονιστή, απορροφούν νετρόνια και μειώνουν τον ρυθμό σχάσης. Η ισχύς εξόδου αυτού του αντιδραστήρα είναι 3200 MW θερμική ή 1000 MWe (Johnson & Thomas, 2006).

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του αντιδραστήρα RBMK είναι ότι μπορεί να διαθέτει «θετικό συντελεστή κενού», όπου η αύξηση των φυσαλίδων ατμού («κενά») συνοδεύεται από αύξηση της αντιδραστικότητας του πυρήνα. Καθώς η παραγωγή ατμού στα κανάλια καυσίμου αυξάνεται, τα νετρόνια που θα είχαν απορροφηθεί από το πυκνότερο νερό παράγουν τώρα αυξημένη σχάση στο καύσιμο (IAEA, 1992).

Υπάρχουν και άλλα στοιχεία που συμβάλλουν στον συνολικό συντελεστή ισχύος αντιδραστικότητας, αλλά ο συντελεστής κενού είναι ο κυρίαρχος στους αντιδραστήρες RBMK. Ωστόσο, τη στιγμή του ατυχήματος στο Τσερνόμπιλ, η καύση καυσίμου του αντιδραστήρα, η διαμόρφωση της ράβδου ελέγχου και το επίπεδο ισχύος οδήγησαν σε έναν θετικό συντελεστή κενού αρκετά μεγάλο ώστε να υπερνικήσει όλες τις άλλες επιρροές στον συντελεστή ισχύος (IAEA, 1992).

2.1.1. Το ατύχημα του Τσερνόμπιλ το 1986

Στις 25 Απριλίου, πριν από την προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας, το πλήρωμα του αντιδραστήρα στο Τσερνόμπιλ άρχισε να προετοιμάζεται για μια δοκιμή για να προσδιορίσει πόσο καιρό οι τουρμπίνες θα περιστρέφονταν και θα τροφοδοτούσαν με ισχύ τις κύριες αντλίες κυκλοφορίας μετά από απώλεια της κύριας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η δοκιμή είχε πραγματοποιηθεί στο Τσερνόμπιλ το προηγούμενο έτος, αλλά η ισχύς από τον στρόβιλο έπεσε πολύ γρήγορα, έτσι έπρεπε να δοκιμαστούν νέα σχέδια ρυθμιστή τάσης (John Wiley & Sons , 2016).

Μια σειρά ενεργειών χειριστή, συμπεριλαμβανομένης της απενεργοποίησης των μηχανισμών αυτόματης απενεργοποίησης, προηγήθηκαν της απόπειρας δοκιμής στις αρχές της 26ης Απριλίου. Μέχρι τη στιγμή που ο χειριστής κινήθηκε για να κλείσει τον αντιδραστήρα, ο αντιδραστήρας ήταν σε εξαιρετικά ασταθή κατάσταση. Μια ιδιαιτερότητα του σχεδιασμού των ράβδων ελέγχου προκάλεσε μια δραματική αύξηση της ισχύος καθώς εισήχθησαν στον αντιδραστήρα (John Wiley & Sons , 2016).

Συνεπώς, η αλληλεπίδραση του πολύ ζεστού καυσίμου με το νερό ψύξης οδήγησε σε κατακερματισμό του καυσίμου μαζί με ταχεία παραγωγή ατμού και αύξηση της πίεσης. Τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του αντιδραστήρα ήταν τέτοια που η ουσιαστική ζημιά ακόμη και σε τρία ή τέσσερα συγκροτήματα καυσίμου θα οδηγούσε – και συνέβη – στην καταστροφή του αντιδραστήρα (John Wiley & Sons , 2016).

Επίσης, η υπερπίεση προκάλεσε την μερική αποκόλληση της πλάκας κάλυψης 1000t του αντιδραστήρα, σπάζοντας τα κανάλια καυσίμου και μπλοκάροντας όλες τις ράβδους ελέγχου, οι οποίες μέχρι εκείνη τη στιγμή ήταν μόνο στα μισά της διαδρομής. Η έντονη παραγωγή ατμού εξαπλώθηκε, στη συνέχεια, σε ολόκληρο τον πυρήνα (που τροφοδοτούνταν από νερό που χύνονταν στον πυρήνα λόγω της ρήξης του κυκλώματος ψύξης έκτακτης ανάγκης) προκαλώντας έκρηξη ατμού και απελευθερώνοντας προϊόντα σχάσης στην ατμόσφαιρα. Περίπου δύο με τρία δευτερόλεπτα αργότερα, μια δεύτερη έκρηξη πέταξε θραύσματα από τα κανάλια καυσίμου και καυτό γραφίτη (John Wiley & Sons , 2016).

Δύο εργάτες έχασαν τη ζωή τους, ως αποτέλεσμα αυτών των εκρήξεων. Ο γραφίτης (περίπου το ένα τέταρτο των 1200 τόνων του υπολογίστηκε ότι είχε εκτοξευθεί) και τα καύσιμα πυρακτώθηκαν και προκάλεσαν πολλές πυρκαγιές, προκαλώντας την κύρια απελευθέρωση ραδιενέργειας στο περιβάλλον. Συνολικά απελευθερώθηκαν περίπου 14 EBq (14×10^{18} Bq) ραδιενέργειας, πάνω από τα μισά από τα οποία προέρχονταν από βιολογικά αδρανή ευγενή αέρια (McCall & Chris, 2016).

Επιπλέον, αναφέρεται ο αριθμός 5,2 EBq, ο οποίος είναι "ισοδύναμο ιωδίου-131" - 1,8 EBq ιώδιο και 85 PBq Cs-137 πολλαπλασιασμένο επί 40 λόγω της μακροζωίας του, και αγνοώντας τα 6,5 EBq xenon-33 και μερικά μικρά ή μικρής διάρκειας νουκλεΐδια (McCall & Chris, 2016).

Περίπου 200-300 τόνοι νερού την ώρα εγχύονταν στο άθικτο μισό του αντιδραστήρα χρησιμοποιώντας τις βοηθητικές αντλίες τροφοδοτικού νερού, αλλά αυτό σταμάτησε μετά από μισή ημέρα λόγω του κινδύνου να εισρεύσει και να πλημμυρίσει τις μονάδες 1 και 2. Από τη δεύτερη έως δέκατη μέρα μετά το ατύχημα, περίπου 5000 τόνοι βορίου, δολομίτη, άμμου, αργίλου και μολύβδου έπεσαν στον φλεγόμενο πυρήνα με ελικόπτερο σε μια προσπάθεια να σβήσουν τη φωτιά και να περιορίσουν την απελευθέρωση ραδιενεργών σωματιδίων (McCall & Chris, 2016).

Η κατάσταση αυτή αποδείχθηκε ιδιαίτερα επικίνδυνη, καθώς ο συνδυασμός των καυσίμων και των υλικών του πυρηνικού εργοστασίου δημιούργησαν ένα εξαιρετικό ραδιενεργό μείγμα, που ως αποτέλεσμα θα είχε μία σειρά από θερμικές εκρήξεις, οι οποίες θα είχαν ακόμα μεγαλύτερες συνέπειες από την έκρηξη του αντιδραστήρα μέσω της εκτίναξης ραδιενεργού υλικού στην ατμόσφαιρα. Σε μία προσπάθεια αποφυγής αυτού του κινδύνου, στάλθηκαν τρεις ιθύνοντες προκειμένου να ανοίξουν τις βαλβίδες νερού, ώστε να απομακρυνθεί από τη δεξαμενή το ραδιενεργό νερό.

Στην έκτακτη συνεδρίαση που πραγματοποιήθηκε στη Βιέννη τον Αύγουστο του 1986, οι εκπρόσωποι της Σοβιετικής Ένωσης παραδέχτηκαν πως ο πυρηνικός αντιδραστήρας δεν λειτουργούσε με βάση το πρωτόκολλο που ίσχυε. Παρόλο που αποδέχτηκαν τις ευθύνες που τους αναλογούσαν, δεν αποδέχτηκαν τις νομικές υποχρεώσεις που προέκυψαν προς του πολίτες και τα κράτη που επηρεάστηκαν άμεσα από την έκρηξη του πυρηνικού αντιδραστήρα. Οι θέσεις τους βασίστηκαν στην έλλειψη σοβαρών επιπτώσεων από τα προηγούμενα πυρηνικά ατυχήματα που είχαν συμβεί. (J. Barron, 1987)



Εικόνα 1. Απεικόνιση του New Safe Confinement (NSC) με τη μονάδα 4 του Τσερνόμπιλ πίσω του. Η δομή των 36.000 τόνων ωθήθηκε 327 μέτρα σε σιδηροτροχιές στη θέση του πάνω από το κτίριο του αντιδραστήρα τον Νοέμβριο του 2016. (Ευρωπαϊκή Τράπεζα Ανασυγκρότησης και Ανάπτυξης)



Εικόνα 2. Απεικόνιση του πυρηνικού αντιδραστήρα μετά την έκρηξη το 1986. 30 άνθρωποι έχασαν εκείνη τη μέρα τη ζωή τους, ενώ χιλιάδες ακόμα εκτέθηκαν στη ραδιενέργεια που απελευθερώθηκε στην ατμόσφαιρα.

2.1.2. Άμεσες επιπτώσεις του ατυχήματος του Τσερνόμπιλ

Το ατύχημα προκάλεσε τη μεγαλύτερη ανεξέλεγκτη έκλυση ραδιενέργειας στο περιβάλλον που έχει καταγραφεί ποτέ για οποιαδήποτε μη στρατιωτική επιχείρηση και μεγάλες ποσότητες ραδιενεργών ουσιών απελευθερώθηκαν στον αέρα για περίπου 10 ημέρες. Αυτό προκάλεσε σοβαρή κοινωνική και οικονομική αναστάτωση σε μεγάλους πληθυσμούς στη Λευκορωσία, τη Ρωσία και την Ουκρανία. Δύο ραδιονουκλίδια, το βραχύβιο ιώδιο-131 και το μακρόβιο καίσιο-137, ήταν ιδιαίτερα σημαντικά για τη δόση ακτινοβολίας που παρείχαν στην κοινότητα (Steadman & Philip, 1990).

Υπολογίζεται ότι όλο το αέριο ξέnon, περίπου το μισό ιώδιο και καίσιο και τουλάχιστον το 5% του εναπομείναντος ραδιενεργού υλικού στον πυρήνα του αντιδραστήρα του Τσερνόμπιλ 4 (ο οποίος είχε 192 τόνους καυσίμου) απελευθερώθηκε στο ατύχημα. Το μεγαλύτερο μέρος του υλικού που απελευθερώθηκε αποτέθηκε κοντά ως σκόνη και συντρίμμια, αλλά το ελαφρύτερο υλικό μεταφέρθηκε από τον άνεμο πάνω από την Ουκρανία, τη Λευκορωσία, τη Ρωσία και σε κάποιο βαθμό τη Σκανδιναβία και την Ευρώπη (Steadman & Philip, 1990).

Στα θύματα περιλαμβάνονται πυροσβέστες που παρευρέθηκαν στις πρώτες πυρκαγιές στην οροφή του κτιρίου του στροβίλου. Όλες οι εστίες φωτιάς σβήστηκαν μέσα σε λίγες ώρες, αλλά οι δόσεις ραδιενέργειας την πρώτη ημέρα προκάλεσαν 28 θανάτους - έξι από τους οποίους αφορούσαν πυροσβέστες - μέχρι τα τέλη Ιουλίου 1986 (Kyiv Post, 2010).

Οι δόσεις που έλαβαν οι πυροσβέστες και οι εργαζόμενοι στο εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας ήταν αρκετά υψηλές ώστε να οδηγήσουν σε σύνδρομο οξείας ακτινοβολίας (ARS), το οποίο για να εμφανιστεί πρέπει ένα άτομο να εκτεθεί σε περισσότερα από 700 χιλιοστόγραμμα (mGy) μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα (συνήθως λεπτά) (Διεύθυνση Ενέργειας των ΗΠΑ, 1996).

Τα κοινά συμπτώματα ARS περιλαμβάνουν γαστρεντερικά προβλήματα (ναυτία και εμετός), πονοκεφάλους, εγκαύματα και πυρετό. Δόσεις μεταξύ 4000 mGy και 5000 mGy σε σύντομο χρονικό διάστημα θα σκότωναν το 50% όσων εκτέθηκαν, με 8000-10.000 mGy να είναι παγκοσμίως θανατηφόρα. Οι δόσεις που έλαβαν οι πυροσβέστες

που πέθαναν εκτιμάται ότι κυμαίνονταν έως και 20.000 mGy (Διεύθυνση Ενέργειας των ΗΠΑ ,1996).

Η επόμενη εργασία ήταν ο καθαρισμός της τοποθεσίας από ραδιενέργεια, έτσι ώστε οι υπόλοιποι τρεις αντιδραστήρες να μπορέσουν να επανεκκινηθούν και ο κατεστραμμένος αντιδραστήρας να προστατευτεί μόνιμα. Περίπου 200.000 άνθρωποι («εκαθαριστές») από όλη τη Σοβιετική Ένωση συμμετείχαν στην ανάκτηση και τον καθαρισμό κατά τη διάρκεια του 1986 και του 1987 (Ρυθμιστική Επιτροπή Πυρηνικών Ηνωμένων Πολιτειών, 2010). Έλαβαν υψηλές δόσεις ακτινοβολίας, κατά μέσο όρο περίπου 100 millisieverts (mSv). Περίπου 20.000 καθαριστές έλαβαν περίπου 250 mSv, ενώ μερικοί έλαβαν περίπου 500 mSv (UNSCEAR, 2007).

Αργότερα, ο αριθμός των καθαριστών αυξήθηκε σε πάνω από 600.000, αλλά οι περισσότεροι από αυτούς έλαβαν μόνο χαμηλές δόσεις ακτινοβολίας. Οι υψηλότερες δόσεις ελήφθησαν από περίπου 1000 εργαζόμενους έκτακτης ανάγκης και επιτόπιο προσωπικό κατά τη διάρκεια της πρώτης ημέρας του ατυχήματος (Ragheb,2010).

Σύμφωνα με την πιο ενημερωμένη εκτίμηση που παρέχεται από την Επιστημονική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για τις Επιδράσεις της Ατομικής Ακτινοβολίας (UNSCEAR) , η μέση δόση ακτινοβολίας λόγω του ατυχήματος που έλαβαν οι κάτοικοι των περιοχών «αυστηρού ελέγχου ακτινοβολίας» (πληθυσμός 216.000), τα έτη 1986 έως 2005, ήταν 31 mSv (κατά την περίοδο των 20 ετών) και στις «μολυσμένες» περιοχές (πληθυσμός 6,4 εκατομμύρια) ήταν κατά μέσο όρο 9 mSv, μια μικρή αύξηση σε σχέση με τη δόση λόγω της ακτινοβολίας περιβάλλοντος κατά την ίδια περίοδο (περίπου 50 mSv) (UNSCEAR , 2007) .

Η αρχική έκθεση σε ακτινοβολία σε μολυσμένες περιοχές οφειλόταν στο βραχύβιο ιώδιο-131. Αργότερα το καίσιο-137 ήταν ο κύριος κίνδυνος. Αξίζει να αναφερθεί ότι και τα δύο είναι προϊόντα σχάσης διασκορπισμένα από τον πυρήνα του αντιδραστήρα, με ημιζωές 8 ημέρες και 30 χρόνια, αντίστοιχα και απελευθερώθηκαν 1,8 EBq του I-131 και 0,085 EBq του Cs-137 (UNSCEAR , 2007).

Περίπου πέντε εκατομμύρια άνθρωποι ζούσαν σε περιοχές της Λευκορωσίας, Η Ρωσία και η Ουκρανία μολύνθηκαν (πάνω από 37 kBq/m² Cs-137 στο έδαφος) και περίπου 400.000 ζούσαν σε πιο μολυσμένες περιοχές αυστηρού ελέγχου από τις αρχές (πάνω από 555 kBq/m² Cs-137). Συνολικά 29.400 km² μολύνθηκαν με πάνω από 180 kBq/m² (UNSCEAR , 2007).

Η πόλη Pripyat εκκενώθηκε στις 27 Απριλίου (45.000 κάτοικοι). Μέχρι τις 14 Μαΐου, περίπου 116.000 άνθρωποι που ζούσαν σε ακτίνα 30 χιλιομέτρων εκκένωσαν την περιοχή και μετεγκαταστάθηκαν εκεί αργότερα. Περίπου 1000 από αυτούς επέστρεψαν ανεπίσημα για να ζήσουν στη μολυσμένη ζώνη. Οι περισσότεροι από αυτούς που έφυγαν από την περιοχή έλαβαν δόσεις ακτινοβολίας μικρότερες από 50 mSv, αν και λίγοι έλαβαν 100 mSv ή περισσότερες (BBC,2020) .

Στα χρόνια που ακολούθησαν το ατύχημα, άλλα 220.000 άτομα επανεγκαταστάθηκαν σε λιγότερο μολυσμένες περιοχές και η αρχική ζώνη αποκλεισμού ακτίνας 30 km (2800 km²) τροποποιήθηκε και επεκτάθηκε για να καλύψει 4300 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Αυτή η επανεγκατάσταση οφειλόταν στην εφαρμογή ενός κριτηρίου της προβλεπόμενης δόσης ακτινοβολίας 350 mSv, αν και στην πραγματικότητα η ακτινοβολία στο μεγαλύτερο μέρος της πληγείσας περιοχής (εκτός από μισό τετραγωνικό χιλιόμετρο κοντά στον αντιδραστήρα) μειώθηκε γρήγορα, έτσι ώστε οι μέσες δόσεις ήταν μικρότερες του 50% του κανονικού υποβάθρου 2,5 mSv/έτος (BBC,2020).

Η έκθεση του 1991 της Κρατικής Επιτροπής για την Εποπτεία της Ασφάλειας στη Βιομηχανία και την Πυρηνική Ενέργεια σχετικά με τη βασική αιτία του ατυχήματος έβλεπε λάθη πέρα από τις ενέργειες του χειριστή (Medvedev & Zhores ,1990).

Έγινε αναφορά στο ότι, ενώ ήταν σίγουρα αλήθεια ότι οι φορείς εκμετάλλευσης τοποθέτησαν τον αντιδραστήρα τους σε επικίνδυνα ασταθή κατάσταση (στην πραγματικότητα σε μια κατάσταση που ουσιαστικά εγγυόταν ένα ατύχημα), ήταν επίσης αλήθεια ότι με αυτόν τον τρόπο δεν είχαν παραβιάσει ορισμένες βασικές πολιτικές λειτουργίας και αρχές, αφού δεν είχαν διατυπωθεί τέτοιες πολιτικές και αρχές (Karpan, 2006).

Επιπλέον, ο φορέας λειτουργίας δεν είχε ενημερωθεί ούτε για τη συγκεκριμένη ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια διατήρηση ενός ελάχιστου περιθωρίου αντιδραστικότητας της λειτουργίας, ούτε για τα γενικά χαρακτηριστικά αντιδραστικότητας του RBMK που καθιστούσαν τη λειτουργία χαμηλής ισχύος εξαιρετικά επικίνδυνη (Karpan, 2006).

2.1.3. Μακροχρόνιες Επιπτώσεις του ατυχήματος του Τσερνόμπιλ σε περιβάλλον και ανθρώπινες ζωές

Αρκετοί οργανισμοί έχουν αναφερθεί στις επιπτώσεις του ατυχήματος του Τσερνόμπιλ, αλλά όλοι είχαν προβλήματα στην αξιολόγηση της σημασίας των παρατηρήσεών τους λόγω της έλλειψης αξιόπιστων πληροφοριών για τη δημόσια υγεία πριν από το 1986 (Perlow,2006).

Το 1989, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) εξέφρασε για πρώτη φορά ανησυχίες ότι οι τοπικοί ιατροί και επιστήμονες είχαν αποδώσει λανθασμένα διάφορες βιολογικές επιπτώσεις στην υγεία στην έκθεση στην ακτινοβολία γ (Perlow,2006). Κατόπιν αυτού, η κυβέρνηση της ΕΣΣΔ ζήτησε από τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ) να συντονίσει μια αξιολόγηση διεθνών εμπειρογνομώνων για τις ραδιολογικές, περιβαλλοντικές και υγειονομικές συνέπειες του ατυχήματος σε επιλεγμένες πόλεις από τις πιο βαριά μολυσμένες περιοχές στη Λευκορωσία, τη Ρωσία και την Ουκρανία (BBC,2020).

Μεταξύ Μαρτίου 1990 και Ιουνίου 1991, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 50 επιτόπιες αποστολές από 200 ειδικούς από 25 χώρες (συμπεριλαμβανομένης της ΕΣΣΔ), επτά οργανισμούς και 11 εργαστήρια. Ελλείψει δεδομένων πριν από το 1986, συνέκρινε έναν πληθυσμό ελέγχου με εκείνους που εκτέθηκαν σε ακτινοβολία. Σημαντικές διαταραχές υγείας ήταν εμφανείς τόσο στις ομάδες ελέγχου όσο και στις εκτεθειμένες ομάδες, αλλά, σε αυτό το στάδιο, καμία δεν σχετιζόταν με την ακτινοβολία (BBC,2020).

Τον Φεβρουάριο του 2003, ο ΔΟΑΕ ίδρυσε το Φόρουμ του Τσερνόμπιλ, σε συνεργασία με επτά άλλους οργανισμούς του ΟΗΕ καθώς και με τις αρμόδιες αρχές της Λευκορωσίας, της Ρωσικής Ομοσπονδίας και της Ουκρανίας. Τον Απρίλιο του 2005, οι εκθέσεις που εκπονήθηκαν από δύο ομάδες εμπειρογνομώνων, συζητήθηκαν εντατικά από το Φόρουμ και τελικά εγκρίθηκαν με συναίνεση. Τα συμπεράσματα αυτής της μελέτης του Φόρουμ του Τσερνόμπιλ του 2005 (αναθεωρημένη έκδοση που δημοσιεύτηκε το 2006) είναι σύμφωνες με προηγούμενες μελέτες εμπειρογνομώνων, ιδίως την έκθεση UNSCEAR 2000 (Mettler & Fred A , 2018).

Αποτελεί κρίσιμο να επισημανθεί ότι δεν υπάρχουν επιστημονικά στοιχεία για αυξήσεις στη συνολική επίπτωση ή θνησιμότητα από καρκίνο ή σε μη κακοήθεις

διαταραχές που θα μπορούσαν να σχετίζονται με την έκθεση στην ακτινοβολία. Υπάρχουν ελάχιστα στοιχεία για αύξηση της λευχαιμίας, ακόμη και μεταξύ των εργαζομένων στην καθαριότητα όπου θα μπορούσε να είναι περισσότερο αναμενόμενο. Η λευχαιμία που προκαλείται από ακτινοβολία έχει μια λανθάνουσα περίοδο 5-7 ετών, επομένως τυχόν πιθανές περιπτώσεις λευχαιμίας λόγω του ατύχηματος θα είχαν ήδη αναπτυχθεί (Mettler & Fred A , 2018).

Επιπρόσθετα, ένας μικρός αριθμός εργαζομένων στην καθαριότητα, που έλαβαν τις υψηλότερες δόσεις, μπορεί να έχουν ελαφρώς αυξημένο κίνδυνο ανάπτυξης συμπαγών καρκίνων μακροπρόθεσμα. Μέχρι σήμερα, ωστόσο, δεν υπάρχουν στοιχεία για την ανάπτυξη τέτοιων καρκίνων (Mettler & Fred A , 2018).

Η έκθεση του Φόρουμ του Τσερνόμπιλ αναφέρει επίσης ότι οι άνθρωποι στην περιοχή έχουν υποστεί μια παραλυτική μοιρολατρία λόγω μύθων και εσφαλμένων αντιλήψεων σχετικά με την απειλή της ακτινοβολίας, η οποία έχει συμβάλει σε μια κουλτούρα χρόνιας εξάρτησης. Κάποιοι «ανέλαβαν το ρόλο των αναπήρων». Η ψυχική υγεία σε συνδυασμό με το κάπνισμα και την κατάχρηση αλκοόλ είναι ένα πολύ μεγαλύτερο πρόβλημα από την ακτινοβολία, αλλά το χειρότερο από όλα εκείνη την εποχή ήταν το υποκείμενο επίπεδο υγείας και διατροφής (Smith & Jim,2007).

Εκτός από τις αρχικές 116.000 μετακινήσεις, οι μετακινήσεις ανθρώπων ήταν πολύ τραυματικές και ελάχιστα συνέβαλαν στη μείωση της έκθεσης στην ακτινοβολία, η οποία ούτως ή άλλως ήταν χαμηλή. Οι ψυχοκοινωνικές επιπτώσεις μεταξύ εκείνων που επλήγησαν από το ατύχημα είναι παρόμοιες με εκείνες που προκύπτουν από άλλες μεγάλες καταστροφές όπως σεισμοί, πλημμύρες και πυρκαγιές (Nagataki& Shigenobu ,2010).

Ένα ιδιαίτερα θλιβερό αποτέλεσμα των λανθασμένων αντιλήψεων γύρω από το ατύχημα ήταν ότι ορισμένοι γιατροί στην Ευρώπη συμβούλευαν τις έγκυες γυναίκες να υποβάλλονται σε αμβλώσεις λόγω έκθεσης στην ακτινοβολία, παρόλο που τα σχετικά επίπεδα ήταν πολύ χαμηλότερα από εκείνα που ενδέχεται να έχουν τερατογόνες επιπτώσεις (Rahu & Mati, 2003).

Ο Robert Gale, ένας αιματολόγος που περιέθαλψε θύματα ακτινοβολίας μετά το ατύχημα, υπολόγισε ότι έγιναν περισσότερες από 1 εκατομμύριο αμβλώσεις στη Σοβιετική Ένωση και την Ευρώπη, ως αποτέλεσμα λανθασμένων συμβουλών από

τους γιατρούς τους σχετικά με την έκθεση στην ακτινοβολία και τις γενετικές ανωμαλίες μετά το ατύχημα (ΠΟΥ 2014).

Έχουν δημοσιευθεί ορισμένα υπερβολικά στοιχεία σχετικά με τον αριθμό των νεκρών που αποδίδονται στην καταστροφή του Τσερνόμπιλ, συμπεριλαμβανομένης μιας δημοσίευσης από το Γραφείο του ΟΗΕ για τον συντονισμό των ανθρωπιστικών υποθέσεων (OCHA). Ωστόσο, ο Πρόεδρος της UNSCEAR κατέστησε σαφές ότι «αυτή η έκθεση είναι γεμάτη από αβάσιμες δηλώσεις που δεν έχουν καμία υποστήριξη σε επιστημονικές εκτιμήσεις», και η έκθεση του φόρουμ του Τσερνόμπιλ απορρίπτει επίσης αυτούς τους ισχυρισμούς (UNSCEAR , 2007).

Ο αριθμός των θανάτων που προκλήθηκαν από το ατύχημα από ένα παράρτημα της έκθεσης της UNSCEAR του 2008, που δημοσιεύθηκε το 2011. Η έκθεση κατέληξε στο συμπέρασμα: «Συνοπτικά, οι επιπτώσεις του ατυχήματος του Τσερνόμπιλ είναι πολλές και ποικίλες. Τα πρώιμα ντετερμινιστικά αποτελέσματα μπορούν να αποδοθούν στην ακτινοβολία με υψηλό βαθμό βεβαιότητας, ενώ για άλλες ιατρικές καταστάσεις, η ακτινοβολία σχεδόν σίγουρα δεν ήταν η αιτία. Ενδιάμεσα, υπήρχε ένα ευρύ φάσμα καταστάσεων. Είναι απαραίτητο να αξιολογηθεί προσεκτικά κάθε συγκεκριμένη κατάσταση και τις περιβάλλουσες συνθήκες πριν αποδοθεί μια αιτία» (ΠΟΥ,2018).

Σύμφωνα με μια έκθεση της UNSCEAR το 2018, περίπου 20.000 περιπτώσεις καρκίνου του θυρεοειδούς διαγνώστηκαν το 1991-2015 σε ασθενείς που ήταν 18 ετών και κάτω, τη στιγμή του ατυχήματος. Η έκθεση αναφέρει ότι το ένα τέταρτο των περιπτώσεων (5000 περιπτώσεις) οφείλονταν «πιθανώς» σε υψηλές δόσεις ακτινοβολίας και ότι αυτό το κλάσμα ήταν πιθανό να ήταν υψηλότερο τα προηγούμενα χρόνια και χαμηλότερο τα επόμενα χρόνια. Ωστόσο, αναφέρει επίσης ότι η αβεβαιότητα γύρω από το αποδιδόμενο κλάσμα είναι πολύ σημαντική – τουλάχιστον 0,07 έως 0,5– και ότι η επιρροή των ετήσιων προβολών και η ενεργός παρακολούθηση καθιστούν προβληματικές τις συγκρίσεις με τον γενικό πληθυσμό. Ο καρκίνος του θυρεοειδούς συνήθως δεν είναι θανατηφόρος εάν διαγνωστεί και αντιμετωπιστεί έγκαιρα. Η έκθεση αναφέρει ότι από τις διαγνώσεις που έγιναν μεταξύ 1991 και 2005, 15 αποδείχθηκαν θανατηφόρες (Διεθνής Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας ,2016).

2.2. Το ατύχημα της Φουκουσίμα

Ο μεγάλος σεισμός της Ανατολικής Ιαπωνίας, μεγέθους 9,0 στις 2:46 μ.μ. της Παρασκευής 11 Μαρτίου 2011, προκάλεσε σημαντικές ζημιές στην περιοχή και το μεγάλο τσουνάμι που δημιούργησε προκάλεσε πολύ περισσότερες. Ο σεισμός είχε επίκεντρο 130 χιλιόμετρα ανοιχτά της πόλης Σεντάι στην επαρχία Μιγιάγκι στην ανατολική ακτή του νησιού Χονσού (το κύριο τμήμα της Ιαπωνίας) και ήταν ένας σπάνιος και πολύπλοκος διπλός σεισμός που είχε μεγάλη διάρκεια περίπου 3 λεπτών (Lipscy, et all 2013).



Εικόνα 3. Ο σταθμός παραγωγής ενέργειας Fukushima Daiichi πριν από το τσουνάμι και το ατύχημα του 2011 (Terco).

Συγκεκριμένα, μια περιοχή του θαλάσσιου πυθμένα που εκτείνεται 650 km βορρά-νότου κινούνταν συνήθως 10-20 μέτρα οριζόντια. Η Ιαπωνία κινήθηκε λίγα μέτρα ανατολικά και η τοπική ακτογραμμή υποχώρησε κατά μισό μέτρο. Το τσουνάμι πλημμύρισε περίπου 560 km² και είχε ως αποτέλεσμα τον αριθμό των ανθρώπινων νεκρών περίπου 19.500 και πολλές ζημιές σε παράκτια λιμάνια και πόλεις, με πάνω

από ένα εκατομμύριο κτίρια να καταστραφούν ή να καταρρεύσουν εν μέρει (Lipscy, et al 2013).

Έντεκα αντιδραστήρες σε τέσσερις πυρηνικούς σταθμούς στην περιοχή λειτουργούσαν εκείνη την εποχή και όλοι έκλεισαν αυτόματα όταν χτύπησε ο σεισμός. Η μετέπειτα επιθεώρηση δεν έδειξε σημαντικές ζημιές από τον σεισμό. Οι λειτουργικές μονάδες που έκλεισαν ήταν οι Fukushima Daiichi 1, 2, 3 και Fukushima Daini 1, 2, 3, 4, Onagawa 1, 2, 3 του Tohoku και Tokai της Japco, συνολικά 9377 MWe της Tokyo Electric Power Company (Tepco). Οι μονάδες 4, 5 & 6 της Fukushima Daiichi δεν λειτουργούσαν εκείνη τη στιγμή, αλλά επηρεάστηκαν. Το κύριο πρόβλημα αρχικά επικεντρώθηκε στο Fukushima Daiichi 1-3. Η ενότητα 4 έγινε πρόβλημα την πέμπτη ημέρα (Richard, et al 2017).

Οι αντιδραστήρες αποδείχθηκαν ισχυροί σεισμικά, αλλά ευάλωτοι στο τσουνάμι. Η ισχύς, από το δίκτυο ή τις εφεδρικές γεννήτριες, ήταν διαθέσιμη για τη λειτουργία των αντλιών ψύξης του συστήματος απομάκρυνσης υπολειπόμενης θερμότητας (RHR) σε οκτώ από τις έντεκα μονάδες, και παρά ορισμένα προβλήματα πέτυχαν «ψυχρή διακοπή λειτουργίας» εντός περίπου τεσσάρων ημερών. Τα άλλα τρία, στο Fukushima Daiichi, έχασαν το ρεύμα στις 3.42 μ.μ., σχεδόν μία ώρα μετά τον σεισμό, όταν ολόκληρη η τοποθεσία πλημμύρισε από το τσουνάμι των 15 μέτρων. Αυτό απενεργοποίησε 12 από τις 13 εφεδρικές γεννήτριες στο χώρο του εργοστασίου και επίσης τους εναλλάκτες θερμότητας για την απόρριψη της απορριπτόμενης θερμότητας του αντιδραστήρα και της θερμότητας αποσύνθεσης στη θάλασσα. Οι τρεις μονάδες έχασαν την ικανότητα διατήρησης της σωστής ψύξης του αντιδραστήρα και της κυκλοφορίας του νερού (Fackler & Martin ,2011).

Εκτός των παραπάνω, απενεργοποιήθηκε και ο ηλεκτρικός διακόπτης. Αυτό το ανέλαβαν εκατοντάδες εργαζόμενοι της Tepco καθώς και ορισμένοι εργολάβοι, υποστηριζόμενοι από πυροσβεστικό και στρατιωτικό προσωπικό. Ορισμένοι από το προσωπικό της Tepco είχαν χάσει σπίτια, ακόμη και οικογένειες, στο τσουνάμι και αρχικά ζούσαν σε προσωρινά καταλύματα κάτω από μεγάλες δυσκολίες και στέρηση, με κάποιο προσωπικό κίνδυνο. Ένα συντονισμένο επί τόπου κέντρο αντίδρασης έκτακτης ανάγκης δεν μπόρεσε να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση της κατάστασης, λόγω της ραδιενεργής μόλυνσης, και διέμεναν αρχικά σε προσωρινά καταλύματα κάτω από μεγάλες δυσκολίες και στέρηση, με κάποιο προσωπικό κίνδυνο (Fackler & Martin ,2011).

Τρεις υπάλληλοι της Terco, στα εργοστάσια Daiichi και Daini, σκοτώθηκαν απευθείας από τον σεισμό και το τσουνάμι, αλλά δεν υπήρξαν θύματα από το πυρηνικό ατύχημα (ABC,2018).

Μεταξύ εκατοντάδων μετασεισμών, ένας σεισμός μεγέθους 7,1 βαθμών, πιο κοντά στη Φουκουσίμα από εκείνον της 11ης Μαρτίου, σημειώθηκε στις 7 Απριλίου, αλλά χωρίς περαιτέρω ζημιές στο εργοστάσιο. Στις 11 Απριλίου ένας σεισμός μεγέθους 7,1 και στις 12 Απριλίου ένας σεισμός μεγέθους 6,3 Ρίχτερ, και οι δύο με επίκεντρο τη Φουκουσίμα-Χαμαντόρι, δεν προκάλεσαν άλλα προβλήματα (Braun & Matthias, 2011).

2.2.1. Τα δύο εργοστάσια της Φουκουσίμα και η τοποθεσία τους

Τα εργοστάσια Daiichi (πρώτο) και Daini (δεύτερο) Fukushima βρίσκονται σε απόσταση περίπου 11 km από την ακτή Daini στα νότια. Τα καταγεγραμμένα σεισμικά δεδομένα και για τα δύο εργοστάσια – περίπου 180 km από το επίκεντρο – δείχνουν ότι τα 550 Gal (0,56 g) ήταν η μέγιστη επίγεια επιτάχυνση για το Daiichi και τα 254 Gal ήταν μέγιστη για το Daini. Οι μονάδες Daiichi 2, 3 και 5 ξεπέρασαν τη βάση σχεδιασμού της μέγιστης επιτάχυνσης απόκρισης σε κατεύθυνση ανατολής-δύσης κατά περίπου 20%. Η ηχογράφηση ήταν πάνω από 130-150 δευτερόλεπτα (Negishi & Mayumi , 2011).

Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι όλα τα πυρηνικά εργοστάσια στην Ιαπωνία είναι χτισμένα σε βράχους – η επιτάχυνση του εδάφους ήταν περίπου 2000 Gal λίγα χιλιόμετρα βόρεια, πάνω σε ιζήματα (Negishi & Mayumi , 2011).

Το αρχικό ύψος τσουνάμι βάσει σχεδιασμού ήταν 3,1 m για το Daiichi με βάση την αξιολόγηση του τσουνάμι της Χιλής το 1960 και έτσι το εργοστάσιο είχε κατασκευαστεί περίπου 10 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας με τις αντλίες θαλασσινού νερού 4 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (IEEE, 2011).

Το εργοστάσιο Daini κατασκευάστηκε 13 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το 2002 η βάση του σχεδιασμού αναθεωρήθηκε σε 5,7 μέτρα πάνω και οι

αντλίες θαλασσινού νερού σφραγίστηκαν. Στην περίπτωση αυτή, τα ύψη του τσουνάμι που έφτασαν στην ξηρά ήταν περίπου 15 μέτρα και οι αίθουσες τουρμπίνας του Daiichi ήταν κάτω από περίπου 5 μέτρα θαλασσινού νερού μέχρι να υποχωρήσουν τα επίπεδα. Η Νταϊνί επηρεάστηκε λιγότερο και το μέγιστο πλάτος αυτού του τσουνάμι ήταν 23 μέτρα στο σημείο προέλευσης, περίπου 180 χλμ. από τη Φουκουσίμα (IEEE ,2011).

Τον περασμένο αιώνα υπήρξαν οκτώ τσουνάμι στην περιοχή με μέγιστα πλάτη στην αρχή άνω των 10 μέτρων (μερικά πολύ περισσότερα), που προέκυψαν από σεισμούς μεγέθους 7,7 έως 8,4, κατά μέσο όρο ένα κάθε 12 χρόνια. Εκείνοι του 1983 και του 1993 ήταν οι πιο πρόσφατοι που επηρέασαν την Ιαπωνία, με μέγιστα ύψη στην αρχή 14,5 μέτρα και 31 μέτρα αντίστοιχα, και τα δύο προκλήθηκαν από σεισμούς μεγέθους 7,7 Ρίχτερ. Ο σεισμός του Ιουνίου 1896, μεγέθους 8,3 βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ, προκάλεσε ένα τσουνάμι ύψους 38 μέτρων στην περιοχή Τοχόκου, σκοτώνοντας περισσότερους από 27.000 ανθρώπους (BBC,2018).

Τα αντίμετρα, για το τσουνάμι, που ελήφθησαν όταν σχεδιάστηκε και εγκαταστάθηκε η Fukushima Daiichi στη δεκαετία του 1960 θεωρήθηκαν αποδεκτά σε σχέση με την επιστημονική γνώση τότε, με χαμηλά καταγεγραμμένα ύψη αναδρομής για τη συγκεκριμένη ακτογραμμή. Όμως, περίπου 18 χρόνια πριν από την καταστροφή του 2011, είχε προκύψει νέα επιστημονική γνώση σχετικά με την πιθανότητα ενός μεγάλου σεισμού και ενός μεγάλου τσουνάμι περίπου 15,7 μέτρων στην τοποθεσία Daiichi. Ωστόσο, αυτό δεν είχε ακόμη οδηγήσει σε καμία σημαντική δράση είτε από τον φορέα εκμετάλλευσης του εργοστασίου, την Tepco, είτε από τις κυβερνητικές ρυθμιστικές αρχές, ιδίως τον Οργανισμό Πυρηνικής και Βιομηχανικής Ασφάλειας (NISA). Η συζήτηση ήταν σε εξέλιξη, αλλά η δράση ελάχιστη (International Business Times, 2018).

Τα αντίμετρα για το τσουνάμι θα μπορούσαν επίσης να έχουν αναθεωρηθεί σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (ΔΟΑΕ), οι οποίες απαιτούσαν να ληφθούν υπόψη τα υψηλά επίπεδα τσουνάμι (International Business Times, 2018).

Μια έκθεση από την Επιτροπή Έρευνας Σεισμών της ιαπωνικής κυβέρνησης σχετικά με τους σεισμούς και τα τσουνάμι στα ανοιχτά της ακτής του Ειρηνικού στη βορειοανατολική Ιαπωνία τον Φεβρουάριο του 2011 επρόκειτο να δημοσιευτεί τον

Απρίλιο και θα μπορούσε τελικά να επιφέρει αλλαγές. Το έγγραφο περιλαμβάνει ανάλυση ενός σεισμού μεγέθους 8,3 βαθμών που είναι γνωστό ότι έπληξε την περιοχή πριν από περισσότερα από 1140 χρόνια, προκαλώντας τεράστια τσουνάμι που πλημμύρισαν τεράστιες περιοχές των νομών Μιγιάγκι και Φουκουσίμα. Η έκθεση καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η περιοχή πρέπει να ειδοποιηθεί για τον κίνδυνο μιας παρόμοιας καταστροφής (Lipsey,2013).

Τέλος, ο σεισμός της 11ης Μαρτίου είχε μέγεθος 9,0 Ρίχτερ και περιελάμβανε σημαντική μετατόπιση πολλαπλών τμημάτων του βυθού σε μια περιοχή πηγής 200 x 400 km. Τα κύματα τσουνάμι κατέστρεψαν μεγάλες περιοχές των νομών Μιγιάγκι, Ιβάτε και Φουκουσίμα (Lipsey,2013).

2.2.2. Εκδηλώσεις στο Fukushima Daiichi 1-3 & 4

Φαίνεται ότι δεν προκλήθηκαν σοβαρές ζημιές στους αντιδραστήρες από τον σεισμό και οι μονάδες λειτουργίας 1-3 έκλεισαν αυτόματα ως απάντηση σε αυτόν, όπως σχεδιάστηκαν. Ταυτόχρονα, χάθηκαν και οι έξι εξωτερικές πηγές τροφοδοσίας λόγω ζημιών από το σεισμό, οπότε τέθηκαν σε λειτουργία οι γεννήτριες ντίζελ έκτακτης ανάγκης που βρίσκονται στα υπόγεια των κτιρίων του στροβίλου. Αρχικά, η ψύξη μπορούσε να διατηρηθεί μέσω του κύριου κυκλώματος ατμού παρακάμπτοντας τον στρόβιλο και περνώντας από τους συμπυκνωτές (Richard,et al 2017).

Στη συνέχεια, 41 λεπτά αργότερα, στις 3:42 μ.μ., χτύπησε το πρώτο κύμα τσουνάμι, ακολουθούμενο από ένα δεύτερο 8 λεπτά αργότερα. Αυτά βύθισαν και κατέστρεψαν τις αντλίες θαλασσινού νερού τόσο για τα κύρια κυκλώματα συμπυκνωτή όσο και για τα βοηθητικά κυκλώματα ψύξης, ιδίως το σύστημα ψύξης της απομάκρυνσης υπολειπόμενης θερμότητας (RHR). Έπνιξαν επίσης τις γεννήτριες ντίζελ και πλημμύρισαν τους ηλεκτρικούς διακόπτες και τις μπαταρίες, που βρίσκονταν όλα στα υπόγεια των κτιρίων του στροβίλου (η μία αερόψυκτη γεννήτρια που επέζησε εξυπηρετούσε τις μονάδες 5 και 6). Υπήρξε, λοιπόν, ένα μπλακ άουτ του σταθμού και οι αντιδραστήρες απομονώθηκαν. Έτσι, τα τσουνάμι προκάλεσαν επίσης ζημιές καθιστώντας δύσκολη την εξωτερική πρόσβαση (Richard,et al 2017).

Όλα αυτά έθεσαν τους αντιδραστήρες 1-3 σε δεινή κατάσταση και οδήγησαν τις αρχές να διατάξουν, και στη συνέχεια να παρατείνουν την εκκένωση, ενώ οι μηχανικοί εργάζονταν για την αποκατάσταση της ισχύος και της ψύξης. Οι εφεδρικές μπαταρίες 125 volt DC για τις μονάδες 1 και 2 πλημμύρισαν και απέτυχαν, αφήνοντάς τις χωρίς όργανα, έλεγχο ή φωτισμό. Η μονάδα 3 είχε ισχύ μπαταρίας περίπου 30 ώρες (Richard, et al 2017).

Στις 7:03 μ.μ. της Παρασκευής 11 Μαρτίου κηρύχθηκε πυρηνική έκτακτη ανάγκη και στις 8:50 μ.μ., η νομαρχία της Φουκουσίμα εξέδωσε εντολή εκκένωσης ατόμων σε απόσταση 2 χιλιομέτρων από το εργοστάσιο. Στις 9:23 μ.μ. ο πρωθυπουργός το επέκτεινε στα 3 χλμ. και στις 5:44 π.μ., στις 12 Μαρτίου, το επέκτεινε στα 10 χλμ. Ο ίδιος, επισκέφτηκε το εργοστάσιο αμέσως μετά και αργότερα το Σάββατο 12 Μαρτίου επέκτεινε τη ζώνη εκκένωσης στα 20 χιλιόμετρα (Richard, et al 2017).

2.2.3. Ραδιενεργές εκλύσεις στον αέρα

Όσον αφορά τις εκλύσεις στον αέρα και επίσης τη διαρροή νερού από τη Fukushima Daiichi, το κύριο ραδιονουκλίδιο από τα πολλά είδη προϊόντων σχάσης στο καύσιμο ήταν το πτητικό ιώδιο-131, το οποίο έχει χρόνο ημιζωής 8 ημέρες. Το άλλο κύριο ραδιονουκλίδιο είναι το καίσιο-137, το οποίο έχει χρόνο ημιζωής 30 ετών, μεταφέρεται εύκολα σε ένα λοφίο και όταν προσγειωθεί μπορεί να μολύνει τη γη για κάποιο χρονικό διάστημα (Fackler & Martin, 2011).

Το Cs-134 παράγεται και διασκορπίζεται επίσης. Έχει χρόνο ημιζωής δύο ετών. Το καίσιο είναι διαλυτό και μπορεί να ληφθεί στον οργανισμό, αλλά δεν συγκεντρώνεται σε κανένα συγκεκριμένο όργανο και έχει βιολογικό χρόνο ημιζωής περίπου 70 ημέρες. Κατά την αξιολόγηση της σημασίας των ατμοσφαιρικών εκλύσεων, ο αριθμός Cs-137 πολλαπλασιάζεται επί 40 και προστίθεται στον αριθμό I-131 για να δώσει έναν αριθμό «ισοδύναμο ιωδίου-131» (Fackler & Martin, 2011).

Καθώς η ψύξη απέτυχε την πρώτη μέρα, διατάχθηκαν σταδιακά εκκενώσεις, λόγω της αβεβαιότητας για το τι συνέβαινε μέσα στους αντιδραστήρες και τις πιθανές επιπτώσεις. Μέχρι το βράδυ του Σαββάτου 12 Μαρτίου η ζώνη εκκένωσης είχε επεκταθεί στα 20 χιλιόμετρα από το εργοστάσιο (Braun & Matthias, 2011).

Από 20 έως 30 km από το εργοστάσιο, το κριτήριο του ρυθμού δόσης 20 mSv/έτος εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό της εκκένωσης και είναι πλέον το κριτήριο για την επιστροφή. Τα 20 mSv/έτος ήταν επίσης το γενικό όριο που τέθηκε για το ρυθμό δόσης των παιδιών που σχετίζεται με υπαίθριες δραστηριότητες, αλλά υπήρξαν εκκλήσεις για μείωση αυτού. Σε περιοχές με 20-50 mSv/έτος από τον Απρίλιο του 2012 η διαμονή είναι περιορισμένη, με μέτρα αποκατάστασης (Braun & Matthias, 2011).

Ένα σημαντικό πρόβλημα στην παρακολούθηση της έκλυσης ραδιενέργειας ήταν ότι 23 από τους 24 σταθμούς παρακολούθησης ραδιενέργειας στην τοποθεσία του εργοστασίου απενεργοποιήθηκαν από το τσουνάμι (Fackler & Martin, 2011).

Υπάρχει κάποια αβεβαιότητα σχετικά με την ποσότητα και τις ακριβείς πηγές ραδιενεργών εκλύσεων στον αέρα. Η ρυθμιστική αρχή της Ιαπωνίας, η Υπηρεσία Πυρηνικής και Βιομηχανικής Ασφάλειας (NISA), υπολόγισε τον Ιούνιο του 2011 ότι είχαν εκλυθεί 770 PBq (ισοδύναμο ιωδίου-131) ραδιενέργειας, αλλά η Επιτροπή Πυρηνικής Ασφάλειας (NSC, φορέας πολιτικής) μείωσε αυτή την εκτίμηση σε 570 PBq. Ο αριθμός 770 PBq είναι περίπου το 15% της απελευθέρωσης του Τσερνόμπιλ 5200 PBq ισοδύναμου ιωδίου-131. Το μεγαλύτερο μέρος της κυκλοφορίας έγινε στα τέλη Μαρτίου 2011 (Braun & Matthias, 2011).

Η Terco ψέκασε μια πολυμερή ρητίνη που καταστέλλει τη σκόνη γύρω από το εργοστάσιο για να διασφαλίσει ότι η πτώση από τα μέσα Μαρτίου δεν θα κινητοποιηθεί από τον άνεμο ή τη βροχή. Επιπλέον, αφαίρεσε πολλά ερείπια με μπροστινούς φορτωτές με τηλεχειριστήριο και αυτό μείωσε περαιτέρω τα επίπεδα ακτινοβολίας περιβάλλοντος, μειώνοντάς τα στο μισό κοντά στη μονάδα 1 (Richard Lloyd Parry, 2022).

Τα υψηλότερα επίπεδα ακτινοβολίας στο χώρο προήλθαν από συντρίμια που είχαν μείνει στο έδαφος μετά τις εκρήξεις στις μονάδες 3 και 4. Επίσης, στα μέσα Μαΐου 2011 ξεκίνησαν οι εργασίες για την κατασκευή ενός καλύμματος πάνω από τη μονάδα 1 για τη μείωση των ραδιενεργών εκλύσεων από τον χώρο, για την αποφυγή της βροχής και για τη δυνατότητα μέτρησης των εκλύσεων ραδιενεργών εντός της δομής μέσω του συστήματος αερισμού της. Το πλαίσιο συναρμολογήθηκε πάνω από τον αντιδραστήρα, περικλείοντας μια περιοχή 42 x 47 m και ύψος 54 m. Τα τμήματα

του χαλύβδινου πλαισίου προσαρμόζονται μεταξύ τους από απόσταση χωρίς τη χρήση βιδών και μπουλονιών (Richard Lloyd Parry ,2022).

Αξίζει να αναφερθεί ότι, όλα τα πάνελ τοίχου είχαν μια αδιάβροχη επίστρωση και η δομή είχε ένα φιλτραρισμένο σύστημα εξαερισμού ικανό να χειρίζεται 40.000 κυβικά μέτρα αέρα την ώρα μέσω έξι γραμμών, συμπεριλαμβανομένων δύο εφεδρικών γραμμών. Η κατασκευή του καλύμματος ήταν εξοπλισμένη με εσωτερικές κάμερες παρακολούθησης, ανιχνευτές ακτινοβολίας και υδρογόνου, θερμομέτρα και σωλήνα για έγχυση νερού. Η κάλυψη ολοκληρώθηκε με συστήματα εξαερισμού που λειτουργούσαν μέχρι τα τέλη Οκτωβρίου 2011. Αναμενόταν ότι θα χρειαζόταν για δύο χρόνια (Richard Lloyd Parry ,2022).

Τον Μάιο του 2013, η Terco ανακοίνωσε τον πιο μόνιμο αντικαταστάτη της, που θα κατασκευαστεί σε διάστημα τεσσάρων ετών. Άρχισε να κατεδαφίζει το κάλυμμα του 2011 το 2014 και τελείωσε το 2016. Τον Δεκέμβριο του 2019 αποφάσισε να εγκαταστήσει το ανταλλακτικό κάλυμμα πριν αφαιρέσει τα συντρίμια από τον τελευταίο όροφο του κτιρίου. Έτσι, κάτω από το κάλυμμα εγκαταστάθηκε ένας γερανός και άλλος εξοπλισμός για την αφαίρεση καυσίμου, παρόμοιος με αυτόν στη μονάδα 4 (Richard Lloyd Parry, 2022).

2.2.4. Έκθεση ακτινοβολίας στο εργοστάσιο

Μέχρι το τέλος του 2011, η Terco είχε υπό έλεγχο την έκθεση σε ακτινοβολία 19.594 ατόμων που εργάζονταν στο χώρο από τις 11 Μαρτίου. Για πολλά από αυτά ελήφθησαν υπόψη τόσο οι εξωτερικές όσο και οι εσωτερικές δόσεις (μετρούμενες με μετρητές ολόκληρου του σώματος). Επίσης, αναφέρθηκε ότι 167 εργαζόμενοι είχαν λάβει δόσεις άνω των 100 mSv. Από αυτά τα 135 είχαν λάβει 100 έως 150 mSv, είκοσι τρία 150-200 mSv, άλλα τρία 200-250 mSv και έξι είχαν λάβει πάνω από 250 mSv (309 έως 678 mSv), προφανώς λόγω εισπνοής ιωδίου-131 σε πρώιμο στάδιο (Fukushima Inform, 2016).

Το τελευταίο στοιχείο περιελάμβανε τους χειριστές του θαλάμου ελέγχου των μονάδων 3 και 4, τις πρώτες δύο ημέρες που δεν φορούσαν αναπνευστική συσκευή. Υπήρχαν έως και 200 εργαζόμενοι στο χώρο κάθε μέρα. Οι εργαζόμενοι

στην ανάκτηση φορούν προσωπικές μάσκες, με αναπνευστική συσκευή και προστατευτικό ρουχισμό που προστατεύει από την ακτινοβολία άλφα και βήτα (Fukushima Inform, 2016).

Το επίπεδο των 250 mSv ήταν η μέγιστη επιτρεπόμενη βραχυπρόθεσμη δόση για τους εργαζόμενους στον καθαρισμό ατυχημάτων στη Fukushima Daiichi έως τον Δεκέμβριο του 2011, τα 500 mSv είναι η διεθνής επιτρεπόμενη βραχυπρόθεσμη δόση «για τους εργαζόμενους έκτακτης ανάγκης που συμμετάσχουν σε σωτήριες ενέργειες». Τον Ιανουάριο του 2012 το επιτρεπόμενο μέγιστο επανήλθε στα 50 mSv/έτος (Fukushima Inform, 2016).

Δεν σημειώθηκαν θύματα ακτινοβολίας (οξύ σύνδρομο ακτινοβολίας) και ελάχιστοι άλλοι τραυματισμοί, αν και υψηλότερες από τις κανονικές δόσεις, βρέθηκαν σε αρκετές εκατοντάδες εργαζομένους. Επίσης, τα υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας στα τρία κτίρια του αντιδραστήρα εμπόδισαν την πρόσβαση εκεί (Hiyama et al., 2012).

Η παρακολούθηση του θαλασσινού νερού, του εδάφους και της ατμόσφαιρας γίνεται σε 25 τοποθεσίες στο εργοστάσιο, 12 θέσεις στα όρια και άλλες πιο μακριά. Η παρακολούθηση του αέρα και του θαλασσινού νερού από την κυβέρνηση και τον ΔΟΑΕ βρίσκεται σε εξέλιξη. Ορισμένα υψηλά αλλά όχι επικίνδυνα για την υγεία επίπεδα ιωδίου-131 βρέθηκαν τον Μάρτιο του 2011, αλλά με χρόνο ημιζωής οκτώ ημερών, το μεγαλύτερο μέρος του I-131 είχε φύγει μέχρι τα τέλη Απριλίου 2011 (Hiyama et al. 2012).

Οι αναφορές των μέσων ενημέρωσης αναφέρθηκαν σε «πυρηνικούς τσιγγάνους» – περιστασιακούς εργάτες που απασχολούνται από υπεργλάβους σε βραχυπρόθεσμη βάση, και φέρεται να είναι επιρρεπείς στη λήψη υψηλότερων και μη επιβλεπόμενων δόσεων ακτινοβολίας. Αυτό το παροδικό εργατικό δυναμικό είναι μέρος της πυρηνικής σκηνης για τουλάχιστον τέσσερις δεκαετίες, και στη Φουκουσίμα παρακολουθούνται πολύ αυστηρά. Εάν φτάσουν ορισμένα επίπεδα, π.χ. 30 mSv αλλά ποικίλλουν ανάλογα με την περίσταση, επανατοποθετούνται σε περιοχές χαμηλότερης έκθεσης (Hiyama et al. 2012).

Τα στοιχεία της Terco που υποβλήθηκαν στην EPA, για την περίοδο έως το τέλος Ιανουαρίου 2014, έδειξαν ότι 173 εργαζόμενοι είχαν λάβει περισσότερα από 100 mSv (έξι περισσότερα από δύο χρόνια νωρίτερα) και 1578 είχαν λάβει 50 έως 100 mSv. Αυτό ήταν μεταξύ 32.024 συνολικά, 64% περισσότερο από ότι είχε εργαστεί

εκεί δύο χρόνια νωρίτερα. Από τον Απρίλιο του 2013 κανένας από τους 13.154 που είχαν εργαστεί επιτόπια δεν είχε λάβει περισσότερα από 50 mSv και το 96% από αυτά είχε δόση μικρότερη από 20 mSv. Συνεπώς, στις αρχές του 2014 υπήρχαν περίπου 4000 στο χώρο κάθε μέρα (Sutou et al., 2015).

2.2.5. Έκθεση ακτινοβολίας σε περιοχές πέραν της Φουκουσίμα

Στις 4 Απριλίου 2011, καταγράφηκαν επίπεδα ραδιενέργειας 0,06 mSv/ημέρα στην πόλη της Φουκουσίμα, 65 χλμ βορειοδυτικά του εργοστασίου, περίπου 60 φορές υψηλότερα από το κανονικό, αλλά δεν ενέχουν κίνδυνο για την υγεία σύμφωνα με τις αρχές. Η παρακολούθηση πέραν της ακτίνας εκκένωσης των 20 km έως τις 13 Απριλίου έδειξε μια τοποθεσία - γύρω από το Iitate - με ρυθμό δόσης έως και 0,266 mSv/ημέρα, αλλά αλλού όχι περισσότερο από το ένα δέκατο αυτής (Fackler & Tabuchi, 2013).

Στα τέλη Ιουλίου, το υψηλότερο επίπεδο που μετρήθηκε σε ακτίνα 30 km ήταν 0,84 mSv/ημέρα στην πόλη Namie, 24 km μακριά. Το όριο ασφαλείας που έθεσε η κεντρική κυβέρνηση στα μέσα Απριλίου για τους δημόσιους χώρους αναψυχής ήταν 3,8 μικροσιβερτ ανά ώρα (0,09 mSv/ημέρα) (Fackler & Tabuchi, 2013).

Τον Ιούνιο του 2013, ανάλυση από την Αρχή Πυρηνικής Ρύθμισης της Ιαπωνίας (NRA) έδειξε ότι οι πιο μολυσμένες περιοχές στη ζώνη εκκένωσης της Φουκουσίμα είχαν μειωθεί σε μέγεθος κατά τα τρία τέταρτα, τα δύο προηγούμενα χρόνια. Η περιοχή που υπόκειται σε υψηλές δόσεις (πάνω από 166 mSv/έτος) μειώθηκε από 27% της ζώνης 1117 km² σε 6% σε διάστημα 15 μηνών έως τον Μάρτιο του 2013 και στο τμήμα «χωρίς διαμονή» (αρχικά 83-166 mSv/έτος) δεν παρέμειναν περιοχές σε αυτό το επίπεδο, και το 70% ήταν κάτω από 33 mSv/έτος. Η λιγότερο μολυσμένη περιοχή είναι τώρα εντελώς κάτω από 33 mSv/έτος (Fackler & Tabuchi, 2013).

Τον Αύγουστο του 2011 θεσπίστηκε ο νόμος για τα ειδικά μέτρα σχετικά με τον χειρισμό της ραδιενεργής ρύπανσης. Μέσω αυτού, τέθηκε σε πλήρη ισχύ από τον Ιανουάριο του 2012 ως το κύριο νομικό μέσο για την αντιμετώπιση όλων των δραστηριοτήτων αποκατάστασης στις πληγείσες περιοχές, καθώς και τη διαχείριση

των υλικών που αφαιρέθηκαν ως αποτέλεσμα αυτών των δραστηριοτήτων (Sebens & Shelby, 2014).

Μετά από μια λεπτομερή μελέτη από 80 διεθνείς εμπειρογνώμονες, η Έκθεση της Επιστημονικής Επιτροπής του ΟΗΕ, για τις Επιπτώσεις της Ατομικής Ακτινοβολίας (UNSCEAR) του Μαΐου 2013 στη Γενική Συνέλευση, κατέληξε στο συμπέρασμα: «Δεν έχουν παρατηρηθεί θάνατοι ή οξείες ασθένειες που σχετίζονται με την ακτινοβολία μεταξύ των εργαζομένων και του κοινού που εκτέθηκαν στην ακτινοβολία από το ατύχημα. Οι δόσεις στο ευρύ κοινό, τόσο αυτές που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του πρώτου έτους όσο και εκτιμώμενες για τη διάρκεια της ζωής τους, είναι γενικά χαμηλές ή πολύ χαμηλές» (Sebens & Shelby, 2014).

Ωστόσο, η έκθεση σημείωσε: «Περισσότεροι από 160 επιπλέον εργαζόμενοι έλαβαν πολύ αυξημένες δόσεις που υπολογίζεται επί του παρόντος ότι είναι πάνω από 100 mSv, κυρίως από εξωτερικές εκθέσεις. Μεταξύ αυτής της ομάδας, θα αναμενόταν αυξημένος κίνδυνος καρκίνου στο μέλλον. Ωστόσο, οποιαδήποτε αυξημένη συχνότητα εμφάνισης καρκίνου, σε αυτή την ομάδα, αναμένεται να είναι αβάσιμο λόγω της δυσκολίας επιβεβαίωσης μιας τόσο μικρής επίπτωσης έναντι των φυσιολογικών στατιστικών διακυμάνσεων στη συχνότητα εμφάνισης του καρκίνου» (Fackler & Martin, 2016).

Αυτοί οι εργαζόμενοι παρακολουθούνται μεμονωμένα ετησίως για πιθανές καθυστερημένες επιπτώσεις στην υγεία που σχετίζονται με την ακτινοβολία. Η λευκή βίβλος, που ακολούθησε το UNSCEAR τον Οκτώβριο του 2015, ανέφερε ότι καμία από τις νέες πληροφορίες που αξιολογήθηκαν, μετά την έκθεση του 2013, «δεν επηρέασε ουσιαστικά τα κύρια ευρήματα ή αμφισβήτησε τις κύριες υποθέσεις της έκθεσης της Φουκουσίμα του 2013» (Fackler & Martin, 2016).

Το 2018 η UNSCEAR αποφάσισε να ενημερώσει την έκθεση του 2013 ώστε να αντικατοπτρίζει τα τελευταία ευρήματα. Τον Μάρτιο του 2021, η UNSCEAR δημοσίευσε την Έκθεσή της για το 2020, η οποία επιβεβαιώνει σε γενικές γραμμές τα κύρια ευρήματα και συμπεράσματα της έκθεσης του 2013. Η Έκθεση του 2020 αναφέρει: «Δεν έχουν τεκμηριωθεί δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία μεταξύ των κατοίκων της Φουκουσίμα που να αποδίδονται άμεσα στην έκθεση σε ραδιενέργεια από το ατύχημα του πυρηνικού εργοστασίου Φουκουσίμα Νταϊίτσι. Οι

αναθεωρημένες εκτιμήσεις δόσης της Επιτροπής είναι τέτοιες που είναι απίθανο να υπάρξουν μελλοντικές επιπτώσεις στην υγεία, που σχετίζονται με την ακτινοβολία» (Fackler & Martin, 2016).

2.2.6. Δημόσια υγεία και επιστροφή των εκτοπισθέντων

Η μόνιμη επιστροφή παραμένει υψηλή προτεραιότητα και η ζώνη εκκένωσης απολυμαίνεται όπου απαιτείται και είναι δυνατόν, ώστε όσοι εγκατέλειψαν την περιοχή να μπορούν να επιστρέψουν. Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις άγχους, συμπεριλαμβανομένου του τραύματος μεταφοράς μεταξύ των εκτοπισθέντων, και όταν η κατάσταση σταθεροποιήθηκε στο εργοστάσιο, αυτές αντιστάθμισαν τους κινδύνους της επιστροφής, με 2313 θανάτους να αναφέρονται (Fackler & Martin, 2016).

Τον Δεκέμβριο του 2011 η κυβέρνηση είπε ότι όπου η ετήσια δόση ακτινοβολίας θα ήταν κάτω από 20 mSv/έτος, η κυβέρνηση θα βοηθούσε τους κατοίκους να επιστρέψουν στα σπίτια τους το συντομότερο δυνατό και θα βοηθούσε τους τοπικούς δήμους με την απολύμανση και την επισκευή των υποδομών (Sebens & Shelby, 2014).

Σε περιοχές όπου τα επίπεδα ραδιενέργειας είναι πάνω από 20 mSv/έτος, οι εκτοπισμένοι θα κληθούν να συνεχίσουν να ζουν αλλού για «μερικά χρόνια» έως ότου η κυβέρνηση ολοκληρώσει τις εργασίες απολύμανσης και ανάκτησης. Η κυβέρνηση είπε ότι θα εξετάσει το ενδεχόμενο αγοράς γης και κατοικιών από τους κατοίκους αυτών των περιοχών, εάν οι εκτοπισμένοι επιθυμούν να τα πουλήσουν (Fackler & Martin, 2016).

Τον Νοέμβριο του 2013, η NRA αποφάσισε να αλλάξει τον τρόπο εκτίμησης της έκθεσης στην ακτινοβολία. Αντί οι αερομεταφερόμενες έρευνες να αποτελούν τη βάση, θα χρησιμοποιούνται προσωπικά δοσίμετρα, τα οποία δίνουν πολύ πιο ακριβή στοιχεία, συχνά πολύ λιγότερα από τις εκτιμήσεις των αερομεταφερόμενων. Θα χρησιμοποιούνται τα ίδια κριτήρια, όπως παραπάνω, με 20 mSv/έτος να είναι το όριο ανησυχίας των αρχών (Fackler & Martin, 2016).

Τον Φεβρουάριο του 2014, δημοσιεύθηκαν τα αποτελέσματα μιας μελέτης που έδειχνε ότι 458 κάτοικοι δύο περιοχών μελέτης 20 έως 30 km από το εργοστάσιο και μιας τρίτης 50 km βορειοδυτικά έλαβαν δόσεις ακτινοβολίας από το μολυσμένο έδαφος παρόμοιες με τα φυσικά επίπεδα υποβάθρου της χώρας. Η μέτρηση έγινε με προσωπικά δοσίμετρα τον Αύγουστο-Σεπτέμβριο 2012 (Sebens & Shelby, 2014).

Μέχρι τον Σεπτέμβριο του 2020, οι ιαπωνικές αρχές είχαν εντοπίσει 2313 θανάτους που σχετίζονται με εκτοπισθέντες από την επαρχία της Φουκουσίμα, οι οποίοι δεν οφείλονταν σε ζημιές που προκλήθηκαν από την ακτινοβολία ή τον σεισμό ή το τσουνάμι. Περίπου το 90% των θανάτων αφορούσαν άτομα άνω των 66 ετών. Από αυτά, περίπου το 30% σημειώθηκαν μέσα στους πρώτους τρεις μήνες των εκκενώσεων και περίπου το 80% μέσα σε δύο χρόνια (Richard Lloyd Parry, 2022).

Οι πρόωροι θάνατοι που σχετίζονται με καταστροφές σχετίζονταν κυρίως με

- (i) σωματικές και ψυχικές ασθένειες που προκλήθηκαν από την ανάγκη διαμονής σε καταφύγια και το τραύμα της αναγκαστικής μετακίνησης από χώρους φροντίδας και σπίτια,
- (ii) καθυστερήσεις στην εξασφάλιση της απαραίτητης ιατρικής υποστήριξης, λόγω των τεράστιων καταστροφών που προκλήθηκαν από τον σεισμό και το τσουνάμι.

Ωστόσο, τα επίπεδα ακτινοβολίας στις περισσότερες περιοχές που εκκενώθηκαν δεν ήταν μεγαλύτερα από τα επίπεδα φυσικής ακτινοβολίας σε άλλες περιοχές του κόσμου όπου δεν είναι εμφανείς αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία (WHO 2013) .

Στην έκθεση του Δεκεμβρίου 2018, η νομαρχιακή κυβέρνηση της Φουκουσίμα είπε ότι ο αριθμός των «έμμεσων» θανάτων στη νομαρχία ήταν μεγαλύτερος από τον αριθμό (1829) που σκοτώθηκαν στον σεισμό και το τσουνάμι. Έθεσε τότε τον αριθμό σε 2259 (από την αναθεώρηση έως το 2313) όπως καθορίστηκε από δημοτικές επιτροπές που εξετάζουν τη σχέση μεταξύ των συνεπειών της καταστροφής και των θανάτων. Ο αριθμός είναι μεγαλύτερος από ότι για τους νομούς Iwate και Miyagi, με 469 και 929 αντίστοιχα, αν και είχαν πολύ περισσότερες απώλειες ζώων στο σεισμό και το τσουνάμι – πάνω από 14.000. Η διαφορά αποδίδεται στη μεγαλύτερη ηλικιακή ομάδα που εμπλέκεται μεταξύ των επιζώντων από σεισμό/τσουνάμι της Φουκουσίμα,

περίπου το 90% των έμμεσων θανάτων είναι άτομα άνω των 66 ετών (Richard Lloyd Parry, 2022).

Οι αιτίες έμμεσων θανάτων περιλαμβάνουν σωματικό και ψυχικό στρες που προέρχεται από μακροχρόνιες παραμονές σε καταφύγια, έλλειψη αρχικής φροντίδας, ως αποτέλεσμα της αναπηρίας των νοσοκομείων από την καταστροφή, και αυτοκτονίες. Η αξιολόγηση των «έμμεσων θανάτων» γίνεται σύμφωνα με ένα μοντέλο που αναπτύχθηκε από την επαρχία Niigata μετά τον σεισμό του 2004 εκεί. Από τον Ιούλιο του 2020, περισσότεροι από 41.000 άνθρωποι από τη Φουκουσίμα εξακολουθούσαν να ζουν ως εκτοπισμένοι (Richard Lloyd Parry, 2022).

Οι εκτοπισμένοι σε περίοδο έξι ετών έλαβαν 100.000 ¥ (περίπου 1000 \$) το μήνα ως αποζημίωση ψυχολογικής ταλαιπωρίας. Τα χρήματα ήταν αφορολόγητα και πληρώθηκαν άνευ όρων. Τον Οκτώβριο του 2013, περίπου 84.000 εκτοπισμένοι έλαβαν τις πληρωμές. Οι στατιστικές δείχνουν ότι μια μέση τετραμελής οικογένεια έχει λάβει περίπου 90 εκατομμύρια ¥ (900.000 \$) ως αποζημίωση από την Terco. Από τον Ιανουάριο του 2021, οι εκτοπισμένοι από το ατύχημα της Φουκουσίμα είχαν λάβει 9,7 τρισεκατομμύρια ¥ σε προσωπική και περιουσιακή αποζημίωση (Terco, 2022).

Η νομαρχία της Φουκουσίμα διέθετε 17.000 προσωρινές μονάδες στέγασης που χρηματοδοτούνται από την κυβέρνηση για περίπου 29.500 εκτοπισμένους από το ατύχημα. Επιπλέον, τον Απρίλιο του 2019, οι πρώτοι κάτοικοι της Okuma, της πλησιέστερης πόλης στο εργοστάσιο, επιτράπη να επιστρέψουν στα σπίτια τους (Richard Lloyd Parry, 2022).

2.2.7. Διαχείριση μολυσμένου νερού

Η απομάκρυνση του μολυσμένου νερού από τα κτίρια του αντιδραστήρα και του στροβίλου είχε γίνει η κύρια πρόκληση την 3^η εβδομάδα, μαζί με το μολυσμένο νερό σε τάφρους που μεταφέρουν καλώδια και σωληνώσεις. Αυτό οφείλεται τόσο στην πλημμύρα από το τσουνάμι όσο και στη διαρροή από τους αντιδραστήρες. Η απορροή από την τοποθεσία στη θάλασσα μετέφερε επίσης ραδιονουκλεΐδια πολύ πάνω από τα επιτρεπόμενα επίπεδα (Stanford University, 2018).

Αποτελεί σημαντικό να επισημανθεί ότι, μέχρι το τέλος Μαρτίου, όλες οι αποθήκες γύρω από τις τέσσερις μονάδες ήταν σε μεγάλο βαθμό γεμάτες με μολυσμένο νερό που αντλούνταν από τα κτίρια. Περίπου 1000 δεξαμενές αποθήκευσης εγκαταστάθηκαν σταδιακά, συμπεριλαμβανομένων αρχικά 350 χαλύβδινων δεξαμενών με ελαστικές ραφές, η καθεμία χωρητικότητας 1200 m³. Μερικές από αυτές ανέπτυξαν διαρροές το 2013 (Stanford University,2018).

Αντίστοιχα, με την έγκριση της κυβέρνησης, η Terco στις 4-10 Απριλίου απελευθέρωσε στη θάλασσα περίπου 10.400 κυβικά μέτρα ελαφρώς μολυσμένου νερού (0,15 TBq συνολικά) προκειμένου να ελευθερωθεί η αποθήκευση για περισσότερο μολυσμένο νερό από τα κτίρια του αντιδραστήρα και του στροβίλου της μονάδας 2, που χρειάζονταν να αφαιρεθεί για να γίνουν ασφαλείς συνθήκες εργασίας. Η Μονάδα 2 ήταν η κύρια πηγή μολυσμένου νερού, αν και το μεγαλύτερο μέρος του προερχόταν από λάκκους αποστράγγισης. Η NISA επιβεβαίωσε ότι δεν υπήρξε σημαντική αλλαγή στα επίπεδα ραδιενέργειας στη θάλασσα ως αποτέλεσμα της απόρριψης 0,15 TBq (Εισηγητική Έκθεση της Terco,2012).

Μέχρι τα τέλη Ιουνίου 2011, η Terco είχε εγκαταστήσει 109 τσιμεντένια πάνελ για να σφραγίσει τις εισαγωγές νερού των μονάδων 1-4, αποτρέποντας τη διαρροή μολυσμένου νερού στο λιμάνι. Από τα μέσα Ιουνίου, έλαβε χώρα επεξεργασία με ζεόλιθο θαλασσινού νερού στα 30 m³ /hr, η οποία πραγματοποιήθηκε κοντά στις υδροληψίες για τις μονάδες 2 & 3, μέσα σε βυθισμένα εμπόδια που εγκαταστάθηκαν τον Απρίλιο (Εισηγητική Έκθεση της Terco, 2012).

Από τον Οκτώβριο, κατασκευάστηκε ατσάλινο τείχος υδατοθωράκισης στη θάλασσα πρόσοψη των μονάδων 1-4. Εκτείνεται περίπου ένα χιλιόμετρο και κάτω σε ένα αδιαπέραστο στρώμα κάτω από δύο διαπερατά στρώματα, τα οποία δυνητικά διαρρέουν μολυσμένα υπόγεια ύδατα στη θάλασσα. Η περιοχή του εσωτερικού λιμανιού που έχει κάποια μόλυνση είναι περίπου 30 εκτάρια σε έκταση (Εισηγητική Έκθεση της Terco, 2012).

Η Terco κατασκεύασε μια νέα εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων για την επεξεργασία μολυσμένου νερού. Η εταιρεία χρησιμοποίησε τόσο την αποκλειστική προσρόφηση των ΗΠΑ όσο και τις γαλλικές συμβατικές τεχνολογίες στη νέα μονάδα επεξεργασίας 1200 m³ / ημέρα . Τον Αύγουστο του 2011 εγκαταστάθηκε και τέθηκε σε λειτουργία μια συμπληρωματική και απλούστερη μονάδα SARRY για την αφαίρεση

καισίου με χρήση ιαπωνικής τεχνολογίας και κατασκευασμένο από την Toshiba και το The Shaw Group (Εισηγητική Έκθεση της Terco, 2012).

Στις αρχές του 2013, η Terco άρχισε να δοκιμάζει και να θέτει σε λειτουργία το Advanced Liquid Processing System, που αναπτύχθηκε από την EnergySolutions και την Toshiba. Το ALPS είναι ένα χημικό σύστημα που αφαιρεί τα ραδιονουκλεΐδια κάτω από τα νόμιμα όρια για απελευθέρωση. Ωστόσο, επειδή το τρίτιο περιέχεται στα μόρια του νερού, οι ALPS δεν μπορούν να το αφαιρέσουν, γεγονός που δημιουργεί ερωτήματα σχετικά με την απόρριψη επεξεργασμένου νερού στη θάλασσα. Το τρίτιο είναι ένας ασθενής βήτα-εκπομπός που δεν βιοσυσσωρεύεται (διάρκεια ημιζωής 12 χρόνια) και η συγκέντρωσή του έχει μειωθεί σε περίπου 1 MBq/L, στο αποθηκευμένο νερό, με αραιώση από τα υπόγεια νερά που εξισορροπεί την περαιτέρω απελευθέρωση από τα υπολείμματα καυσίμου (Tilman Ruff, 2016).

Το επεξεργασμένο με ALPS νερό αποθηκεύεται επί του παρόντος σε δεξαμενές επιτόπου, οι οποίες θα έχουν πλήρη χωρητικότητα από τα μέσα έως τα τέλη του 2023. Από τον Φεβρουάριο του 2021, περισσότεροι από 1,2 εκατομμύρια τόνοι ήταν αποθηκευμένοι σε περισσότερες από 1000 δεξαμενές στο εργοστάσιο. Ορισμένα από τα επεξεργασμένα ύδατα ALPS θα απαιτήσουν δευτερογενή επεξεργασία για περαιτέρω μείωση των συγκεντρώσεων ραδιονουκλεϊδίων σύμφωνα με τις κυβερνητικές απαιτήσεις (Richard Lloyd Parry, 2022).

Η απόρριψη θα γίνει είτε στην ατμόσφαιρα είτε στη θάλασσα. Τον Νοέμβριο του 2019 το υπουργείο Εμπορίου και Βιομηχανίας δήλωσε ότι τα ετήσια επίπεδα ακτινοβολίας από την απελευθέρωση του μολυσμένου με τρίτιο νερού υπολογίζονται μεταξύ 0,052 και 0,62 μικροσιβερτ, εάν απορριφθούν στη θάλασσα, και 1,3 μικροσιβερτ, εάν απελευθερώνονταν στην ατμόσφαιρα, σε σύγκριση με τα 2100 microsieverts (2,1 mSv) στα οποία εκτίθενται φυσικά οι άνθρωποι ετησίως (Richard Lloyd Parry, 2022).

2.2.8. Αξιολόγηση Διεθνούς Κλίμακας Πυρηνικών Γεγονότων

Η Υπηρεσία Πυρηνικής και Βιομηχανικής Ασφάλειας της Ιαπωνίας αρχικά κήρυξε το ατύχημα Fukushima Daiichi 1-3 ως επίπεδο 5 στη Διεθνή Κλίμακα Πυρηνικών Γεγονότων (INES) – ένα ατύχημα με ευρύτερες συνέπειες, στο ίδιο επίπεδο με το Three Mile Island, το 1979. Η ακολουθία των γεγονότων που σχετίζονται με τη δεξαμενή καυσίμων στη μονάδα 4 βαθμολογήθηκε με INES επίπεδο 3 – ένα σοβαρό περιστατικό (NISA, 2011).

Ωστόσο, ένα μήνα μετά το τσουνάμι, το NSC ανέβασε τη βαθμολογία στο επίπεδο 7 για τις μονάδες 1-3 μαζί, ως «ένα μεγάλο ατύχημα», λέγοντας ότι μια επαναξιολόγηση των πρώιμων εκλύσεων ραδιενεργών ουσιών υποδηλώνει ότι περίπου 630 PBq ισοδύναμου I-131 διέρρευσε στο περιβάλλον κυρίως την πρώτη εβδομάδα. Στη συνέχεια, αυτό ταίριαζε με το κριτήριο για το επίπεδο 7 (NISA & NSC, 2011).

Στις αρχές Ιουνίου η NISA αύξησε την εκτίμηση της για τις εκδόσεις σε 770 PBq, αν και τον Αύγουστο το NSC μείωσε αυτήν την εκτίμηση στα 570 PBq. Για τη Fukushima Daini, η NISA κήρυξε το επίπεδο INES 3 για τις μονάδες 1, 2, 4 ως σοβαρό περιστατικό (NISA & NSC, 2011).

2.2.9. Ευθύνη ατυχήματος και αποζημίωση

Πέρα από οποιαδήποτε ασφάλιση μπορεί να έχει η Terco για τους αντιδραστήρες της είναι το ζήτημα της ευθύνης τρίτων για το ατύχημα. Η Ιαπωνία δεν ήταν συμβαλλόμενο μέρος σε καμία διεθνή σύμβαση ευθύνης, αλλά η νομοθεσία της είναι γενικά σύμφωνη με αυτές, θεσπίζοντας αυστηρή και αποκλειστική ευθύνη για τον φορέα εκμετάλλευσης (Bangkok Post, 2018).

Στις αρχές του 2015, η Ιαπωνία επικύρωσε τη Σύμβαση για την Συμπληρωματική Αποζημίωση για Πυρηνική Ζημιά (CSC). Δύο νόμοι που διέπουν την ευθύνη αναθεωρούνται περίπου κάθε δέκα χρόνια: ο νόμος για την αποζημίωση για πυρηνικές ζημιές και ο νόμος για τη σύμβαση για ασφάλιση ευθύνης για πυρηνικές

ζημιές. Η ευθύνη του χειριστή του εργοστασίου είναι αποκλειστική και απόλυτη (ανεξαρτήτως υπαιτιότητας) και οι φορείς εκμετάλλευσης σταθμών ηλεκτροπαραγωγής πρέπει να παράσχουν ένα ποσό οικονομικής ασφάλειας 120 δισεκατομμυρίων JPY (1,5 δισεκατομμύρια δολάρια) – ήταν το μισό από αυτό που ήταν μέχρι το 2010 (Bangkok Post, 2018).

Στα μέσα Απριλίου 2011, πραγματοποιήθηκε η πρώτη συνεδρίαση μιας επιτροπής για την αποζημίωση για ζημιές που σχετίζονται με πυρηνικά. Η επιτροπή καθόρισε κατευθυντήριες γραμμές για τον καθορισμό του εύρους της αποζημίωσης για ζημιές που προκλήθηκαν από το ατύχημα και για να ενεργήσει ως ενδιάμεσος. Ιδρύθηκε στο Υπουργείο Παιδείας, Πολιτισμού, Αθλητισμού, Επιστήμης και Τεχνολογίας (MEXT) και διευθυνόταν από τον καθηγητή νομικής Yoshihisa Nomi του Πανεπιστημίου Gakushuin στο Τόκιο (Bangkok Post, 2018).

Στις 11 Μαΐου 2011, η Terco αποδέχτηκε τους όρους που καθορίστηκαν από την ιαπωνική κυβέρνηση για κρατική υποστήριξη για την αποζημίωση των πληγέντων από το ατύχημα στο εργοστάσιο της Fukushima Daiichi. Το πρόγραμμα περιελάμβανε ένα νέο κρατικό ίδρυμα για την επιτάχυνση των πληρωμών σε όσους επλήγησαν από το ατύχημα στη Φουκουσίμα Νταϊτσι. Ο οργανισμός λαμβάνει οικονομικές συνεισφορές από εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας με πυρηνικούς σταθμούς στην Ιαπωνία και από την κυβέρνηση μέσω ειδικών ομολόγων που μπορούν να εξαργυρωθούν όποτε είναι απαραίτητο (Εισηγητική Έκθεση της Terco, 2012).

Τα κρατικά ομόλογα ανέρχονται συνολικά σε 5 τρισεκατομμύρια JPY (60 δισεκατομμύρια δολάρια). Η Terco αποδέχτηκε τους όρους που επιβλήθηκαν στην εταιρεία ως μέρος του πακέτου. Αυτό περιελάμβανε τη μη θέσπιση ανώτατου ορίου για τις πληρωμές αποζημίωσης στους πληγέντες, την καταβολή μέγιστων προσπαθειών για τη μείωση του κόστους και τη συμφωνία συνεργασίας με μια ανεξάρτητη επιτροπή που συστάθηκε για τη διερεύνηση της διαχείρισής της (Εισηγητική Έκθεση της Terco, 2012).

Αυτή η Εταιρεία Διευκόλυνσης Αποζημίωσης Πυρηνικών Ζημιών, που ιδρύθηκε από κυβερνητικούς και φορείς εκμετάλλευσης πυρηνικών σταθμών, περιλαμβάνει εκπροσώπους από άλλους πυρηνικούς παραγωγούς και λειτουργεί επίσης ως ασφαλιστής για τη βιομηχανία, έχοντας την ευθύνη να εφαρμόζει σχέδια για τυχόν

μελλοντικά πυρηνικά ατυχήματα. Η πρόβλεψη για συνεισφορές από άλλους πυρηνικούς φορείς εκμετάλλευσης είναι παρόμοια με αυτή των ΗΠΑ (International Business Times, 2011).

Η κυβέρνηση εκτιμά ότι η Terco θα είναι σε θέση να ολοκληρώσει τις αποπληρωμές της σε 10 έως 13 χρόνια, μετά τα οποία θα επανέλθει σε μια πλήρως ιδιωτική εταιρεία, χωρίς κρατική ανάμειξη. Εν τω μεταξύ, θα πληρώνει ένα ετήσιο τέλος για την κρατική υποστήριξη, θα διατηρεί επαρκή τροφοδοτικά και θα διασφαλίζει την ασφάλεια των εγκαταστάσεων. Ακόμη, η Terco εκτίμησε ότι το επιπλέον κόστος της για ορυκτά καύσιμα το 2011-12 (Απρίλιος-Μάρτιος) θα ήταν περίπου 830 δισεκατομμύρια JPY (11 δισεκατομμύρια δολάρια) (International Business Times, 2011).

Στις 14 Ιουνίου 2011, το υπουργικό συμβούλιο της Ιαπωνίας ενέκρινε το νομοσχέδιο για την αποζημίωση για την πυρηνική καταστροφή. Στη συνέχεια, εγκρίθηκε και σχετικός προϋπολογισμός για τη χρηματοδότηση της ανοικοδόμησης μετά το τσουνάμι (International Business Times, 2011).

Τον Σεπτέμβριο του 2011, η Διευκόλυνση Αποζημίωσης Πυρηνικών Ζημιών ξεκίνησε συνεργαζόμενη με την Terco, για τη σύνταξη ενός επιχειρηματικού σχεδίου για την επόμενη δεκαετία. Αυτό εγκρίθηκε από το Υπουργείο Οικονομίας, Εμπορίου και Βιομηχανίας (METI), ώστε περίπου 900 δισεκατομμύρια ¥ (12 δισεκατομμύρια δολάρια) να μπορούν να αποδεσμευτούν από την εταιρεία μέσω ομολόγων που εκδόθηκαν από το Ταμείο Διευκόλυνσης Πυρηνικών Ζημιών για την κάλυψη των πληρωμών αποζημίωσης έως τον Μάρτιο του 2012 (METI, 2012).

Επίσης, η Terco περιόρισε το κόστος της κατά 2545 δισεκατομμύρια ¥ (33 δισεκατομμύρια δολάρια) τα επόμενα δέκα χρόνια, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης 7400 θέσεων εργασίας. Αυτό το ειδικό επιχειρηματικό σχέδιο αντικαταστάθηκε από ένα πιο ολοκληρωμένο επιχειρηματικό σχέδιο τον Μάρτιο του 2012, το οποίο αφορούσε πληρωμές αποζημιώσεων ύψους 910 δισεκατομμυρίων ¥ (12 δισεκατομμυρίων δολαρίων) ετησίως. Η Terco ήθελε να συμπεριλάβει στο σχέδιο αύξηση των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας κατά 17% (METI, 2012).

Τον Φεβρουάριο του 2012, η METI ενέκρινε επιπλέον 690 δισεκατομμύρια ¥ (9 δισεκατομμύρια δολάρια) ως αποζημίωση από το Ταμείο Διευκόλυνσης Ευθύνης

Πυρηνικής Ζημίας, με την επιφύλαξη του επιχειρηματικού σχεδίου της Terco που παρέχει στην κυβέρνηση δικαιώματα ψήφου (METI, 2012).

Τον Ιούνιο του 2012, οι μέτοχοι ψήφισαν να πουλήσουν, στην ιαπωνική κυβέρνηση, το 50,11% των μετοχών με δικαίωμα ψήφου της Terco και ένα επιπλέον 25,73% χωρίς δικαίωμα ψήφου, έναντι 1 τρισεκατομμυρίου ¥ (περίπου 13 δισεκατομμύρια δολάρια), που καταβλήθηκαν μέσω του Ταμείου Διευκόλυνσης Ευθύνης Πυρηνικής Ζημίας. Αυτό πραγματοποιήθηκε στα τέλη Ιουλίου, έτσι ώστε η Terco στη συνέχεια να τεθεί υπό τον έλεγχο της κυβέρνησης, τουλάχιστον προσωρινά. Η Terco είπε ότι εκτίμησε την ευκαιρία να «μεταμορφωθεί σε New Terco» (METI, 2012).

Η κυβέρνηση και 12 επιχειρήσεις κοινής ωφελείας συνεισφέρουν κεφάλαια στο νέο ίδρυμα για την καταβολή αποζημιώσεων σε άτομα και επιχειρήσεις που διεκδικούν αποζημιώσεις, για τις ζημιές που προκλήθηκαν από το ατύχημα. Έλαβε 7 δισεκατομμύρια ¥ (90 εκατομμύρια δολάρια) σε δημόσιους πόρους καθώς και συνολικά 7 δισεκατομμύρια ¥ από 12 φορείς εκμετάλλευσης πυρηνικών σταθμών, με το μερίδιο της Terco ύψους 2379 εκατομμυρίων ¥ (30 εκατομμύρια δολάρια) να είναι το μεγαλύτερο (Εισηγητικές Εκθέσεις της Terco, 2012-2013-2014-2015).

Το ποσοστό των συνεισφορών κοινής ωφέλειας καθορίστηκε σε αναλογία με την παραγωγή ισχύος των εργοστασίων τους, έτσι η Kansai Electric Power παρείχε 1229 εκατομμύρια ¥, ακολουθούμενη από 660 εκατομμύρια ¥ από την Kyushu Electric Power και 622 εκατομμύρια ¥ από την Chubu Electric Power. Η Japan Nuclear Fuel Ltd., η οποία διαθέτει μονάδα επανεπεξεργασίας μεταχειρισμένων πυρηνικών καυσίμων στην επαρχία Αομόρι, παρείχε 117 εκατομμύρια ¥ στην οντότητα. Οι εταιρείες κοινής ωφέλειας καταβάλλουν και ετήσιες εισφορές στον φορέα. Ωστόσο, η Terco υποχρεούται να καταβάλει επιπλέον συνεισφορές (Εισηγητικές Εκθέσεις της Terco, 2012-2013-2014-2015).

Τον Ιούνιο του 2013, η Terco ζήτησε περαιτέρω κρατική στήριξη ύψους 666 δισεκατομμυρίων ¥ (6,7 δισεκατομμύρια δολάρια) μέσω του Ταμείου Διευκόλυνσης Ευθύνης Πυρηνικών Ζημιών, ανεβάζοντας το συνολικό ποσό που ζητήθηκε από την Terco σε 3,79 τρισεκατομμύρια ¥ (40 δισεκατομμύρια δολάρια). Η εταιρεία είπε ότι περισσότερο από το ήμισυ του αιτήματος –περίπου 370 δισεκατομμύρια ¥ (4 δισεκατομμύρια δολάρια)– προέκυψε από την επαναξιολόγηση της ζώνης εκκένωσης γύρω από το κατεστραμμένο εργοστάσιο και την επανεξέταση του εκτιμώμενου

ποσού «σχετικά με την αποζημίωση για ψυχικές βλάβες, απώλεια ή υποτίμηση τιμαλφών, όπως κατοικίες και κτίρια» (Εισηγητική Έκθεση Terco,2013).

Επιπρόσθετα, περίπου 43 δισεκατομμύρια ¥ (430 εκατομμύρια δολάρια) οφείλονταν σε υψηλότερη εκτίμηση αποζημίωσης που προέρχεται από ζημιές στη γεωργία, τη δασοκομία και την αλιεία, καθώς και στη βιομηχανία επεξεργασίας και διανομής τροφίμων. Αυτό, αναφέρθηκε ότι προήλθε επίσης από "επιβλαβείς φήμες" σχετικά με τις πιθανές επιπτώσεις στην υγεία από την κατανάλωση τροφίμων από την περιοχή κοντά στον κατεστραμμένο σταθμό ηλεκτροπαραγωγής. Καθώς οι περιορισμοί στη μεταφορά τροφίμων από την περιοχή της Φουκουσίμα φαινόταν ότι θα συνεχιστούν, συμπεριλήφθηκαν επιπλέον 240 δισεκατομμύρια ¥ (2 δισεκατομμύρια δολάρια) για την κάλυψη των περαιτέρω αξιώσεων αποζημίωσης που προκύπτουν από αυτό (Εισηγητική Έκθεση Terco,2013).

Μέχρι τα μέσα Μαΐου 2014, η Terco είχε πληρώσει 3808 δισεκατομμύρια ¥ (40 δισεκατομμύρια δολάρια) σε αποζημίωση, αρκετά ομοιόμορφα κατανεμημένη μεταξύ επιχειρήσεων και ιδιωτών, με βάση τις αποφάσεις της Nuclear Damage Compensation Facilitation Corporation και καλυπτόμενη από δάνεια από το NDLF Fund. Περίπου 16 δισεκατομμύρια δολάρια από αυτά κατανεμήθηκαν ομοιόμορφα μεταξύ 85.000 εκτοπισθέντων - 188.200 δολάρια κάθε άτομο, συμπεριλαμβανομένων των παιδιών, σύμφωνα με τις οδηγίες στις αρχές του 2011(Fukushima Inform, 2016).

Τον Ιούλιο του 2015 η κυβέρνηση ενέκρινε το σχέδιο ανάκαμψης της Terco, συμπεριλαμβανομένων πληρωμών αποζημίωσης ύψους 7075 δισεκατομμυρίων ¥ (57 δισεκατομμύρια δολάρια), επιτρέποντάς της να λάβει 950 δισεκατομμύρια ¥ περισσότερα από τα 6125 δισεκατομμύρια ¥ που εκτιμήθηκε τον Απρίλιο, σύμφωνα με το METI (METI, 2015).

Ακόμη, σχετικά με τις αποζημιώσεις στους εκτοπισμένους, από τον Ιανουάριο του 2021 οι εκτοπισμένοι από το ατύχημα της Φουκουσίμα είχαν λάβει 9,7 τρισεκατομμύρια ¥. Αυτά αντιστοιχούσαν σε προσωπική και περιουσιακή αποζημίωσή τους (METI, 2015).

Νωρίτερα, τον Δεκέμβριο του 2013, η κυβέρνηση αύξησε το ανώτατο όριο της οικονομικής της βοήθειας προς την Terco, από 5 τρισεκατομμύρια ¥ σε 9 τρισεκατομμύρια ¥ (86 δισεκατομμύρια δολάρια). Στις αρχές του 2014, η κυβέρνηση υπολόγισε ότι θα χρειαζόταν 11 τρισεκατομμύρια ¥ και 40 χρόνια για να καθαριστεί η

τοποθεσία της Φουκουσίμα, αφού το εμπορικό έλλειμμα της Ιαπωνίας το 2013 ήταν 11,5 τρισεκατομμύρια ¥ (Fukushima Inform, 2016).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΑ ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΖΩΕΣ ΤΩΝ ΑΝΘΡΩΠΩΝ

Το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου σηματοδότησε την αρχή της ατομικής εποχής, όταν μια σειρά από κράτη ξεκίνησαν την κούρσα των πυρηνικών εξοπλισμών. Αρχικά, στο συνεργιστικό πλαίσιο της γεωπολιτικής του Ψυχρού Πολέμου και της έλλειψης αποτελεσματικών διεθνών πολιτικών αφοπλισμού, χώρες όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, η ΕΣΣΔ, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Γαλλία και η Κίνα έγιναν πυρηνικές δυνάμεις κατά την περίοδο 1945-1964 (Katz, 2008; Schenck and Youmans, 2012). Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, ένας μεγάλος αριθμός πυρηνικών εργοστασίων αναπτύχθηκε σε διεθνές επίπεδο, τόσο μέσα ή κοντά σε αστικά κέντρα όσο και σε ερημικές απόμακρες τοποθεσίες (Katz, 2008; Schenck and Youmans, 2012).

Μεταξύ 1945 και 1963, οι Ηνωμένες Πολιτείες και η ΕΣΣΔ πραγματοποίησαν μεγάλο αριθμό πυρηνικών δοκιμών στην ατμόσφαιρα, με πιο αντιπροσωπευτικά παραδείγματα οι πρώτες πυρηνικές εκρήξεις της βόμβας υδρογόνου που πραγματοποιήθηκαν το 1954 από τις Ηνωμένες Πολιτείες, στα νησιά Μάρσαλ, και το 1961 από την ΕΣΣΔ στο αρχιπέλαγος Novaya Zemlia, βόρεια των βουνών των Ουραλίων (η δοκιμή του Τσάρου) (Goodby, 2005).

Η σοβαρή περιβαλλοντική ζημιά που προκαλείται από αυτές τις πυρηνικές δοκιμές, τις πιο ισχυρές που έχουν πραγματοποιηθεί ποτέ στην ατμόσφαιρα, καθώς και το γενικό πλαίσιο της ανάπτυξης πυρηνικών εργοστασίων παγκοσμίως, έχουν δημιουργήσει τις βάσεις της πρώτης φάσης της διεθνούς συνεργασίας για την εξάλειψη της δοκιμής των πυρηνικών όπλων και της δημιουργίας νέων πυρηνικών εργοστασίων (Goodby, 2005).

Έτσι, το 1963 σηματοδότησε ορόσημο με την έναρξη ισχύος της Συνθήκης για την Περιορισμένη Απαγόρευση των Πυρηνικών Δοκιμών (LTBT), και την απαγόρευση ανεξέλεγκτης κατασκευής πυρηνικών εργοστασίων (Rubinson, 2011). Αν και δεν υπογράφηκε από δύο βασικά κράτη —τη Γαλλία και την Κίνα (Mastny, 2008), η συνθήκη είχε πραγματικό αντίκτυπο στον περιορισμό των ραδιενεργών ισοτόπων στην ατμόσφαιρα, στα δύο ημισφαίρια από το 1963 και μετά. (Levin et al., 1994).

Η έναρξη ισχύος της Συνθήκης για τη μη διάδοση των πυρηνικών όπλων (NPT) το 1968, που απαγόρευε τον πυρηνικό οπλισμό όλων των κρατών του κόσμου, με εξαίρεση τις πέντε υπάρχουσες πυρηνικές δυνάμεις, ήταν μια άλλη βασική στιγμή στις προσπάθειες για τον τερματισμό της κούρσας πυρηνικών εξοπλισμών και, έμμεσα, δοκιμές πυρηνικών όπλων (van der Meer, 2011).

Το 1996, ξεκίνησε μια νέα φάση στη διακοπή όλων των τύπων πυρηνικής εξέλιξης, με την έγκριση των Ηνωμένων Εθνών. Ωστόσο, ο μεγάλος αριθμός των πυρηνικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στην ατμόσφαιρα και στο υπέδαφος κατά την περίοδο 1945–2013 (η τελευταία πυρηνική δοκιμή έγινε από τη Βόρεια Κορέα) ήταν υπεύθυνος για την τρέχουσα περιβαλλοντική μόλυνση με ραδιενεργά απόβλητα, το οποίο οδήγησε σε οικολογικά και κοινωνικά καταστρεφόμενες τοποθεσίες λόγω υψηλών επιπέδων ραδιενέργειας (van der Meer, 2011).

Το κεφάλαιο αυτό αναλύει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούνται από τα πυρηνικά ατυχήματα, συζητώντας κυρίως το θέμα της μόλυνσης του περιβάλλοντος της ατμόσφαιρας και των ωκεανών τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε περιφερειακό πλαίσιο. Επίσης, γίνεται αναφορά σε θέματα που αφορούν την ανθρώπινη έκθεση στη ραδιενεργή ρύπανση.

3.1. Ραδιενεργή Ρύπανση της Ατμόσφαιρας και του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος

Περίπου το 90% όλων των πυρηνικών δοκιμών και των πυρηνικών εργοστασίων αναπτύχθηκαν στο βόρειο ημισφαίριο, ιδιαίτερα από τις ΗΠΑ, την ΕΣΣΔ/Ρωσία και την Κίνα, και μόνο το 10% στο νότιο ημισφαίριο, από χώρες όπως η Γαλλία και το Ηνωμένο Βασίλειο. Επομένως, το βόρειο ημισφαίριο είναι πιο μολυσμένο από το νότιο λόγω της παρουσίας μεγάλων ποσοτήτων ραδιενεργών ισοτόπων (ειδικά ^{14}C , ^{137}Cs και ^{90}Sr) που απελευθερώθηκαν στην ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια πυρηνικών δοκιμών (UNSCEAR, 2007).

Ακόμη, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η υψηλότερη ραδιενέργεια του βόρειου ημισφαιρίου οφείλεται επίσης σε άλλους παράγοντες, όπως ατυχήματα πυρηνικών σταθμών παραγωγής ενέργειας. Τα πιο αντιπροσωπευτικά παραδείγματα είναι τα ατυχήματα στο Τσερνόμπιλ (1986) και στο Fukushima Daiichi (2011) (Grandin et al., 2011; Högberg, 2013), τα οποία είχαν ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση μεγάλων

ποσοτήτων ραδιονουκλεϊδίων στην ατμόσφαιρα, από τα οποία τα σημαντικότερα είναι τα ^{137}Cs και τα ^{131}I (UNSCEAR, 1988; IAEA, 2012).

Οι παραπάνω δοκιμές και τα ατυχήματα περιλάμβαναν την απελευθέρωση σημαντικών ποσοτήτων ραδιενεργών υλικών απευθείας στο περιβάλλον και προκάλεσαν τη μεγαλύτερη συλλογική δόση από ανθρωπογενείς πηγές ακτινοβολίας (UNSCEAR, 2000a). Μεταξύ των πιο σχετικών μελετών για τη συνολική συλλογική δόση στον παγκόσμιο πληθυσμό, ξεχωρίζουν οι εκθέσεις τις UNSCEAR, ειδικά αυτές που συντάχθηκαν το 1982 (UNSCEAR, 1982) και το 1993 (UNSCEAR, 1993), οι οποίες θεωρούνται πλήρεις και έγκυρες ακόμη και σήμερα (UNSCEAR, 2008a).

Σύμφωνα με την έκθεση UNSCEAR (1993), μετά από ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές, ο κύριος συνεισφέρων στη συνολική δέσμευση αποτελεσματικής δόσης για τον παγκόσμιο πληθυσμό είναι ^{14}C , συνεισφορά του οποίου είναι 70 % κατά τη διάρκεια χιλιάδων ετών (από τη συνολική δόση των 3700 μSv , το ραδιονουκλίδιο ^{14}C αντιστοιχεί σε 2580 μSv). Σημαντικά ποσοστά ανευρίσκονται επίσης στις περιπτώσεις ραδιονουκλεϊδίων, ^{137}Cs (13 %) και ^{90}Sr (3 %), καθώς και επτά άλλα ραδιονουκλεΐδια με τιμές ποσοστού αποτελεσματικής ραδιενεργού δόσης να κυμαίνονται από 1,1 έως 2,4 %. Εκτιμάται ότι, εκτός από το ραδιονουκλίδιο ^{14}C , τα περισσότερα από τα άλλα ραδιονουκλεΐδια θα έχουν εκδηλώσει όλες τις συνέπειες τους στους επόμενους δύο αιώνες (UNSCEAR, 1993).

Ως εκ τούτου, οι θερμοπυρηνικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, κατά την περίοδο 1950-1960, σχεδόν διπλασίασαν τη συγκέντρωση του ισοτόπου ^{14}C στην ατμόσφαιρα, ως αποτέλεσμα της υπερβολικής έγχυσης ραδιενεργού υλικού στη στρατόσφαιρα (Goodsite et al., 2001). Έτσι, δημιουργήθηκαν οι προϋποθέσεις για μια επιταχυνόμενη μεταφορά αυτού του ισοτόπου στις γεωσφαίρες (ατμόσφαιρα-ωκεανός-βιόσφαιρα), που είχε ως αποτέλεσμα την πτώση των συγκεντρώσεων ^{14}C στην ατμόσφαιρα, ξεκινώντας από το 1964 έως τα τελευταία χρόνια (Krakauer et al., 2006).

Η μεταφορά του ραδιονουκλιδίου ^{14}C στο θαλάσσιο περιβάλλον ήταν δυνατή μέσω της ανταλλαγής αερίων στον χώρο παρεμβολής ωκεανού-ατμόσφαιρας. Μία από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται, για την αναδόμηση των διακυμάνσεων του στον ωκεανό, συνίσταται στη μέτρηση της συγκέντρωσής του σε υδρόβιους οργανισμούς, δεξαμενές που αποθηκεύουν ^{14}C . Ένα παράδειγμα είναι το δίθυρο μαλάκιο *Arctica*

islandica, το οποίο χρησίμευσε στην αναδόμηση των διακυμάνσεων του ραδιονουκλιδίου ^{14}C στο θαλάσσιο περιβάλλον, στην εύκρατη ζώνη του Βόρειου Ατλαντικού (Scourse et al., 2012).

Μετά από λεπτομερείς έρευνες, διαπιστώθηκε ότι τις τελευταίες πέντε δεκαετίες, υπήρξε συνεχής μεταφορά του ραδιονουκλεϊδίου ^{14}C από την ατμόσφαιρα στον ωκεανό (όσον αφορά τον Βόρειο Ατλαντικό), αλλά υπάρχουν διαφορές ως προς την αφομοίωση από το θαλάσσιο περιβάλλον. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει μια διακύμανση πλάτους μέγιστων-ελάχιστων τιμών, η οποία μετριάστηκε σημαντικά και επίσης καθυστερούσε πολύ σε σύγκριση με τις τιμές συγκέντρωσης στην ατμόσφαιρα (κορυφές κατά την περίοδο 1964-1965, ακολουθούμενη από μια σταθερή πτώση μέχρι σήμερα, σε σύγκριση με τις τιμές από το θαλάσσιο περιβάλλον, κορυφώνοντας το 1974 ακολουθούμενη από σταθερή πτώση μέχρι το έτος των τελευταίων διαθέσιμων στοιχείων, δηλαδή το 1996) (Scourse et al. 2012).

Η παραπάνω κατάσταση οφείλεται κυρίως στις πολύ μεγαλύτερες θαλάσσιες δεξαμενές αποθήκευσης άνθρακα, σε σύγκριση με τις δεξαμενές αποθήκευσης στην ατμόσφαιρα, καθώς και στα περιφερειακά υδρογραφικά και βιογεωχημικά χαρακτηριστικά (Scourse et al. 2012). Αν και η γήινη βιόσφαιρα έχει παίξει σημαντικό ρόλο στην αφομοίωση του ραδιονουκλιδίου ^{14}C από την ατμόσφαιρα, μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης, ο ωκεανός ήταν η μεγαλύτερη δεξαμενή αποθήκευσης αυτού του ραδιονουκλιδίου (Levin et al., 2010).

Ως εκ τούτου, όσον αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, το θαλάσσιο περιβάλλον έχει παίξει ουσιαστικό ρόλο στον περιορισμό αυτών των επιπτώσεων μέσω της μεγάλης ικανότητας αφομοίωσής του, αν και υπάρχουν και ορισμένες αρνητικές πτυχές σχετικά με τη συσσώρευση ραδιονουκλεϊδίων στους υδρόβιους οργανισμούς. Διαφορετικά, θα υπήρχε μεγάλος κίνδυνος το ραδιονουκλίδιο ^{14}C να αφομοιωθεί σε τεράστιες ποσότητες στη βιόσφαιρα (ειδικά από τα δασικά οικοσυστήματα), και στη συνέχεια να αφομοιωθεί και στην τροφική αλυσίδα (συμπεριλαμβανομένου του ανθρώπινου σώματος) (Levin et al., 2010).

Ένα άλλο ραδιονουκλίδιο υψίστης σημασίας για την υπολειμματική παγκόσμια μόλυνση από ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές και τα πυρηνικά ατυχήματα είναι τα ^{137}Cs , με χρόνο ημιζωής 30 ετών. Απελευθερώθηκε σε μεγάλες ποσότητες κατά τη διάρκεια ατμοσφαιρικών δοκιμών και ατυχημάτων και συνεχίζει να αποτελεί

σημαντική πηγή ανθρωπογενούς ραδιενέργειας. Καθώς περισσότερο από το 70% της επιφάνειας της Γης καλύπτεται από νερό, οι μεγαλύτερες ποσότητες ραδιενεργών υπολειμμάτων ^{137}Cs συσσωρεύονται σε ωκεανούς και θάλασσες. Επί του παρόντος, εκτιμάται ότι το ραδιονουκλίδιο ^{137}Cs είναι η κύρια πηγή ανθρωπογενούς θαλάσσιας ραδιενέργειας, μαζί με άλλα σημαντικά ραδιονουκλεΐδια (κυρίως ^{90}Sr , $^{239-240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^3H και ^{14}C), που απελευθερώθηκαν σε μεγάλες ποσότητες κατά τη διάρκεια πυρηνικών ατυχημάτων (ΙΑΕΑ, 1995).

Αν και η παγκόσμια κλιματική καμπή θεωρείται ότι είναι η κύρια πηγή ραδιενέργειας ^{137}Cs στο θαλάσσιο περιβάλλον (το 2000, οι περισσότερες θαλάσσιες περιοχές είχαν συγκεντρώσεις ραδιονουκλεϊδίων ^{137}Cs που κυμαίνονταν από 1 έως 10 Bq/m^3), είναι αξιοσημείωτο ότι ο υψηλότερος μέσος όρος ^{137}Cs καταγράφηκε στον Βορειοανατολικό Ατλαντικό Ωκεανό (Ιρλανδία και Βόρεια Θάλασσα), στην Θάλασσα Μπάρεντς, στην Βαλτική Θάλασσα και στην Μαύρη Θάλασσα (οι μέσες συγκεντρώσεις υπερέβησαν το όριο των 10 Bq/m^3 το 2000). Επίσης, η ραδιενέργεια αυτών των θαλάσσιων περιοχών προέρχεται από τα συγκλίνοντα αποτελέσματα των πρόσθετων πηγών (Livingston και Provinec 2000).

Η υψηλότερη μέση συγκέντρωση ^{137}Cs , παγκοσμίως, βρέθηκε στη Βαλτική Θάλασσα, δηλαδή περίπου 100 Bq/m^3 . Αν και σε αυτές τις περιπτώσεις, οι πυρηνικές δοκιμές είχαν σημαντική συμβολή ραδιενέργειας (κυρίως στη Θάλασσα του Μπάρεντς, όπου οι υψηλές συγκεντρώσεις ^{137}Cs οφείλονται στα ραδιενεργά συντρίμια που προκύπτουν από τη δραστηριότητα της δοκιμαστικής τοποθεσίας Novaya Zemlya), οι κύριες πηγές ραδιενέργειας είναι οι Sellafield και οι Μονάδες επανεπεξεργασίας της Χάγης για τον Βορειοανατολικό Ατλαντικό και το ατύχημα του Τσερνόμπιλ για τη Βαλτική Θάλασσα και τη Μαύρη Θάλασσα (ΔΟΑΕ, 1995).

Ωστόσο, μειώσεις στις συγκεντρώσεις του ^{137}Cs έχουν παρατηρηθεί πρόσφατα σε πολλές θαλάσσιες περιοχές παγκοσμίως. Για παράδειγμα, στη Θάλασσα Μπάρεντς, οι μέσες συγκεντρώσεις των επιφανειακών υδάτων μειώθηκαν από 40 Bq/m^3 το 1979 σε περίπου 10 Bq/m^3 το 2000 (ΙΑΕΑ, 2000; Livingston and Provinec, 2000). Αυτή η αλλαγή μπορεί να αποδοθεί όχι μόνο σε σημαντικές μειώσεις στην τοπική πτώση αλλά και στη μείωση της απόρριψης ^{137}Cs από το εργοστάσιο επανεπεξεργασίας ραδιενεργών υλικών του Sellafield (ΙΑΕΑ, 2000; Livingston and Provinec, 2000).

Μια σημαντική πτυχή αυτού του ραδιονουκλιδίου σχετίζεται με τη συσσώρευση θαλάσσιου βιολογικού οργανισμού και την επακόλουθη μεταφορά στο ανθρώπινο σώμα μέσω των κύκλων της τροφικής αλυσίδας. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη αυτό το είδος μεταφοράς αποκλειστικά, η ραδιολογική επίδραση στον παγκόσμιο πληθυσμό είναι αμελητέα, επειδή το 2000 η μέση ετήσια δόση ήταν 3 μSv (για μια υποθετική ομάδα που ζει στην περιοχή των ακτών του Βορειοανατολικού Ατλαντικού με μέση κατανάλωση 100 kg ψαριού και 10 kg οστρακοειδών ετησίως), η οποία είναι σημαντικά χαμηλότερη από την αποδεκτή τιμή του 1 mSv (Livingston and Provinec, 2000).

Το ^{90}Sr (χρόνος ημιζωής 28,8 χρόνια) είναι επίσης ένα ιδιαίτερα αξιοσημείωτο ραδιονουκλίδιο, το οποίο απελευθερώνεται σε μεγάλες ποσότητες στο χερσαίο και θαλάσσιο περιβάλλον κατά τη διάρκεια πυρηνικών ατυχημάτων. Διαπιστώθηκε ότι το 90% της συνολικής εναπόθεσης ^{90}Sr και ^{137}Cs συμβαίνει ως υγρή εναπόθεση κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων (UNSCEAR, 2000). Από αυτή την άποψη, υπάρχουν κοινά χαρακτηριστικά στα πυρηνικά ατυχήματα όπως στο Τσερνόμπιλ, που αφορούσε τη μεταφορά του ραδιονουκλιδίου ^{90}Sr από ατμόσφαιρα σε επίπεδο εδάφους σε ποσοστό περίπου 96 % ως υγρή εναπόθεση (WHO, 2010).

Όπως και στην περίπτωση του ραδιονουκλιδίου, ^{137}Cs , δύο από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές συνέπειες της μεταφοράς του ^{90}Sr ραδιονουκλιδίου στο χερσαίο περιβάλλον είναι η εναπόθεση του στο έδαφος και η μεταφορά από το έδαφος στο φυτό, σε μια εποχή με πολλές ιδιαιτερότητες (Zhu and Shaw, 2000). Στη συνέχεια, η μεταφορά στο ανθρώπινο σώμα, μέσω των κύκλων της τροφικής αλυσίδας, ήταν η κύρια απειλή για την υγεία του ανθρώπινου πληθυσμού (UNSCEAR, 1993-UNSCEAR, 2000).

Όσον αφορά το θαλάσσιο περιβάλλον, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των θαλάσσιων και ωκεανών μεταφορών είναι ο μηχανισμός μεταφοράς της απορροής των ποταμών (υδάτων και ιζημάτων), ο οποίος φαίνεται να ήταν εξαιρετικά γρήγορος σε πολλές περιοχές του κόσμου (ιδιαίτερα στην περιοχή του Ειρηνικού, όπου οι εκκρίσεις των ποταμών είναι σαφώς υψηλές), σε σύγκριση με άλλα ραδιονουκλίδια (Hamilton et al., 1996).

Ωστόσο, δεδομένου του συνεργικού πλαισίου των παγκόσμιων και τοπικών απορρίψεων των εγκαταστάσεων επανεπεξεργασίας, ο Βόρειος Ατλαντικός είναι, και

σε αυτήν την περίπτωση, μεταξύ των πιο βαριά μολυσμένων θαλάσσιων περιοχών στον κόσμο. Παρόλα αυτά, τις τελευταίες δεκαετίες, το επίπεδο ραδιενέργειας μειώθηκε στις περισσότερες περιοχές, ακόμη και σε εκείνες με τη μεγαλύτερη έκθεση σε επιπτώσεις πυρηνικών δοκιμών (ΔΟΑΕ, 2000).

3.2. Έκθεση ανθρώπινης υγείας

Όσον αφορά τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, εξειδικευμένες μελέτες έχουν δείξει ότι ο καρκίνος του θυρεοειδούς είναι η σημαντικότερη συνέπεια των πυρηνικών δοκιμών και των πυρηνικών ατυχημάτων, κυρίως λόγω του ραδιονουκλιδίου ^{131}I (UNSCEAR, 2006). Ενώ, οι Ηνωμένες Πολιτείες είναι ένα από τα πιο σχετικά παραδείγματα για σημαντικές αυξήσεις στη συχνότητα εμφάνισης καρκίνου του θυρεοειδούς τις τελευταίες δεκαετίες (Gilbert et al., 1998; Gilbert et al., 2010), παρόμοια αύξοντα μοτίβα έχουν εντοπιστεί και σε άλλες περιοχές του κόσμου, όπου το ραδιονουκλίδιο ^{131}I απελευθερώθηκε κατά τη διάρκεια ατμοσφαιρικών πυρηνικών δοκιμών ή ατυχημάτων.

Σύμφωνα με το Εθνικό Ινστιτούτο Καρκίνου της Αμερικής (NCI, 1997a), το 99% του ραδιονουκλιδίου που απελευθερώθηκαν κατά τη διάρκεια των πυρηνικών δοκιμών των ΗΠΑ, οφείλονται σε ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή δοκιμών της Νεβάδα, ειδικά μεταξύ 1951 και 1958 (NCI, 1997a). Αν και έχουν χαμηλό χρόνο ημιζωής (8 ημέρες), προκάλεσαν τη μόλυνση του αμερικανικού πληθυσμού μέσω των βροχοπτώσεων και της αποθήκευσης τους στο έδαφος. Εξαιρετικές περιπτώσεις ραδιενεργής μόλυνσης του εδάφους καταγράφηκαν στις πολιτείες της Νεβάδα, της Γιούτα και του Νέο Μέξικο (NCI, 1997a).

Ωστόσο, το γεγονός ότι υπάρχουν ορισμένες χωρικές διαφορές μεταξύ της ραδιενεργής σκόνης ^{131}I , που εναποτίθεται στο επίπεδο του εδάφους, και τις τιμές δόσης του καρκίνου του θυρεοειδούς του πληθυσμού, πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω. Σύμφωνα με την έκθεση της NCI (NCI, 1997b,c,d), η αρχική κατακράτηση ραδιονουκλεϊδίων από τη βλάστηση (από τη χλόη), τα εδαφικά διαφοροποιημένα επίπεδα κατανάλωσης από τις αγελάδες, και ιδιαίτερα η δυναμική του μηχανισμού επεξεργασίας-διανομής-κατανάλωσης μολυσμένου γάλακτος (κατά την πέμπτη δεκαετία του τελευταίου αιώνα), αντιπροσωπεύουν τις κύριες αιτίες για

τις χωρικές ασυνέπειες μεταξύ της ραδιενεργής μόλυνσης του εδάφους και της εμφάνισης καρκίνου στον παγκόσμιο πληθυσμό (NCI, 1997b,c,d).

Επομένως, ένας από τους σημαντικότερους φορείς μετάδοσης του εν λόγω ραδιενεργού ισοτόπου, ειδικά μεταξύ 1950 και 1960, ήταν η μεγάλης κλίμακας διαδικασία διανομής-κατανάλωσης μολυσμένου γάλακτος σε διάφορες περιοχές του κόσμου. Αυτή η αυξημένη τιμή του θυρεοειδούς θα μπορούσε να ευθύνεται για την αύξηση της εμφάνισης του καρκίνου του θυρεοειδούς τις τελευταίες δεκαετίες, τουλάχιστον για τις σοβαρά πληγείσες περιοχές από πυρηνικά ατυχήματα. Στην περίπτωση αυτή, το ποσοστό επίπτωσης μπορεί να θεωρηθεί σχετικός δείκτης, καθώς ο καρκίνος του θυρεοειδούς συνήθως χαρακτηρίζεται από νοσηρότητα και σχεδόν ποτέ από θνησιμότητα (Pellegriti et al., 2013).

Αναλύοντας τη δυναμική επίπτωσης του θυρεοειδούς κατά τις τελευταίες δεκαετίες, όλες οι περιπτωσιολογικές μελέτες έδειξαν σημαντικές αυξήσεις και ιδιαίτερα στις γυναίκες. Η σημαντική αύξηση των περιστατικών θυρεοειδούς μπορεί επίσης να σχετίζεται στενά με τις θεραπείες ακτινοβολίας ή άλλους παράγοντες κινδύνου (που συνδέονται κυρίως με ιατρικές διαδικασίες), τα οποία έχουν γίνει όλο και πιο συχνές τις τελευταίες τρεις δεκαετίες σε παγκόσμια κλίμακα (Pellegriti et al., 2013).

Ως αποτέλεσμα, αν και είναι δύσκολο να προσδιοριστούν σωστά οι παράγοντες κινδύνου που ευθύνονται για την αύξηση της συχνότητας εμφάνισης καρκίνου του θυρεοειδούς τις τελευταίες δεκαετίες, οι περισσότερες μελέτες έχουν δείξει ότι η περιβαλλοντική έκθεση στο ^{131}I από ατμοσφαιρικές πυρηνικές δοκιμές/πυρηνικά ατυχήματα είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας. Σε παγκόσμιο πλαίσιο, το ατύχημα του Τσερνόμπιλ μπορεί να ήταν μια επιπλέον σημαντική αιτία αύξησης της συχνότητας εμφάνισης του καρκίνου του θυρεοειδούς τις τελευταίες δεκαετίες. Τέλος, η ηλικία της έκθεσης είναι μία από τις πιο σημαντικές μεταβλητές, καθώς τα άτομα που εκτίθενται σε ραδιενεργό ιώδιο ως παιδιά μπορεί να παρουσιάζουν υψηλότερο κίνδυνο εκδήλωσης καρκίνου του θυρεοειδούς ακόμη και δεκαετίες μετά τα πυρηνικά ατυχήματα (Pellegriti et al., 2013).

3.3. Ο ρόλος του υγειονολόγου

Ένας επόπτης υγείας έχει απώτερο σκοπό την εξασφάλιση της υγιεινής και της Δημόσιας Υγείας. Για αυτό το λόγο, θα πρέπει να κατέχει πρωτίστως δεξιότητες, οι οποίες αποσκοπούν στην επίλυση σύνθετων και απρόβλεπτων προβλημάτων σε σύντομο χρονικό διάστημα, υπό συνθήκες τρομερής πίεσης με υπευθυνότητα και αποτελεσματικότητα. Οι πρώτες ώρες μετά από ένα πυρηνικό ατύχημα χρήζουν άμεσης αντιμετώπισης και η ανταπόκριση του υγειονολόγου είναι ζωτικής σημασίας. Οι εισηγήσεις του προς τους αρμόδιους φορείς θα καθορίσουν την στρατηγική που θα εφαρμοστεί στην περιοχή και οι δράσεις οφείλουν να είναι αποφασιστικές αφενός για να περιοριστεί η εκπομπή των ραδιενεργών στοιχείων στο περιβάλλον και αφετέρου για να περιοριστεί η ανεξέλεγκτη μετάδοσή τους στον τοπικό πληθυσμό.

Η πρώτη αντίδραση είναι η απομάκρυνση των κατοίκων των κοντινών περιοχών. Όσο τα ραδιενεργά υλικά εκλύονται στην ατμόσφαιρα, οι άνθρωποι βρίσκονται σε μεγάλο κίνδυνο, τόσο άμεσο όσο και έμμεσο καθώς τα επίπεδα της τοξικότητας ανεβαίνουν ραγδαία. Επομένως, η άμεση απομάκρυνση των εργαζομένων και των πολιτών είναι υψίστης σημασίας. Ωστόσο, οι κινήσεις απαιτούν υψηλά επίπεδα οργάνωσης, καθώς το πλήθος που θα απομακρυνθεί θα πρέπει να οδηγηθεί σε ασφαλές μέρος. Στη συνέχεια θα ακολουθήσει ο έλεγχος των επιπέδων ραδιενέργειας των πολιτών και θα εκτιμηθεί η κατάσταση της υγείας τους.

Μετά την απομάκρυνση των ανθρώπων σε ασφαλές μέρος, ακολουθεί ο αποκλεισμός του χώρου με σκοπό την εκτίμηση του κινδύνου της δημόσιας υγείας. Η καταγραφή των ζημιών, οι δειγματοληπτικές μετρήσεις ραδιενέργειας, η περισυλλογή των ραδιενεργών στοιχείων και η δημιουργία συστημάτων ασφαλείας ως προς την λήψη μέτρων για τον περιορισμό της εξάπλωσης του κινδύνου, βοηθούν σημαντικά στον περιορισμό της καταστροφής. Επίσης, βοηθούν σημαντικά στην αντιμετώπιση της κρίσης και στη δημιουργία ενός πλάνου δράσης και ενεργειών, θέτοντας σε προτεραιότητα βασικές κινήσεις στις οποίες θα προβεί η πολιτεία, προκειμένου να θέσει σε έλεγχο την κρίσιμη κατάσταση.

Μετά την εκτίμηση και τον έλεγχο των επιπέδων της καταστροφής, ακολουθεί η έγκαιρη και έγκυρη ενημέρωση τόσο των άμεσα ενδιαφερόμενων, όσο και του υπόλοιπου πληθυσμού, προκειμένου να αποφευχθεί η παραπληροφόρηση και η τρομοκρατία. Επιπροσθέτως, οφείλει να επιμένει στην ενημέρωση των γειτονικών

χωρών, ώστε να προβούν στις αντίστοιχες ενέργειες ελέγχου και να λάβουν τα απαραίτητα προληπτικά μέτρα. Ακόμη, θα πρέπει να προβεί στην πρόταση για περιορισμό των προϊόντων που προέρχονται από την περιοχή, καθώς η μόλυνση από το ατύχημα δεν θα αφήσει ανεπηρέαστη την τοπική χλωρίδα και πανίδα. Η διαδικασία αυτή είναι πιο χρονοβόρα, καθώς ο δειγματοληπτικός έλεγχος μπορεί να είναι άμεσος, αλλά οι εργαστηριακές μετρήσεις απαιτούν χρόνο και δεν μπορούν να υποστηρίξουν την άμεση λήψη απόφασης.

Λαμβάνοντας υπόψη αυτά που αναφέρθηκαν, καθίσταται σαφές ότι η έγκυρη παρέμβαση του υγειονομολόγου είναι ικανή να αποτρέψει την επιδείνωση των συνεπειών, να βοηθήσει σημαντικά στον άμεσο εντοπισμό των κύριων προβλημάτων και στην εκπόνηση ενός σχεδίου για την καταπολέμηση της επέκτασης της καταστροφής τόσο του περιβάλλοντος, όσο και της κοινωνίας.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οι πυρηνικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο δεύτερο μισό του εικοστού αιώνα είχαν ένα κυρίαρχο γεωπολιτικό χαρακτηριστικό, αλλά με σοβαρές οικολογικές και κοινωνικές συνέπειες. Από οικολογική άποψη, σε αυτό το στάδιο, υπάρχουν μερικές μολυσμένες τοποθεσίες τόσο στην ξηρά όσο και στο θαλάσσιο περιβάλλον. Τα ραδιενεργά στοιχεία που ξεχωρίζουν είναι τα ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239-240}\text{Pu}$, ^{241}Am και ^{131}I καθώς έχουν προκαλέσει σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία. Σύμφωνα με την έρευνα που δημοσιεύτηκε στο ακαδημαϊκό περιοδικό “The Lancet” (“Nuclear disasters and health: lessons learned, challenges, and proposals” A. Ohtsuru, K. Tanigawa, A. Kumagai, O. Niwa, N. Takamura, S. Midorikawa, K. Nollet, S. Yamashita, H. Ohto, R. K. Chhem, M. Clarke, 2015) πάνω στις επιπτώσεις της έκρηξης του πυρηνικού αντιδραστήρα στη Φουκουσίμα, τόσο οι διασώστες όσο και οι πυροσβέστες που έσπευσαν πρώτοι στο σημείο της έκρηξης, εκτέθηκαν σε υψηλά ποσοστά των παραπάνω στοιχείων, γεγονός που οδήγησε στην περαιτέρω διασπορά τους και στην μεταφορά τους εντός των κοινωνιών των πόλεων. Με αυτό τον τρόπο, τα ραδιενεργά στοιχεία επηρέασαν σημαντικά μεγάλο μέρος του πληθυσμού, με τα αποτελέσματα να είναι ορατά μέχρι και σήμερα. Επιπροσθέτως, οι ψυχολογικές επιπτώσεις που επιβάρυναν την κοινωνία της Ιαπωνίας (διαταραχή μετατραυματικού άγχους, κατάθλιψη) εμπόδισαν την άμεση ανάκαμψη του ηθικού, οδηγώντας μέχρι και σε αύξηση του ποσοστού των αυτοκτονιών τα αμέσως επόμενα χρόνια (“Social and mental health impact of nuclear disaster in survivors”, C. Longmuir & V. Agyarong, 2021).

Με βάση τις προαναφερθείσες μελέτες, οι επιστήμονες οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα πως οι επιπτώσεις του ατυχήματος δεν επηρέασαν μόνο τον ανθρώπινο πληθυσμό, αλλά όλους ζωντανούς οργανισμούς, τόσο τους χερσαίους, όσο και τους θαλάσσιους (“Modeling ^{137}Cs bioaccumulation in the salmon–resident killer whale food web of the Northeastern Pacific following the Fukushima Nuclear Accident”, J. J. Alava & F. Gobas, 2016). Δεδομένου ότι περίπου τα δύο τρίτα της επιφάνειας του πλανήτη καλύπτονται από νερό, σημαντικό μέρος αυτών των ραδιονουκλεϊδίων έχει μεταφερθεί στο θαλάσσιο περιβάλλον, όπως στην περίπτωση των ραδιονουκλεϊδίων ^{137}Cs και ^{90}Sr , με αρνητικές συνέπειες για τη βιοσυσσώρευση μέσω των τροφίμων και του κύκλου της αλυσίδας.

Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη που έγινε στο Ινστιτούτο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής της Ρωσίας (“Cesium-137 and Strontium-90 Contamination of Water Bodies in the Areas Affected by Releases from the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident: An Overview”, S. M. Vakulovsky, A. I. Nikitin, V. B. Chumichev, I. Yu. Katrich, O. A. Voitsekhovich, V. I. Medinets, V. V. Pisarev, L. A. Bovkum, E. S. Khersonsky, 1993), κατέδειξε τις επιπτώσεις των ραδιενεργών στοιχείων στα θαλάσσια οικοσυστήματα κύριως της Μαύρης Θάλασσας, της Βαλτικής και της Βόρειας Θάλασσας. Με την εξάτμιση του νερού από τις θάλασσες, η μεταφορά των ραδιενεργών στοιχείων εξαπλώθηκε με ραγδαίους ρυθμούς, γεγονός που επιδείνωσε ακόμα περισσότερο την ήδη επιβαρυσμένη έκθεση του οικοσυστήματος στη ραδιενέργεια.

Επίσης, η έμμεση μεταφορά ραδιονουκλεϊδίων στις γεώσφαιρες και η συσσώρευσή τους σε ζωντανά κύτταρα, μέσω της τροφικής αλυσίδας, ήταν μια ακόμη μορφή ραδιενεργής μόλυνσης των θαλάσσιων και χερσαίων οικοσυστημάτων. Ένα από τα πιο αντιπροσωπευτικά παραδείγματα είναι το ισότοπο ^{14}C που απελευθερώθηκε στην ατμόσφαιρα κατά τα πυρηνικά ατυχήματα του Τσερνόμπιλ και της Φουκουσίμα, το οποίο αργότερα ενσωματώθηκε με το CO_2 και στη συνέχεια έφτασε στο θαλάσσιο περιβάλλον, μέσω της ανταλλαγής αερίων ωκεανού-ατμόσφαιρας ή της βιόσφαιρας μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης.

Σχετικά με την ανθρώπινη έκθεση, η αύξηση της συχνότητας εμφάνισης καρκίνου του θυρεοειδούς σε πολλές περιοχές του πλανήτη (που επηρεάστηκαν έντονα από τη ραδιενεργή μόλυνση με το ραδιονουκλίδιο ^{131}I) είναι μια από τις χειρότερες συνέπειες των πυρηνικών ατυχημάτων (“Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts”, G. Steinhauser, A. Brandl & T. E. Johnson, 2013). Συγκεκριμένα, όσον αφορά το ατύχημα του Τσερνόμπιλ και τις μετέπειτα επιπτώσεις του στην υγεία του ανθρώπου, λόγω του γραφίτη και των καυσίμων που πυρακτώθηκαν, προκλήθηκαν πολλές πυρκαγιές, που με τη σειρά τους προκάλεσαν την κύρια απελευθέρωση ραδιενέργειας στο περιβάλλον. Αυτό που διαπιστώθηκε ήταν ότι η απελευθέρωση ραδιενέργειας από το ατύχημα του Τσερνόμπιλ αποτέλεσε τη μεγαλύτερη ανεξέλεγκτη έκλυση ραδιενέργειας στο περιβάλλον που έχει καταγραφεί ποτέ. Το γεγονός αυτό προκάλεσε σοβαρά προβλήματα υγείας σε πολλούς και μεγάλους πληθυσμούς γύρω από το Τσερνόμπιλ, όπως η Λευκορωσία, η Ρωσία και η Ουκρανία.

Επίσης, από την μελέτη των επιπτώσεων που είχε το πυρηνικό ατύχημα του Τσερνόμπιλ στην υγεία, παρατηρήθηκε ότι οι δόσεις που έλαβαν οι πυροσβέστες και οι εργαζόμενοι στο εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας ήταν αρκετά υψηλές ώστε να οδηγήσουν σε σύνδρομο οξείας ακτινοβολίας ARS με συμπτώματα γαστρεντερικών προβλημάτων, πονοκεφάλους, εγκαύματα και πυρετό (“Cancer after nuclear fallout: lessons from the Chernobyl accident”, D. Williams, 2002). Επιπρόσθετα, υπάρχουν ελάχιστα στοιχεία για αύξηση της λευχαιμίας και ένας μικρός αριθμός εργαζομένων που έλαβαν τις υψηλότερες δόσεις, μπορεί να κατείχαν ελαφρώς αυξημένο κίνδυνο ανάπτυξης συμπαγών καρκίνων. Ακόμη, από την μελέτη έκθεσης της UNSCEAR (“Excerpts of UNSCEAR white paper on “evaluation of data on thyroid cancer in regions affected by the Chernobyl accident”, D.D.Rao) το 2018, παρουσιάστηκαν περίπου 20.000 περιπτώσεις καρκίνου του θυρεοειδούς από το 1991 έως το 2015 τη στιγμή του ατυχήματος, σε ασθενείς που ήταν 18 ετών και κάτω.

Με βάση την έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο της Οξφόρδης (“Absorbed radiation doses in the thyroid as estimated by UNSCEAR and subsequent risk of childhood thyroid cancer following the Great East Japan Earthquake”, 2020) για το πυρηνικό ατύχημα στη Φουκουσίμα, οι επιπτώσεις στην υγεία των κατοίκων έλαβαν χώρα λόγω των κύριων ραδιονουκλιδίων που ήταν το πτητικό ιώδιο-131, το ραδιονουκλίδιο καίσιο-137 και το Cs-134. Ωστόσο, σύμφωνα με την Έκθεση της Επιστημονικής Επιτροπής του ΟΗΕ, για τις Επιπτώσεις της Ατομικής Ακτινοβολίας (“Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Ιούλιος 2014) λήφθηκε το συμπέρασμα ότι δεν έχουν παρατηρηθεί θάνατοι ή οξείες ασθένειες που σχετίζονται με την ακτινοβολία μεταξύ των εργαζομένων και του κοινού που εκτέθηκαν στην ακτινοβολία από το ατύχημα. Ωστόσο, μπορεί να διαπιστωθεί ότι οι αιτίες των έμμεσων θανάτων που προκλήθηκαν μετά από χρόνια από το ατύχημα, περιλαμβάνουν σωματικό και ψυχικό στρες που προέρχεται από μακροχρόνιες παραμονές σε καταφύγια, έλλειψη αρχικής φροντίδας, ως αποτέλεσμα της αναπηρίας των νοσοκομείων από την καταστροφή, καθώς και αυτοκτονίες.

Η αποτελεσματική αντιμετώπιση ενός πιθανού πυρηνικού ατυχήματος αποτελεί ένα ζήτημα υψίστης σημασίας. Με βάση τις παραπάνω αναφορές, γίνεται σαφές πως η γρήγορη και ώριμη αντιμετώπιση ενός τέτοιου συμβάντος είναι ζωτικής σημασίας. Η μελέτη στο Πανεπιστήμιο Ιατρικής στη Φουκουσίμα (“Evacuation after a nuclear

accident: Critical reviews of past nuclear accidents and proposal for future planning”, T. Ohba, K. Tanigawa & L. Liutsko, 2021) τονίζει την ανάγκη εκπόνησης σχεδίων εκκένωσης των περιοχών περιμετρικά των πυρηνικών εργοστασίων, ενώ παράλληλα καταδεικνύει την ανάγκη για την έγκαιρη πληροφόρηση των πολιτών σχετικά με τους κινδύνους που εγκυμονούν οι συγκεκριμένες περιοχές. Επιπροσθέτως, οι αρμόδιοι οφείλουν να οργανώσουν καταλλήλως τα τμήματα άμεσης επέμβασης, καθώς και τους χώρους που θα υποδεχτούν τους πολίτες. Η πρόνοια καθιστά εφικτή την άμεση παρέμβαση της πολιτείας, με τις επιπτώσεις στον τομέα της υγείας να περιορίζονται αισθητά.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της έλλειψης αυτών των στοιχείων αποτελεί η αντίδραση του κράτους μετά το πυρηνικό ατύχημα στο Τσερνόμπιλ, καθώς η ενημέρωση τόσο των πολιτών, όσο και των γειτονικών κρατών πραγματοποιήθηκε με χαρακτηριστική καθυστέρηση. Οι επιπτώσεις αυτής της διαχείρισης έγιναν φανερά τα αμέσως επόμενα χρόνια, καθώς η μόλυνση του περιβάλλοντος προκάλεσε τρομερές επιπτώσεις στον τομέα της υγείας (“Chernobyl Thyroid Cancer: 30 years of follow-up overview”, W. Weiss, 2018).

Ωστόσο, η αποφυγή νέων πυρηνικών ατυχημάτων μπορεί να επιτευχθεί μέσω της πρόληψης. Τα κατασταλτικά μέτρα μπορούν να βοηθήσουν στην χαμηλή διασπορά των ραδιενεργών στοιχείων, αλλά τα προληπτικά μέτρα είναι εκείνα που θα εξαφανίσουν τον κίνδυνο της εξάπλωσης των βλαβερών ουσιών στο περιβάλλον και στον άνθρωπο. Η απόδοση της ενέργειας που προσφέρουν τα πυρηνικά εργοστάσια είναι ικανή να προσφέρει μία μόνιμη λύση στο ενεργειακό πρόβλημα που μαστιάζει τον πλανήτη, καθώς η ενέργεια που παράγεται σε ένα πυρηνικό εργοστάσιο υπερκαλύπτει αναλογικά την ενέργεια που παράγεται μέσω κάθε άλλης διαδικασίας. Σε έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί (“The benefits of nuclear energy”, B. Comby, 2006, “Values, Perceived Risks and Benefits, and Acceptability of Nuclear Energy”, J. De Groot, L. Steg & W. Poortinga, 2012), αποδεικνύεται πως η πυρηνική ενέργεια είναι η πιο φιλική προς το περιβάλλον, καθώς τα απόβλητα μπορούν να αποθηκευτούν ασφαλώς, σε αντίθεση με το διοξείδιο του άνθρακα που εκπέμπεται με τις άλλες μεθόδους, παρόλο που υπάρχουν νομοθεσίες οι οποίες καθιστούν υποχρεωτική τη χρήση φίλτρου για την αποφυγή της εκπομπής ρύπων. Οι ελλείψεις γνώσεις σχετικά με την πυρηνική ενέργεια την καθιστούν απαγορευτική στη

συνείδηση της κοινωνίας, ωστόσο είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος ώστε να παράγουμε ενέργεια με ασφαλή και καθαρό τρόπο.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ

Λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία που αντλήθηκαν και αναλύονται σε αυτή την εργασία, μπορεί να διαπιστωθεί ότι ο έλεγχος και η διαχείριση της κανονικής λειτουργίας και των καλών συνθηκών απαιτούν υψηλό επίπεδο απόδοσης του προσωπικού των πυρηνικών εργοστασίων. Ένα βασικό στοιχείο της επίτευξης και διατήρησης αυτού του υψηλού επιπέδου απόδοσης είναι η κατάρτιση προσωπικού. Η κατάρτιση πραγματοποιείται σε διάφορα επίπεδα και σε διάφορες μορφές. Η έννοια της «άμυνας» είναι ένα βασικό στοιχείο της πυρηνικής ασφάλειας και ένα από τα στοιχεία της «άμυνας» αναφέρει ότι, πέρα από τα σχεδιαστικά ατυχήματα, υπάρχουν και τα σοβαρά ατυχήματα, τα οποία θα πρέπει να αντιμετωπίζονται κατάλληλα από το προσωπικό αυτών των εργοστασίων (IAE, 2021).

Εκτός των παραπάνω, η ύπαρξη ενός εθνικού σχεδίου μπορεί να παρέχει πληροφορίες αναφοράς για τον τρόπο προετοιμασίας για πυρηνική ή ραδιολογική έκτακτη ανάγκη και να προβεί στις ενδεδειγμένες αποφάσεις σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Επίσης, ένα τέτοιο σχέδιο καλύπτει την φάση έκτακτης ανάγκης που συμπεριλαμβάνει τη προετοιμασία για τη φάση μετά το ατύχημα, τη περίοδο στο οποίο πρέπει να προστατεύεται και να βοηθά το κοινό και το ατύχημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί έτσι ώστε η κατάσταση να επανέλθει υπό έλεγχο (SGDSN, 2014).

Η αποτελεσματική αντιμετώπιση των πυρηνικών ατυχημάτων επιτυγχάνεται φυσικά μέσω τεσσάρων διαδοχικών φραγμών που εμποδίζουν την απελευθέρωση ραδιενεργού υλικού. Αυτά τα εμπόδια προστατεύονται από ένα σύνολο μέτρων σχεδιασμού σε τρία επίπεδα, συμπεριλαμβανομένης της πρόληψης της μη φυσιολογικής λειτουργίας και των αποτυχιών (Επίπεδο 1), του ελέγχου της μη φυσιολογικής λειτουργίας και της ανίχνευσης των αποτυχιών (Επίπεδο 2) και του ελέγχου του ατυχήματος στη βάση του σχεδιασμού (Επίπεδο 3). Εάν αυτά τα τρία πρώτα επίπεδα αποτύχουν να εξασφαλίσουν την δομική ακεραιότητα του πυρήνα, καταβάλλονται πρόσθετες προσπάθειες στο επίπεδο 4, προκειμένου να μειωθεί περαιτέρω ο κίνδυνος πυρηνικού ατυχήματος (IAE, 2021).

Ο στόχος στο τέταρτο επίπεδο είναι να διασφαλιστεί ότι τόσο η πιθανότητα ενός σοβαρού ατυχήματος (δηλ. Ατύχημα που οδηγεί σε σημαντική ζημιά από καύσιμα) όσο και το μέγεθος των ραδιενεργών απελευθερώσεων, μετά από ένα σοβαρό ατύχημα, διατηρούνται όσο χαμηλότερα γίνεται. Ο όρος AM αναφέρεται στο συνολικό φάσμα των δυνατοτήτων ενός πυρηνικού σταθμού και του προσωπικού του τόσο για την πρόληψη όσο και για την άμβλυνση των συνεπειών των ατυχημάτων, οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε σοβαρές βλάβες τον πυρήνα του αντιδραστήρα. Αυτές οι δυνατότητες περιλαμβάνουν τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, καθώς και συμπληρωματικά μέτρα για την πρόληψη της εξέλιξης των ατυχημάτων, την παρακολούθηση και τον μετριασμό των σοβαρών ατυχημάτων. Τέλος, το επίπεδο 5 περιλαμβάνει μέτρα αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης εκτός του πυρηνικού εργοστασίου, με στόχο τον μετριασμό των ακτινολογικών συνεπειών των σημαντικών απελευθερώσεων ραδιενεργού υλικού (IAE, 2021).

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία πιθανών σεναρίων σοβαρών ατυχημάτων και κατηγορίες αλληλουχίας για κάθε εργοστάσιο ξεχωριστά. Οι ακολουθίες ξεκινούν από διαφορετικά συμβάντα έναρξης (πρόδρομοι ενός σοβαρού ατυχήματος) που μπορεί να οδηγήσουν άμεσα ή μέσω πρόσθετων αποτυχιών σε σοβαρή υποβάθμιση του πυρήνα. Οι πιθανές αιτίες πυρηνικού ατυχήματος περιλαμβάνουν τη λειτουργία του πυρήνα του αντιδραστήρα, τη θερμοκρασία των εγκαταστάσεων και την κατάχρηση και τις συνθήκες τερματισμού της λειτουργίας. Μόλις ξεκινήσει, η αποικοδόμηση του πυρήνα μπορεί να προχωρήσει περαιτέρω στην τήξη του πυρήνα του αντιδραστήρα, σε ένα τήγμα του δοχείου πίεσης και σε ένα πλήθος φυσικών φαινομένων που ενδεχομένως δεν μπορεί να συγκρατήσει την παραγόμενη ενέργεια (IAE, 2021).

Όσο περαιτέρω το ατύχημα εξελίσσεται σε σοβαρό ατύχημα, τόσο πιο δύσκολη γίνεται η διαχείριση του από τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης (EOP). Ως εκ τούτου, πολλές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας τείνουν να αναπτύξουν ή έχουν ήδη αναπτύξει σοβαρές κατευθυντήριες γραμμές διαχείρισης ατυχημάτων (SAMG) με μια δομή που είναι πιο κατάλληλη για τέτοιες καταστάσεις (IAE, 2021).

Προκειμένου να δημιουργηθεί η βάση για τη διαχείριση των καταστάσεων αποικοδόμησης του πυρήνα, θα πρέπει να γίνουν πλήρως κατανοητές οι συνθήκες κάτω από τις οποίες προκαλούνται τα πυρηνικά ατυχήματα. Η ανάπτυξη του ενισχυτή

είναι ευθύνη του δικαιοδόχου της εγκατάστασης, που είναι ο ιδιοκτήτης της εγκατάστασης ή ο χειριστής των εργοστασίων ή και οι δύο. Ο ΔΟΑΕ έχει αναπτύξει μια έκθεση ασφάλειας σχετικά με την εφαρμογή προγραμμάτων διαχείρισης ατυχημάτων σε πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που παρέχει καθοδήγηση για τον προγραμματισμό, την ανάπτυξη και την εφαρμογή της ΑΜ. Υπάρχουν διάφοροι εναλλακτικοί τρόποι ενσωμάτωσης AMP σε εργοστάσια. Η επιλογή του καλύτερου τρόπου σε κάθε μεμονωμένη περίπτωση επηρεάζεται από την οργανωτική δομή και την διαθέσιμη τεχνική εμπειρογνωμοσύνη καθώς και από την έκταση της επίλυσης προβλημάτων που απαιτείται για την επίτευξη συγκεκριμένων στρατηγικών (IAE, 2022).

Επιπλέον, η προληπτική ΑΜ μπορεί να ενσωματωθεί σε υπάρχουσες διαδικασίες, να αναπτυχθούν νέες διαδικασίες και κατευθυντήριες γραμμές για την προληπτική ΑΜ. Οι «διαδικασίες» αναφέρονται σε ένα σύνολο λεπτομερών αναφορών, οι οποίες καθορίζουν συγκεκριμένες ενέργειες σε συγκεκριμένες συνθήκες, ενώ οι «κατευθυντήριες γραμμές» και τα «εγχειρίδια καθοδήγησης» αναφέρονται σε μια γενική περιγραφή των ενεργειών που θα μπορούσαν να είναι αποτελεσματικές στη διαχείριση μιας συγκεκριμένης κατάστασης. Το προσωπικό που εμπλέκεται στην ΑΜ αποτελείται από διαφορετικές ομάδες. Συνήθως, τέτοιες ομάδες είναι:

- (1) οι φορείς εκμετάλλευσης των χώρων ελέγχου,
- (2) ένας πιθανός μόνιμος ή έφεδρος μηχανικός ασφαλείας,
- (3) το τμήμα του επιτόπιου προσωπικού τεχνικής υποστήριξης που είναι υπεύθυνο για την καθοδήγηση του SAM (συντά ονομάζεται επίσης ομάδα αξιολόγησης ατυχημάτων, ή ομάδα διαχείρισης ατυχημάτων, ΑΜΤ),
- (4) άλλα μέρη του προσωπικού τεχνικής υποστήριξης, όπως προσωπικό λειτουργίας, προσωπικό ακτινοβολίας κ.λπ., και
- (5) υπάλληλος έκτακτης ανάγκης του εργοστασίου. Το εργοστάσιο πρέπει να περιλαμβάνει μία ή περισσότερες ομάδες κρίσης στις οποίες εμπλέκεται και η Αρχή Ασφαλείας (IAE, 2022).

Η εφαρμογή του AMP θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη ότι η διαθεσιμότητα της τεχνικής εμπειρογνωμοσύνης των διαφόρων ομάδων μπορεί να ποικίλει σημαντικά

μεταξύ των επιχειρήσεων κοινής ωφέλειας. Οι οργανωτικές πτυχές της ΑΜ περιλαμβάνουν τον καθορισμό των ρόλων και των ευθυνών του εμπλεκόμενου προσωπικού. Οι κύριες λειτουργίες για την λειτουργία του SAM είναι οι αξιολογητές από τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων και τους υλοποιητές. Τα καθήκοντα αυτών των διαφορετικών ομάδων προσωπικού μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τη φάση της ΑΜ. Η εφαρμογή ποικίλλει επίσης μεταξύ των επιχειρήσεων κοινής ωφέλειας, καθώς η εφαρμογή ΑΜ πρέπει να ενσωματωθεί στη συνολική χρησιμότητα και στην οργάνωση του εργοστασίου σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης (ΙΑΕ, 2022).

Πολλές φορές σε ένα πυρηνικό ατύχημα μπορεί να μην είναι τόσο προφανές ποιες ενέργειες πρέπει να λάβει ο χειριστής για να τερματίσει την εξέλιξη του ατυχήματος ή να μετριάσει τις συνέπειές του. Σε μια πραγματική περίπτωση, το υπεύθυνο προσωπικό για τη λειτουργία των εγκαταστάσεων υπό συνθήκες έκτακτης ανάγκης πρέπει να λαμβάνουν ορισμένες κρίσιμες αποφάσεις. Αυτές οι αποφάσεις περιλαμβάνουν την επιβεβαίωση ότι έχει συμβεί σοβαρό ατύχημα και αφορούν συνήθως θέματα όπως η προσθήκη νερού σε έναν υποβαθμισμένο πυρήνα, την αποσυμπίεση του συστήματος ψύξης του αντιδραστήρα και πολλά θέματα που σχετίζονται με τη συγκράτηση (π.χ. χρήση σπρέι, πλημμύρες, φιλτραρισμένο εξαερισμό και διαχείριση υδρογόνου) (ΙΑΕ, 2022).

Ο χρόνος αυτών των αποφάσεων εξαρτάται από τον σχεδιασμό των εγκαταστάσεων. Ο χρόνος μπορεί επίσης να καθορίσει το οργανωτικό επίπεδο από το οποίο πρέπει να ληφθεί η απόφαση. Στην αρχική φάση, όταν οι μηχανικοί ασφαλείας ή το κέντρο τεχνικής υποστήριξης (TSC) δεν είναι διαθέσιμοι, οι φορείς εκμετάλλευσης των εγκαταστάσεων θα πρέπει να μπορούν να λάβουν κατάλληλες αποφάσεις. Σε δεύτερη φάση, όταν είναι διαθέσιμο το προσωπικό της τεχνικής υποστήριξης, μπορούν να βοηθήσουν ή - όπου αυτό είναι τόσο οργανωμένο - να αναλάβουν τη λήψη αποφάσεων. Οι αποφάσεις ονομάζονται κρίσιμες υπό την έννοια ότι η εφαρμογή της απόφασης μπορεί επίσης να περιλαμβάνει δυσμενείς επιπτώσεις. Σε μια τέτοια περίπτωση, η καθοδήγηση συνήθως απαιτεί από την ομάδα της τεχνικής υποστήριξης να εξετάσει αυτές τις δυνητικά αρνητικές συνέπειες εκ των προτέρων πριν προβεί σε οποιαδήποτε ενέργεια.

Η εξισορρόπηση των θετικών και αρνητικών συνεπειών και η συνέπεια της μη εκτέλεσης των ενεργειών μπορεί να είναι ένα δύσκολο έργο και, ως εκ τούτου, πρέπει

το προσωπικό της ομάδας της τεχνικής υποστήριξης να εκπαιδεύεται κατάλληλα. Το εμπλεκόμενο προσωπικό πρέπει να εκπαιδευτεί σε όλες τις πτυχές που σχετίζονται με τις αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν. Οι ανάγκες και οι μέθοδοι κατάρτισης έχουν καθοριστεί στην έκθεση ασφαλείας. Πολλές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας έχουν επιλέξει να αναπτύξουν σοβαρές κατευθυντήριες γραμμές διαχείρισης ατυχημάτων. Άλλες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας έχουν υιοθετήσει μια πρακτική για τη συλλογή της καθοδήγησης σε ένα ενιαίο εγχειρίδιο SAM. Αυτό το εγχειρίδιο περιέχει επίσης όλες τις πληροφορίες που θεωρούνται απαραίτητες για τους φορείς εκμετάλλευσης και το προσωπικό τεχνικής υποστήριξης σχετικά με ένα σοβαρό ατύχημα. Επίσης, πρέπει να υπογραμμιστεί ότι το εγχειρίδιο είναι ένα σημαντικό μέρος του εκπαιδευτικού υλικού (IAE, 2022).

Η έκθεση ασφαλείας ασχολείται με τις ανάγκες κατάρτισης κατά τη διάρκεια των φάσεων ανάπτυξης και υλοποίησης του προγράμματος AM. Κατά συνέπεια, είναι σημαντικό να προσδιοριστούν οι ανάγκες κατάρτισης εγκαίρως και να επιτραπεί η προετοιμασία του προγράμματος κατάρτισης κατά τη διάρκεια της φάσης εφαρμογής. Το σχέδιο κατάρτισης καθορίζει όλα τα μέλη του προσωπικού που χρειάζονται κατάρτιση καθώς και το επίπεδο, το πεδίο εφαρμογής και τη μορφή της κατάρτισης για τις διάφορες ομάδες. Κατά τη διάρκεια της φάσης εφαρμογής, όλα το προσωπικό και οι ομάδες που απαιτούνται κατά τη διάρκεια ενός ατυχήματος πρέπει να προσδιοριστούν με σαφήνεια και οι ανάγκες κατάρτισης τους να είναι καλά καθορισμένες (IAE, 2022).

Η κατάρτιση του εμπλεκόμενου προσωπικού μπορεί να γίνει τόσο με θεωρητική εκπαίδευση όσο και με ασκήσεις ετοιμότητας. Τα θεωρητικά μαθήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βασική εξοικείωση με την εφαρμογή AM. Στις πρακτικές ασκήσεις, ενδεχομένως εφαρμόζονται προσομοιωτές με σοβαρές δυνατότητες μοντελοποίησης ατυχημάτων, παρέχοντας αποτελεσματικά μέσα για την κατάρτιση. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη σωστή εκτέλεση των EOPs στη φάση πριν από την εκτεταμένη βλάβη του πυρήνα, τη μετάβαση από τον τομέα EOP στον τομέα των κατευθυντήριων γραμμών SAM και την ορθή εκτέλεση των κατευθυντήριων γραμμών SAM και άλλων κατευθυντήριων γραμμών από την ομάδα της τεχνικής υποστήριξης. Εκτός από την κατάρτιση στην σωστή εκτέλεση της εφαρμογής SAM το προσωπικό ελέγχου και η τεχνική ομάδα υποστήριξης θα πρέπει επίσης να

εκπαιδεύεται σε τακτά χρονικά διαστήματα στο συνολικό σχέδιο ετοιμότητας έκτακτης ανάγκης (EPP) (IAE, 2022).

Θα πρέπει να εκτελούνται ασκήσεις με τρόπο που όλα τα μέλη της ομάδας να εκπαιδεύονται σε παρόμοιο επίπεδο. Ο ρεαλισμός της κατάρτισης μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά εάν η φάση πριν από την εκτεταμένη βλάβη του πυρήνα και τη μετάβαση από το EOPs στο SAM εκτελείται σε έναν προσομοιωτή. Οι εμπλεκόμενες ομάδες θα πρέπει επίσης να προσφέρουν μια αυτοαξιολόγηση και κριτική της απόδοσής τους. Οι αξιολογήσεις τεκμηριώνονται και κατατίθενται και τα διδάγματα που αντλήθηκαν ενσωματώνονται στις διαδικασίες, στις κατευθυντήριες γραμμές και στην ίδια την εκπαίδευση. Τα άτομα και οι ομάδες του ERO που απαιτούν εκπαίδευση έχουν εντοπιστεί εξαρχής όπως και τα επίπεδα κατάρτισης που χρειάζονται. Στις ομάδες που χρειάζονται εκπαίδευση περιλαμβάνεται το προσωπικό ελέγχου και οι εποπτικοί φορείς, οι χειριστές της εφαρμογής SAM και ο διευθυντής έκτακτης ανάγκης. Όλοι τους χρειάζονται εκπαίδευση διαφορετικού πεδίου (IAE, 2022).

Υπάρχουν επίσης και άλλες ομάδες προσωπικού διασύνδεσης, η εκπαίδευση των οποίων πρόκειται να οριστεί σύμφωνα με την ειδική κατάσταση των πυρηνικών εργοστασίων και των αντιδραστήρων τους. Τέτοιες ομάδες προσωπικού είναι τα άτομα που εργάζονται για το ERO και το προσωπικό τεχνικής υποστήριξης που δεν εμπλέκεται άμεσα στην εφαρμογή των κατευθυντήριων γραμμών SAM καθώς και των μελών της πρακτικής τεχνικής υποστήριξης που εργάζεται εκτός του εργοστασίου (IAE, 2022).

Οι ανάγκες κατάρτισης των διαφόρων μελών του οργανισμού μπορούν να αξιολογηθούν χωριστά. Το επίπεδο και το περιεχόμενο των μαθημάτων για την αντιμετώπιση των σοβαρών ατυχημάτων και των αναγκών, των μέσων και των πρακτικών AM γενικά θα μπορούσαν να είναι διαφορετικά για αυτές τις ομάδες. Επίσης, η ειδική κατάρτιση θα πρέπει να προσαρμοστεί σύμφωνα με την επιλεγμένη προσέγγιση της σοβαρής διαχείρισης των ατυχημάτων και τη λειτουργία του εργοστασίου. Η εκπαίδευση πρέπει να πραγματοποιείται σε τακτικά διαστήματα που να είναι συμβατά με το συνολικό πρόγραμμα κατάρτισης του χειριστή του εργοστασίου και του τεχνικού προσωπικού. Σε κάθε περίπτωση, η εκπαίδευση

πρέπει να πραγματοποιείται με συχνότητα που θα επιτρέψει στο υπεύθυνο προσωπικό να είναι καλά ενημερωμένο και προετοιμασμένο (IAE, 2022).

Συνεπώς, υπάρχει και η πυρηνική ασφάλεια, η οποία καλύπτει τις ενέργειες που λαμβάνονται για την πρόληψη πυρηνικών και ραδιενεργών ατυχημάτων ή για τον περιορισμό των συνεπειών τους. Αυτό καλύπτει πυρηνικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής καθώς και όλες τις άλλες πυρηνικές εγκαταστάσεις, τη μεταφορά πυρηνικών υλικών και τη χρήση και αποθήκευση πυρηνικών υλικών για ιατρική, ηλεκτρική ενέργεια, βιομηχανία και στρατιωτικές χρήσεις (European Commission, 2014).

Η πυρηνικής ενέργειας βιομηχανία έχει βελτιώσει την ασφάλεια και την απόδοση των αντιδραστήρων και έχει προτείνει νέα ασφαλέστερα (αλλά γενικά μη δοκιμασμένα) σχέδια αντιδραστήρων. Ωστόσο, θα πρέπει να επισημανθεί ότι δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι οι αντιδραστήρες θα σχεδιαστούν, θα κατασκευαστούν και θα λειτουργήσουν σωστά. Έτσι, συμβαίνουν λάθη, όπως για παράδειγμα το ατύχημα της Φουκουσίμα, όπου οι σχεδιαστές των αντιδραστήρων στη Φουκουσίμα της Ιαπωνίας δεν περίμεναν ότι ένα τσουνάμι που θα προκληθεί από έναν σεισμό θα απενεργοποιούσε τα εφεδρικά συστήματα που υποτίθεται ότι θα σταθεροποιούσαν τον αντιδραστήρα μετά τον σεισμό (European Commission, 2014).

Σύμφωνα με την UBS AG, τα πυρηνικά ατυχήματα της Φουκουσίμα έθεσαν αμφιβολίες για το αν ακόμη και μια προηγμένη οικονομία όπως η Ιαπωνία μπορεί να κυριαρχήσει στην πυρηνική ασφάλεια. Μια διεπιστημονική ομάδα από το MIT υπολόγισε ότι δεδομένης της αναμενόμενης ανάπτυξης της πυρηνικής ενέργειας από το 2005 έως το 2055, θα αναμένονταν τουλάχιστον τέσσερα σοβαρά πυρηνικά ατυχήματα κατά την περίοδο αυτή. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η ασφάλεια των πυρηνικών όπλων, καθώς και η ασφάλεια της έρευνας που περιλαμβάνει πυρηνικά υλικά, αντιμετωπίζονται γενικά από φορείς διαφορετικούς από αυτούς που επιβλέπουν την ασφάλεια των πολιτών, για διάφορους λόγους, συμπεριλαμβανομένης της μυστικότητας (European Commission, 2014).

Με αφορμή το πυρηνικό ατύχημα στη Φουκουσίμα και για την διασφάλιση της αποφυγής μελλοντικών πυρηνικών ατυχημάτων, ο ΔΟΑΕ εξέδωσε ανακοίνωση προς την Ευρωπαϊκή Ένωση το 2012 σχετικά με το πλαίσιο κανόνων γύρω από την χρήση των πυρηνοληκτρικών σταθμών στην Ευρώπη. Πιο συγκεκριμένα, η Επιτροπή

ζήτησε από τις χώρες που διαθέτουν πυρηνικά εργοστάσια να επανεξεταστεί η ασφάλεια των πυρηνικών αντιδραστήρων, ενώ παράλληλα εφοδίασε τους εκπροσώπους με τα απαραίτητα έγγραφα για την ενημέρωση των διαδικασιών ασφαλείας στα πυρηνικά εργοστάσια. Στη συνέχεια, προχώρησε σε αξιολόγηση του νομικού πλαισίου, υπογραμμίζοντας τα κενά που υπάρχουν στη νομοθεσία, με σκοπό να ενισχυθεί η Πυρηνική Ασφάλεια. Ζητήθηκε επίσης και η συμμετοχή των γειτονικών χωρών, προκειμένου να ενημερωθούν για τις διαδικασίες διασφάλισης και αποφυγής ατυχημάτων (European Parliament, 2012).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Δερβιτσιώτης Ν. Κώστας(2013):Διοίκηση ολικής ποιότητας ,Νομική Βιβλιοθήκη , ISBN139789602723111
- 2) Γκέρο Ρύτερ / Μαρία Ρηγούτσου (2016): Τέλος της πυρηνικής ενέργειας στην Ευρώπη;, <https://p.dw.com/p/1Iclu>
- 3) Κατσίκης, Α. (2016, 27 Απριλίου). Το παρόν και το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας. Ηπειρωτικός Αγών. <http://www.agon.gr/news/167/ARTICLE/32868/2016-04-27.html>
- 4) Ζευγίτης, Α. (2016, 9 Αυγούστου). Κάποιες χώρες επιμένουν... πυρηνικά. Energy in. <http://energyin.gr/2016/08/09>
- 5) Γαλδαδάς, Α. (2009, 15 Μαρτίου). Το μετέωρο βήμα της πυρηνικής ενέργειας. Το Βήμα. <http://www.tovima.gr/science/article/?aid=259456>.
- 6) Δεληγιάννη, Λ. (2013α, 10 Μαρτίου). Η πυρηνική ενέργεια σε αριθμούς. News.gr. <http://www.news.gr/perivallon/planhths-gh/article/47992/h-pyrhnikh-energeia-searithmoys.html>.
- 7) Δεληγιάννη, Λ. (2013β, 11 Μαρτίου). Πυρηνικά: Μια φτηνή ενέργεια με βαρύ τίμημα για το περιβάλλον και τον άνθρωπο. News.gr <http://www.news.gr/perivallon/planhths-gh/article/48510/pyrhnika-miafthhnh-energeia-me-vary-timhma-gia-to.html>.
- 8) "Chernobyl Nuclear Accident". www.iaea.org. 14 May 2014. Archived from the original on 11 June 2008.
- 9) Burgherr, Peter; Hirschberg, Stefan (2008). "A Comparative Analysis of Accident Risks in Fossil, Hydro, and Nuclear Energy Chains". Human and Ecological Risk Assessment. 14 (5): 947–973. doi:10.1080/10807030802387556. S2CID 110522982.

- 10) Black, Richard (12 April 2011). "Fukushima: As Bad as Chernobyl?". BBC News. Archived from the original on 16 August 2011.
- 11) "Chernobyl: Assessment of Radiological and Health Impact, 2002 update; Chapter II – The release, dispersion and deposition of radionuclides" (PDF). OECD-NEA. 2002. Archived (PDF) from the original on 22 June 2015.
- 12) Johnson, Thomas (author/director) (2006). The battle of Chernobyl. Play Film / Discovery Channel. (see 1996 interview with Mikhail Gorbachev)
- 13) "INSAG-7: The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1" (PDF). IAEA. 1992. Archived (PDF) from the original on 20 October 2018.
- 14) McCall, Chris (April 2016). "Chernobyl disaster 30 years on: lessons not learned". *The Lancet*. 387 (10029): 1707–1708. doi:10.1016/s0140-6736(16)30304-x. ISSN 0140-6736. PMID 27116266. S2CID 39494685.
- 15) "Chernobyl-Born Radionuclides in Geological Environment", Groundwater Vulnerability, Special Publications, John Wiley & Sons, Inc, 10 October 2014, pp. 25–38, doi:10.1002/9781118962220.ch2, ISBN 978-1-118-96222-0
- 16) "Belarus: Five things you may not know about the country". BBC. 11 August 2020. Archived from the original on 15 August 2020.
- 17) Steadman, Philip; Hodgkinson, Simon (1990). *Nuclear Disasters & The Built Environment: A Report to the Royal Institute*. Butterworth Architecture. p. 55. ISBN 978-0-40850-061-6.
- 18) Mettler Jr., Fred A. "Medical decision making and care of casualties from delayed effects of a nuclear detonation" (PDF). The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Archived from the original (PDF) on 12 July 2018.
- 19) Nagataki, Shigenobu (23 July 2010). "Latest Knowledge on Radiological Effects: Radiation Health Effects of Atomic Bomb Explosions and Nuclear Power Plant Accidents". *Japanese Journal of Health Physics*. 45 (4): 370–378. doi:10.5453/jhps.45.370. Archived from the original on 28 April 2019.

- 20) "Chernobyl 25th anniversary – Frequently Asked Questions" (PDF). World Health Organization. 23 April 2011. Archived (PDF) from the original on 17 April 2012.
- 21) "Chernobyl: the true scale of the accident". World Health Organization. 5 September 2005. Archived from the original on 25 February 2018.
- 22) "UNSCEAR assessments of the Chernobyl accident". www.unscear.org. Archived from the original on 13 May 2011.
- 23) Smith, Jim T (3 April 2007). "Are passive smoking, air pollution and obesity a greater mortality risk than major radiation incidents?". *BMC Public Health*. 7 (1): 49. doi:10.1186/1471-2458-7-49. PMC 1851009. PMID 17407581.
- 24) Rahu, Mati (February 2003). "Health effects of the Chernobyl accident: fears, rumours and the truth". *European Journal of Cancer*. 39 (3): 295–299. doi:10.1016/S0959-8049(02)00764-5. PMID 12565980.
- 25) Peplow, M. (1 April 2006). "Special Report: Counting the dead". *Nature*. 440 (7087): 982–983. Bibcode:2006Natur.440..982.. doi:10.1038/440982a. PMID 16625167.
- 26) "Chernobyl nuclear power plant site to be cleared by 2065". *Kyiv Post*. 3 January 2010. Archived from the original on 5 October 2012.
- 27) Ragheb, M. (22 March 2011). "Decay Heat Generation in Fission Reactors" (PDF). University of Illinois at Urbana-Champaign. Archived from the original (PDF) on 14 May 2013.
- 28) "DOE Fundamentals Handbook – Nuclear physics and reactor theory" (PDF). United States Department of Energy. January 1996. p. 61. Archived from the original (PDF) on 19 March 2014.
- 29) "Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants: LWR Edition (NUREG-0800)". United States Nuclear Regulatory Commission. May 2010. Archived from the original on 19 June 2010.

- 30) Medvedev, Zhores A. (1990). *The Legacy of Chernobyl* (First American ed.). W.W. Norton & Company. ISBN 978-0-393-30814-3.
- 31) Karpan, N. V. (2006). "Who exploded the Chernobyl NPP, Chronology of events before the accident". *Chernobyl. Vengeance of the peaceful atom* (in Russian). Dnepropetrovsk: IKK "Balance Club". ISBN 978-966-8135-21-7. Archived from the original (PDF) on 1 April 2020.
- 32) "What Happened at Chernobyl?". *Nuclear Fissionary*. Archived from the original on 14 July 2011.
- 33) Negishi, Mayumi (12 April 2011). "Japan raises nuclear crisis severity to highest level". *Reuters*.
- 34) "Fukushima accident upgraded to severity level 7". *IEEE Spectrum*. 12 April 2011.
- 35) "Japan confirms first Fukushima worker death from radiation". *BBC News*. BBC. 5 September 2018.
- 36) "Japan acknowledges first radiation death from nuclear plant hit by tsunami". *ABC News*. 6 September 2018.
- 37) Hasegawa, A.; Ohira, T.; Maeda, M.; Yasumura, S.; Tanigawa, K. (April 2016). "Emergency Responses and Health Consequences after the Fukushima Accident; Evacuation and Relocation". *Clinical Oncology*. 28 (4): 237–244. doi:10.1016/j.clon.2016.01.002. PMID 26876459.
- 38) ^ "Radiation-exposed workers to be treated at Chiba hospital". *Kyodo News*. 17 April 2011.
- 39) Brumfiel, Geoff (26 April 2011). "Nuclear agency faces reform calls". *Nature*. 472 (7344): 397–398. doi:10.1038/472397a. PMID 21528501.
- 40) McCurry, Justin (12 April 2011). "Japan upgrades nuclear crisis to same level as Chernobyl" *The Guardian*.

- 41) Analysis: A month on, Japan nuclear crisis still scarring" International Business Times. 9 April 2011. Archived from the original on 15 August 2012.
- 42) Lipsy, Phillip; Kushida, Kenji; Incerti, Trevor (2013). "The Fukushima Disaster and Japan's Nuclear Plant Vulnerability in Comparative Perspective" (PDF). *Environmental Science & Technology*. 47 (12): 6082–6088. Bibcode2013EnST. 47.608L. doi:10.1021/es4004813. PMID 23679069. Archived from the original (PDF) on 22 November 2019.
- 43) Richard A. Clarke; R.P. Eddy (2017). *Warnings: Finding Cassandras to stop catastrophe*. Harper Collins. p. 84.
- 44) Fackler, Martin (1 June 2011). "Report Finds Japan Underestimated Tsunami Danger". *The New York Times*.
- 45) Braun, Matthias (19 May 2011). "The Fukushima Daiichi Incident" (PDF). *Areva*. Archived from the original (PDF) on 26 February 2017.
- 46) Martin Fackler; Matthew L. Wald (1 May 2011). "Life in Limbo for Japanese Near Damaged Nuclear Plant". *The New York Times*.
- 47) "Reconstruction Agency". *Reconstruction.go.jp*.
- 48) Martin Fackler; Hiroko Tabuchi (24 October 2013). "With a Plant's Tainted Water Still Flowing, No End to Environmental Fears". *The New York Times*.
- 49) Fackler, Martin (29 August 2016). "Japan's \$320 Million Gamble at Fukushima: an Underground Ice Wall". *The New York Times*.
- 50) Sebens, Shelby (29 April 2014). "Study finds Fukushima radioactivity in tuna off Oregon, Washington". *Yahoo*. Archived from the original on 3 May 2014.
- 51) Teishima, Hirohiko; et al. (2017). "Concentration of radiocesium in Japanese whiting *Sillago japonica* living in Tokyo Bay after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident". *Journal of Advanced Marine Science and Technology Society* (in Japanese and English). 23 (1): 1–9. doi:10.14928/amstec.23.1_1.

- 52) Tilman Ruff. Fukushima: The Misery Piles up, Pursuit magazine, University of Melbourne, 2016.
- 53) Hiyama; et al. (2012). "The biological impacts of the Fukushima nuclear accident on the pale grass blue butterfly". Scientific Reports. 2: 570.
Bibcode:2012NatSR...2E.570H. doi10.1038/srep00570. PMC 3414864. PMID 22880161.
- 54) Sutou; et al. (2015). "Commentary 2: abnormalities of butterflies captured around Fukushima areas might not be caused by non-genetic but toxic effects". Fukushima Nuclear Accident: Global Implications, Long-Term Health Effects and Ecological Consequences. New York: Nova Sciences Publishers Inc. pp. 225–230.
- 55) Nakanishi, Tomoko M. (2017). "What Has Become Obvious from an Agricultural Perspective in These 5 Years after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident". Bunseki Kagaku (in Japanese and English). 66 (4): 217–222. doi:10.2116/bunsekikagaku.66.27.
- 56) "How did the Fukushima disaster affect air pollution?". Stanford University. 14 February 2018.
- 57) "Thailand receives Fukushima's first fish export since 2011 nuclear disaster". The Straits Times. 6 March 2018.
- 58) "Activists oppose imports of fish from Fukushima". Bangkok Post.
- 59) Richard Lloyd Parry (10 February 2022). "Fish caught near Fukushima are 14 times too radioactive". The Times. London.
- 60) WHO 2013 pp. 87–88.
- 61) Welch, H. Gilbert; Woloshin, Steve; Schwartz, Lisa A. (2011). Overdiagnosed: Making People Sick in the Pursuit of Health. Beacon Press. pp. 61–34. ISBN 978-0-8070-2200-9.

- 62) "Screening effect? Examining thyroid cancers found in Fukushima children"
Fukushima Inform. 6 March 2016.
- 63) Guth, S; Theune, U; Aberle, J; Galach, A; Bamberger, CM (2009). "Very high prevalence of thyroid nodules detected by high frequency (13 MHz) ultrasound examination". *Eur. J. Clin. Invest.* 39 (8): 699–706. doi:10.1111/j.1365-2362.2009.02162.x. PMID 19601965. S2CID 2182377.
- 64) Aarkrog A. Input of anthropogenic radionuclides into the World Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography.* 2003;50(17–21):2597–2606. doi: 10.1016/S0967-0645(03)00137-1.
- 65) Brindel P, Doyon F, Bourgain C, Rachedi F, Boissin JL, Sebbag J, Shan L, Bost-Bezeaud F, Petitdidier P, Paoaafaite J, Teuri J, de Vathaire F. Family history of thyroid cancer and the risk of differentiated thyroid cancer in French Polynesia. *Thyroid.* 2010;20:393–400. doi: 10.1089/thy.2009.0350.
- 66) Chen AY, Jemal A, Ward EM. Increasing incidence of differentiated thyroid cancer in the United States, 1988–2005. *Cancer.* 2009;115(16):3801–3807. doi: 10.1002/cncr.24416.
- 67) CTBT. 1996. Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (treaty text).
http://www.ctbto.org/fileadmin/content/treaty/treaty_text.pdf.
- 68) Currie KI, Brailsford G, Nichol S, Gomez A, Sparks R, Lassey KR, Riedel K. Tropospheric ¹⁴CO₂ at Wellington, New Zealand: The world's longest record. *Biogeochemistry.* 2011;104:5–22.
- 69) Czeplak G, Junge C. Studies of interhemispheric exchange in the troposphere by a diffusion model. *Advances in Geophysics.* 1974;18:57–72.
- 70) de Vathaire F, Drozdovitch V, Brindel P, Rachedi F, Boissin J-L, Sebbag J, Shan L, Bost-Bezeaud F, et al. Thyroid cancer following nuclear tests in French Polynesia. *British Journal of Cancer.* 2010;103:1115–1121.

- 71) Erichsen AC, Konovalenko L, Møhlenberg F, Closter RM, Bradshaw C, Aquilonius K, Kautsky U. Radionuclide transport and uptake in coastal aquatic ecosystems: A comparison of a 3D dynamic model and a compartment model. *AMBIO*. 2013;42:464–475.
- 72) Fedchenko, V., and R.F. Hellgren. 2007. Nuclear arms control and non-proliferation (Appendix 12B. Nuclear explosions, 1945–2006).
- 73) Gilbert ES, Tarone R, Bouville A, Ron E. Thyroid cancer rates and ¹³¹I doses from Nevada atmospheric nuclear bomb tests. *Journal of the National Cancer Institute*. 1998;90(21):1654–1660
- 74) Gilbert ES, Huang L, Bouville A, Berg CD, Ron E. Thyroid cancer rates and ¹³¹I doses from Nevada atmospheric nuclear bomb tests: An update. *Radiation Research*. 2010;173:659–664.
- 75) Goodby J. The Limited Test Ban Negotiations, 1954–63: How a negotiator viewed the proceedings. *International Negotiation*. 2005;10:381–404.
- 76) Goodsite ME, Rom W, Heinemeier J, Lange T, Ooi S, Appleby PG, Shotyk W, van der Knapp WO, Lohse C, Hansen TS. High-resolution AMS ¹⁴C dating of post-bomb peat archives of atmospheric pollutants. *Radiocarbon*. 2001;43(2B):495–515.
- 77) Grandin K, Jagers P, Kullander S. Nuclear energy. *AMBIO*. 2011;39:26–30
- 78) Grotto A. Why do states that oppose nuclear proliferation resist new nonproliferation obligations?: Three logics of nonproliferation decision-making. *Journal of International & Comparative Law*. 2010;18(1):1–44.
- 79) Hamilton, T.F., J.C. Milliès-Lacroix, and G.H. Hong. 1996. ¹³⁷Cs (⁹⁰Sr) and Pu isotopes in the Pacific Ocean: Sources and trends. In *Radionuclides in the oceans: inputs and inventory*, ed. P. Guéguéniat, P. Germain, and H. Métivier, 29–58.
- 80) Högberg L. Root causes and impacts of severe accidents at large nuclear power plants. *AMBIO*. 2013;42:267–284. doi: 10.1007/s13280-013-0382-x.

- 81) Hundahl SA. Perspective: National Cancer Institute summary report about estimated exposures and thyroid doses received from iodine 131 in fallout after Nevada atmospheric nuclear bomb tests. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*. 1998;48(5):285–298.
- 82) IAEA. 1995. Sources of radioactivity in the marine environment and their relative contributions to overall dose assessment from marine radioactivity (MARDOS). IAEA-TECDOC-838, Vienna.
- 83) IAEA. 1998a. Radiological conditions at the Semipalatinsk Test Site, Kazakhstan: Preliminary assessment and recommendations for further study (STI/PUB/1063).
- 84) IAEA. 1998b. Radiological conditions at Bikini atoll: Prospects for resettlement (STI/PUB/1054).
- 85) IAEA. 1998c. The radiological situation at the atolls of Mururoa and Fangataufa: Main report (STI/PUB/1028).
- 86) IAEA. 2000. Global marine radioactivity database (GLOMARD). IAEA-TECDOC-1146, Vienna.
- 87) IAEA. 2021. Radiological conditions at the former French nuclear test sites in Algeria: Preliminary assessment and recommendations (STI/PUB/1215).
- 88) IAEA. 2022. Fukushima Daiichi status report. Retrieved September 25, 2013.
- 89) Ion A. Relationship from geology and radon in outdoor air in Massif Ditrău area, Eastern Carpathians—Romania. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*. 2013;8(2):163–168.
- 90) European Commission, 2014. Nuclear safety. The EU promotes the highest standards of nuclear safety across Europe and beyond. Retrieved 2014.
- 91) Jorge Morales Pedraza. World major nuclear accidents and their negative impact in the environment, human health and public opinion. *International Journal of Energy, Environment and Economics*. 2013; 21(2):1-23.

- 92) SGDSN, 2014. National Response Plan. Major Nuclear or Radiological Accidents. Number 200/SGDSN/PSE/PSN – February 2014
- 93) Social and mental health impact of nuclear disaster in survivors, C. Longmuir & V. Agyapong, 2021.
- 94) Modeling ¹³⁷Cs bioaccumulation in the salmon–resident killer whale food web of the Northeastern Pacific following the Fukushima Nuclear Accident, J. J. Alava & F. Gobas, 2016
- 95) Cesium-137 and Strontium-90 Contamination of Water Bodies in the Areas Affected by Releases from the Chernobyl Nuclear Power Plant Accident: An Overview, S. M. Vakulovsky, A. I. Nikitin, V. B. Chumichev, I. Yu. Katrich, O. A. Voitsekhovich, V. I. Medinets, V. V. Pisarev, L. A. Bovkum, E. S. Khersonsky, 1993
- 96) Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts, G. Steinhauser, A. Brandl & T. E. Johnson, 2013
- 97) Cancer after nuclear fallout: lessons from the Chernobyl accident, D. Williams, 2002
- 98) Excerpts of UNSCEAR white paper on “evaluation of data on thyroid cancer in regions affected by the Chernobyl accident, D.D.Rao, 2018.
- 99) Evacuation after a nuclear accident: Critical reviews of past nuclear accidents and proposal for future planning, T. Ohba, K. Tanigawa & L. Liutsko, 2021
- 100) Chernobyl Thyroid Cancer: 30 years of follow-up overview”, W. Weiss, 2018
- 101) Absorbed radiation doses in the thyroid as estimated by UNSCEAR and subsequent risk of childhood thyroid cancer following the Great East Japan Earthquake, 2020
- 101) The benefits of nuclear energy, B. Comby, 2006,
- 102) Values, Perceived Risks and Benefits, and Acceptability of Nuclear Energy, J. De Groot, L. Steg & W. Poortinga, 2012