



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Αξιολόγηση δυνατοτήτων τελικής διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων σε βαθείς
γεωλογικούς σχηματισμούς με έμφαση στους σχηματισμούς ορυκτού άλατος

Διπλωματική Εργασία

Σακελλαρίου Παναγιώτης Ευστάθιος

Ανδρέας Μπενάρδος, Καθηγητής (επιβλέπων)

ΑΘΗΝΑ
ΙΟΥΛΙΟΣ 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Αξιολόγηση δυνατοτήτων τελικής διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων σε βαθείς
γεωλογικούς σχηματισμούς με έμφαση στους σχηματισμούς ορυκτού άλατος
Διπλωματική Εργασία

Σακελλαρίου Παναγιώτης Ευστάθιος

Εξεταστική Επιτροπή

Ανδρέας Μπενάρδος, Καθηγητής (επιβλέπων)

Π.Νομικός, Καθηγητής

Μ.Μενεγάκη, Καθηγήτρια

ΑΘΗΝΑ
ΙΟΥΛΙΟΣ 2023

Ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος αυτού του ταξιδιού των προπτυχιακών σπουδών μου θα ήθελα να αφιερώσω λίγο χρόνο για να ευχαριστήσω κάποιους ξεχωριστούς ανθρώπους οι οποίοι στάθηκαν δίπλα μου, με βοήθησαν και με στήριξαν όποτε το χρειαζόμουν.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ανδρέα Μπενάρδο, Καθηγητή της σχολής και επιβλέποντα καθηγητή για την διπλωματική μου εργασία και τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής τα οποία δέχτηκαν να την πλαισιώσουν.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές και το εκπαιδευτικό προσωπικό ολόκληρης της σχολικής και πανεπιστημιακής μου ζωής.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους μου τους φίλους χωρίς του οποίους δεν θα έφτανα μέχρι εδώ και δεν θα πέρναγα τόσο ευχάριστα .

Τέλος ένα τεράστιο ευχαριστώ την οικογένεια μου και κυρίως τους γονείς μου για την φροντίδα και την ανατροφή που μου παρείχαν, που υποστήριζαν όλα μου τα όνειρα και κάνοντας τα αδύνατα δυνατά για να μου παρέχουν τα πάντα με άπλετη υπομονή και απεριόριστη αγάπη.

Περίληψη

Η ραδιενέργεια είναι ένα φυσικά απαντώμενο φαινόμενο που προκαλείται από τη διάσπαση ασταθών ατομικών πυρήνων. Μπορεί επίσης να παραχθεί από ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η παραγωγή πυρηνικής ενέργειας, οι δοκιμές πυρηνικών όπλων και η ιατρική ακτινοβολία. Ενώ η ραδιενέργεια έχει πολλές χρήσιμες εφαρμογές, μπορεί επίσης να έχει σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Ως αποτέλεσμα, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τις πηγές της ραδιενέργειας και πώς μπορεί να αντιμετωπιστεί με ασφάλεια. Μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις που συνδέονται με τη ραδιενέργεια είναι η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων. Τα ραδιενεργά απόβλητα παράγονται από ένα φάσμα δραστηριοτήτων, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής πυρηνικής ενέργειας, των ιατρικών εφαρμογών και της έρευνας. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ραδιενεργών αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων αποβλήτων χαμηλού, ενδιάμεσου και υψηλού επιπέδου, καθένα από τα οποία απαιτεί διαφορετική προσέγγιση στη διαχείριση. Η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων περιλαμβάνει διάφορα στάδια, όπως αποθήκευση, επεξεργασία, μεταφορά και διάθεση. Ένα από τα βασικά ζητήματα σε αυτήν τη διαδικασία είναι η επιλογή του κατάλληλου χώρου διάθεσης. Αυτό περιλαμβάνει τον εντοπισμό ενός κατάλληλου γεωλογικού περιβάλλοντος, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ασφαλή αποθήκευση και απομόνωση ραδιενεργών αποβλήτων από το περιβάλλον για εκτεταμένες χρονικές περιόδους. Τα κύρια πετρώματα που χρησιμοποιούνται για τις εγκαταστάσεις εναπόθεσης ραδιενεργών αποβλήτων περιλαμβάνουν κρυσταλλικό πέτρωμα, εξατμιστές και ιζηματογενείς σχηματισμούς. Κάθε ένα από αυτά τα πετρώματα έχει τις δικές του μοναδικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά, που τα καθιστούν κατάλληλα για διαφορετικούς τύπους αποβλήτων και μεθόδων αποθήκευσης. Για παράδειγμα, το ορυκτό αλάτι είναι ένα ιδιαίτερα κατάλληλο μέρος του βράχου για τα ραδιενεργά απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας, καθώς έχει χαμηλή διαπερατότητα και υψηλή σταθερότητα. Η επιλογή ενός κατάλληλου γεωλογικού περιβάλλοντος περιλαμβάνει διάφορα κριτήρια, συμπεριλαμβανομένων των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του πετρώματος, του δυναμικού σεισμικής δραστηριότητας και της παρουσίας υπόγειων υδάτων. Οι παράγοντες αυτοί πρέπει να αξιολογούνται προσεκτικά ώστε να εξασφαλίζεται ότι ο χώρος διάθεσης είναι ασφαλής και σταθερός μακροπρόθεσμα. Μόλις εντοπιστεί ο κατάλληλος χώρος διάθεσης, ο σχεδιασμός του ίδιου του χώρου πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά. Αυτό περιλαμβάνει τον καθορισμό της διάταξης και της κατασκευής του χώρου αποθήκευσης, καθώς και των υλικών και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την συγκράτηση των

αποβλήτων. Για παράδειγμα, το αποθετήριο πρέπει να είναι σχεδιασμένο για να αποτρέπει την έκλυση ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον, ακόμη και σε περίπτωση φυσικής καταστροφής ή ανθρώπινου σφάλματος. Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χρήση σχηματισμών αλάτων πετρωμάτων για τις εγκαταστάσεις εναπόθεσης ραδιενεργών αποβλήτων. Το ορυκτό αλάτι έχει αρκετές μοναδικές ιδιότητες που το καθιστούν μια ελκυστική επιλογή για αποθήκευση αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένης της υψηλής σταθερότητας, της χαμηλής διαπερατότητας και της ικανότητας να επουλώνει τα κατάγματα με την πάροδο του χρόνου. Ωστόσο, υπάρχουν επίσης αρκετές προκλήσεις που συνδέονται με τη χρήση του άλατος από βράχους, συμπεριλαμβανομένης της ανάγκης διαχείρισης των υψηλών θερμοκρασιών που δημιουργούνται από τη ραδιενεργό διάσπαση. Εν κατακλείδι, η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων είναι ένα σύνθετο και δύσκολο ζήτημα που απαιτεί προσεκτική εξέταση ενός φάσματος παραγόντων. Η επιλογή του κατάλληλου χώρου διάθεσης αποτελεί κρίσιμο συστατικό αυτής της διεργασίας και περιλαμβάνει προσεκτική αξιολόγηση του γεωλογικού περιβάλλοντος και των πετρωμάτων υποδοχής. Η χρήση σχηματισμών άλατος από πετρώματα ως αποθετήριο αποτελεί πολλά υποσχόμενη επιλογή, ωστόσο απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και διαχείριση ώστε να εξασφαλιστεί η ασφαλής και αποτελεσματική αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων μακροπρόθεσμα. Κατανοώντας αυτά τα ζητήματα, μπορούμε να εργαστούμε για μια πιο αποτελεσματική και βιώσιμη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων και να ελαχιστοποιήσουμε τις πιθανές αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία

Abstract

Radioactivity is a naturally occurring phenomenon caused by the decay of unstable atomic nuclei. It can also be generated by human activities, such as nuclear power production, nuclear weapons testing, and medical radiation. While radioactivity has many useful applications, it can also have significant negative impacts on the environment and human health. As a result, it is important to understand the sources of radioactivity and how it can be managed safely. One of the most significant challenges associated with radioactivity is the management of radioactive waste. Radioactive waste is generated by a range of activities, including nuclear power production, medical applications, and research. There are several types of radioactive waste, including low-level, intermediate-level, and high-level waste, each of which requires a different approach to management. The management of radioactive waste involves several stages, including storage, treatment, transportation, and disposal. One of the key considerations in this process is the selection of a suitable disposal site. This involves identifying a suitable geological environment, which can be used to safely store and isolate radioactive waste from the environment for extended periods of time. The principle host rocks used for radioactive waste repositories include crystalline rock, evaporites and sedimentary formations. Each of these rocks has its own unique properties and characteristics, which make them suitable for different types of waste and storage methods. For example, rock salt is a particularly suitable host rock for high-level radioactive waste, as it has low permeability and high stability. The selection of a suitable geological environment involves several criteria, including the physical and chemical properties of the rock, the potential for seismic activity, and the presence of groundwater. These factors must be carefully evaluated to ensure that the disposal site is safe and stable over the long term. Once a suitable disposal site has been identified, the design of the repository itself must be carefully considered. This involves determining the layout and construction of the repository, as well as the materials and methods used to contain the waste. For example, the repository must be designed to prevent the release of radioactive materials into the environment, even in the event of a natural disaster or human error. In recent years, there has been growing interest in the use of rock salt formations for radioactive waste repositories. Rock salt has several unique properties that make it an attractive option for waste storage, including its high stability, low permeability, and ability to heal fractures over time. However, there are also several challenges associated with the use of rock salt, including the need to manage the high temperatures generated by radioactive decay. In conclusion, the

management of radioactive waste is a complex and challenging issue that requires careful consideration of a range of factors. The selection of a suitable disposal site is a critical component of this process, and involves careful evaluation of the geological environment and host rocks. The use of rock salt formations as a repository is a promising option, but requires careful design and management to ensure the safe and effective storage of radioactive waste over the long term. By understanding these issues, we can work towards more effective and sustainable management of radioactive waste, and minimize the potential negative impacts on the environment and human health.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη.....	6
Abstract.....	8
Πίνακας Περιεχομένων	11
Ευρετήριο Εικόνων.....	15
1.Εισαγωγή.....	17
1.1 Ορισμός ραδιενέργειας και η ιστορία της	17
1.2 Πηγές Ραδιενέργειας	19
1.2.1 Φυσικές πηγές ραδιενέργειας	19
1.2.2 Ανθρωπογενείς πηγές ραδιενέργειας.....	21
1.3 Επιπτώσεις της ραδιενέργειας	23
1.3.1 Επιπτώσεις ραδιενέργειας στην ανθρώπινη υγεία.....	23
1.3.2 Επιπτώσεις ραδιενέργειας στο περιβάλλον	29
1.3.3 Επιπτώσεις στην οικολογία και τη βιοποικιλότητα.....	34
2. Ραδιενεργά απόβλητα.....	36
2.1 Πηγές ραδιενεργών αποβλήτων.....	37
2.2 Τύποι ραδιενεργών αποβλήτων	46
2.3 Διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων	51
2.3.1 Κατεργασία και προσαρμογή	52
2.3.2 Μεταφορά.....	52

2.3.4 Χειρισμός και αποθήκευση	53
2.3.5 Διάθεση.....	54
2.3.6 Παρακολούθηση και επιτήρηση	56
2.4 Αποθήκευση και διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων.....	57
2.4.1 Αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων:.....	58
2.4.2 Διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων:.....	59
2.5 Διαχρονικά ενεργά και υπό κατασκευή υπόγεια αποθετήρια ραδιενεργών αποβλήτων	66
2.5.1 Hostim, Τσεχοσλοβακία	66
2.5.2 Richard, Τσεχοσλοβακία	66
2.5.3 Konrad, Γερμανία	66
2.5.4 Bratrstvi, Τσεχοσλοβακία.....	67
2.5.5 Morsleben, Germany	67
2.5.6 Forsmark, Σουηδία	68
2.5.7 Olkiluoto & Loviisa, Φινλανδία.....	69
2.5.8 Zheleznogorsk, Ρωσία	69
2.5.9 Tomsk, Ρωσία.....	70
2.5.10 Dimitrovgrad, Ρωσία	70
2.5.11 Stripa, Σουηδία	70
2.5.12 Bure, Γαλλία.....	70
2.5.13 Gorleben, Γερμανία	71
2.5.14 Oskarshamn ,Σουηδία	71

2.5.15 Yucca Mountain, Η.Π.Α.....	71
2.5.16 Asse, Γερμανία	72
2.5.17 Waste Isolation Pilot Plant, Η.Π.Α.....	72
2.5.17 Onkalo, Φιλανδία	73
3. Κύριοι τύποι πετρωμάτων που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων.....	74
3.1 Κρυσταλλικά πετρώματα	75
3.2 Ιζηματογενή πετρώματα	78
3.2.1 Opalinus Clay	79
3.3 Σχηματισμοί εβαποριτών.....	79
4. Επιλογή κατάλληλου γεωλογικού περιβάλλοντος	81
4.1 Γεωλογική σταθερότητα.....	83
4.2 Υδρογεωλογικός παράγοντας.....	84
4.3 Γεωχημικές συνθήκες.....	85
4.4 Γεωτεχνικές ιδιότητες.....	86
4.5 Προσβασιμότητα	87
4.6 Περιβαλλοντικοί και κοινωνικοί παράγοντες.....	87
5. Σχεδιασμός διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων σε δόμους ορυκτού άλατος.....	88
5.1 Μέθοδοι εκσκαφής και διάθεσης	88
5.1.1 Εγκαταστάσεις εναπόθεσης με εξόρυξη.....	89
5.1.2 Μέθοδος θαλάμων και στύλων.....	90

5.1.3 Εντός σήραγγας (κάθετη γεώτρηση) με κάνιστρο μεγάλης ή μικρής διάρκειας ζωής	91
5.1.4 Εντός σήραγγας (οριζόντια γεώτρηση) με κάνιστρο μεγάλης διάρκειας ή βραχύβιας ζωής.....	93
5.1.5 Εντός σήραγγας (αξονική) με κάνιστρο βραχύβιας ζωής και ρυθμιστικό υλικό	95
5.1.6 Εντός σήραγγας (αξονική) με κάνιστρο μακράς διάρκειας ζωής και ρυθμιστικό υλικό	96
5.1.7 Εντός σήραγγας (αξονική) με υπερκοντέινερ (μικρός δακτύλιος).....	97
5.1.8 Εντός σήραγγας (αξονική) με υπερκοντέινερ (ρυθμιστικό υλικό από σκυρόδεμα)	99
5.1.9 Εντός σήραγγας (αξονική) με υπερκοντέινερ (μεγάλος δακτύλιος)	100
5.1.10 Στοές με χαλύβδινα MPC (επίχωση με μπεντονίτη)	102
5.1.11 Στοές με χαλύβδινα MPC ή σκυρόδεμα/DUCRETE CDC (επιχώσεις τσιμέντου)	103
5.1.12 Εξορύξεις μέσω βαθιών γεωτρήσεων.....	104
5.1.13 Πολύ βαθιές γεωτρήσεις.....	106
5.1.14 Μέθοδος εξόρυξης με διάλυμα.....	108
5.2 Σχεδιασμός περιέκτη αποβλήτων	108
5.3 Ρυθμιστικά υλικά.....	110
5.4 Επίχωση και σφράγιση	111
5.5 Παρακολούθηση και εποπτεία.....	112
5.6 Συμμόρφωση με κανονισμούς.....	113
6.Συμπεράσματα.....	114

7.Βιβλιογραφία.....	116
8.Ευρετήριο Εικόνων.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.Βαρέλια ραδιενεργών αποβλήτων.....	37
Εικόνα 2.Grohnde Nuclear Power Plant.....	40
Εικόνα 3.Ορυχείο ουρανίου Rössing στην Ναμίμπια	41
Εικόνα 4.Η εγκατάσταση επανεπεξεργασίας Orano La Hague.....	42
Εικόνα 5 Πυρήνας πυρηνικού εργοστασίου.....	44
Εικόνα 6. Ινστιτούτο πυρηνικής τεχνολογίας Ταϊλάνδης (TINT), βαρέλια με χαμηλής ραδιενέργειας απόβλητα.....	58
Εικόνα 7.Morsleben, Germany.....	68
Εικόνα 8 Forsmark, Σουηδία.....	69
Εικόνα 9 Waste Isolation Pilot Plant, Η.Π.Α	73
Εικόνα 10 Onkalo,Φιλανδία.....	74
Εικόνα 11. Multi Barrier Disposal Concept(Posiva).....	90
Εικόνα 12. Αλατορυχείο Winsford,UK.....	91
Εικόνα 13. Εντός σήραγγας (κάθετη γεώτρηση) με κάνιστρο μεγάλης ή μικρής διάρκειας ζωής.....	93
Εικόνα 14. Εντός σήραγγας (οριζόντια γεώτρηση) με κάνιστρο μεγάλης διάρκειας ή βραχύβιας ζωής.....	95

Εικόνα 15. Εντός σήραγγας (αξονική) με κάνιστρο βραχύβιας ζωής και ρυθμιστικό υλικό	96
Εικόνα 16. Εντός σήραγγας (αξονική) με κάνιστρο μακράς διάρκειας ζωής και ρυθμιστικό υλικό	97
Εικόνα 17. Εντός σήραγγας (αξονική) με υπερκοντέινερ (μικρός δακτύλιος)	98
Εικόνα 18. Εντός σήραγγας (αξονική) με υπερκοντέινερ (ρυθμιστικό υλικό από σκυρόδεμα	100
Εικόνα 19. Εντός σήραγγας (αξονική) με υπερκοντέινερ (μεγάλος δακτύλιος)	101
Εικόνα 20. Στοές με χαλύβδινα MPC (επίχωση με μπετονίτη)	102
Εικόνα 21. Στοές με χαλύβδινα MPC ή σκυρόδεμα/DUCRETE CDC (επιχώσεις τσιμέντου)	104
Εικόνα 22. Εξορύξεις μέσω βαθιών γεωτρήσεων	106

1.Εισαγωγή

1.1 Ορισμός ραδιενέργειας και η ιστορία της

Η ραδιενέργεια αναφέρεται στην αυθόρμητη εκπομπή σωματιδίων ή ενέργειας από τους ατομικούς πυρήνες ορισμένων στοιχείων. Αυτό το φαινόμενο παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Γάλλο φυσικό Ανρί Μπεκερέλ το 1896, ο οποίος διαπίστωσε ότι τα άλατα ουρανίου θα μπορούσαν να παράγουν μια ορατή εικόνα σε φωτογραφικές πλάκες χωρίς έκθεση στο φως. Αυτή η ανακάλυψη οδήγησε σε περαιτέρω έρευνα, η οποία τελικά οδήγησε στην ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας, της πυρηνικής ιατρικής και άλλων εφαρμογών της πυρηνικής τεχνολογίας. Οι ρίζες της ραδιενέργειας μπορούν να αναχθούν στην ανακάλυψη του ίδιου του ατόμου. Οι αρχαίοι Έλληνες ήταν από τους πρώτους που έκαναν εικασίες για τη φύση της ύλης, προτείνοντας ότι τα πάντα στο σύμπαν αποτελούνταν από μικρά, αδιαίρετα σωματίδια που ονομάζονται άτομα. Ωστόσο, δεν ήταν μέχρι τον 19ο αιώνα που οι επιστήμονες ήταν σε θέση να συλλέξουν συγκεκριμένα στοιχεία για να υποστηρίξουν

αυτήν τη θεωρία. Ένα από τα βασικά στοιχεία στην ανάπτυξη της ατομικής θεωρίας ήταν ο John Dalton, ένας Άγγλος χημικός που πρότεινε το 1803 ότι όλη η ύλη αποτελείται από μικρά, αδιαίρετα σωματίδια που ονομάζονται άτομα. Οι ιδέες του Ντάλτον βασίστηκαν σε πειράματα με αέρια, τα οποία βρήκε ότι συμπεριφέρονταν με προβλέψιμους τρόπους που θα μπορούσαν να εξηγηθούν υποθέτοντας την ύπαρξη διακριτών σωματιδίων. Τον επόμενο αιώνα, άλλοι επιστήμονες κατασκεύασαν τις ιδέες του Ντάλτον και ανέπτυξαν πιο εξελιγμένα μοντέλα του ατόμου. Ένα από τα πιο σημαντικά από αυτά ήταν το μοντέλο "πουτίγκα δαμάσκηνου" που προτάθηκε από τον J.J. Thomson το 1904. Αυτό το μοντέλο πρότεινε ότι το άτομο αποτελούνταν από μια θετικά φορτισμένη σφαίρα της ύλης με αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια ενσωματωμένα σε αυτό. Ωστόσο, η ανακάλυψη της ραδιενέργειας αμφισβήτησε αυτό το μοντέλο και άνοιξε νέους δρόμους έρευνας για τη φύση της ύλης. Το 1896, ο Ανρί Μπεκερέλ ανακάλυψε ότι ορισμένα υλικά θα μπορούσαν να παράγουν ακτινοβολία, την οποία αναγνώρισε ως σωματίδια άλφα, βήτα και γάμμα. Την ανακάλυψη αυτή ακολούθησε σύντομα το έργο της Μαρίας και του Πιερ Κιουρί, οι οποίοι ανακάλυψαν τα ραδιενεργά στοιχεία πολώνιο και ράδιο και διεξήγαγαν εκτεταμένη έρευνα στις ιδιότητές τους. Το έργο του Κιουρί βοήθησε να καθιερωθεί η έννοια της ραδιενέργειας ως θεμελιώδης ιδιότητα της ύλης. Βρήκαν ότι η διάσπαση των ραδιενεργών ατόμων ήταν μια τυχαία διαδικασία που δεν μπορούσε να προβλεφθεί, και ότι η ενέργεια που απελευθερώνεται σε αυτήν τη διαδικασία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς. Οι ανακαλύψεις τους έθεσαν τις βάσεις για την ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας, η οποία έκτοτε έχει γίνει μια σημαντική πηγή ενέργειας για μια σειρά εφαρμογών. Ένα από τα βασικά σημεία καμπής στην ιστορία της ραδιενέργειας ήταν η ανακάλυψη του νετρονίου από τον Τζέιμς Τσάντγουικ το 1932. Αυτό το σωματίδιο, το οποίο είχε προβλεφθεί από άλλους επιστήμονες, αλλά είχε διαφύγει της ανίχνευσης μέχρι τότε, βοήθησε να εξηγηθούν κάποιες από τις ανωμαλίες σε προηγούμενα πειράματα και άνοιξε νέους δρόμους έρευνας για τη φύση της ύλης. Η ανάπτυξη των πυρηνικών όπλων κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου ανέδειξε τους πιθανούς κινδύνους της ραδιενέργειας, οδηγώντας σε αυξημένη ρύθμιση και εποπτεία της πυρηνικής έρευνας και των εφαρμογών. Ωστόσο, αυτές οι ίδιες εξελίξεις οδήγησαν επίσης σε νέες ανακαλύψεις στην πυρηνική ιατρική, η οποία χρησιμοποιεί ραδιενεργά ισότοπα για τη διάγνωση και τη θεραπεία ενός ευρέος φάσματος ασθενειών. Σήμερα, η ραδιενέργεια εξακολουθεί να διαδραματίζει κεντρικό ρόλο σε πολλούς τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας. Χρησιμοποιείται σε οτιδήποτε, από την εξερεύνηση του διαστήματος μέχρι τις βιομηχανικές διεργασίες μέχρι την ιατρική απεικόνιση και τη θεραπεία του καρκίνου. Αν και οι κίνδυνοι που συνδέονται με τη

ραδιενέργεια εξακολουθούν να είναι σημαντικοί, η συνεχιζόμενη έρευνα και καινοτομία συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση αυτών των κινδύνων και στην αξιοποίηση νέων δυνατοτήτων για το μέλλον. (L'Annunziata, 2016)

1.2 Πηγές Ραδιενέργειας

1.2.1 Φυσικές πηγές ραδιενέργειας

Φυσικές πηγές ραδιενέργειας υπάρχουν παντού γύρω μας και περιλαμβάνουν: (UNSCEAR, 2010)

- **Κοσμική ακτινοβολία:** Η κοσμική ακτινοβολία αναφέρεται σε σωματίδια υψηλής ενέργειας που προέρχονται από το διάστημα και μπορούν να διεισδύσουν στην ατμόσφαιρα της Γης. Αυτά τα σωματίδια περιλαμβάνουν πρωτόνια, ηλεκτρόνια και κοσμικές ακτίνες, οι οποίες αποτελούνται κυρίως από ατομικούς πυρήνες όπως ήλιο και άνθρακα. Η κοσμική ακτινοβολία είναι μια φυσική πηγή έκθεσης στην ακτινοβολία, και η έντασή της εξαρτάται από το υψόμετρο, το γεωγραφικό πλάτος και άλλους παράγοντες. Για παράδειγμα, οι άνθρωποι που ζουν σε μεγαλύτερα υψόμετρα ή κοντά στους πόλους εκτίθενται σε υψηλότερα επίπεδα κοσμικής ακτινοβολίας από τους ανθρώπους που ζουν σε χαμηλότερα υψόμετρα ή κοντά στον ισημερινό.
- **Αέριο ραδόνιο:** Το αέριο ραδόνιο είναι ένα ραδιενεργό αέριο που παράγεται από τη διάσπαση του ουρανίου σε πετρώματα και έδαφος. Μπορεί να κοιμηθεί σε σπίτια και άλλα κτίρια μέσα από ρωγμές στα θεμέλια ή τους τοίχους. Το αέριο ραδόνιο είναι η δεύτερη κύρια αιτία του καρκίνου του πνεύμονα, μετά τον καπνό του καπνού. Η μακροχρόνια έκθεση σε αέριο ραδόνιο αυξάνει τον κίνδυνο καρκίνου του πνεύμονα, ιδιαίτερα για καπνιστές. Ο έλεγχος για αέριο ραδόνιο και η μείωση της έκθεσης σε αυτό μπορεί να βοηθήσει στην πρόληψη του καρκίνου του πνεύμονα.
- **Γήινη ακτινοβολία:** Η επίγεια ακτινοβολία παράγεται από ραδιενεργά στοιχεία που υπάρχουν στο φλοιό της γης, συμπεριλαμβανομένου του ουρανίου, του θορίου και του καλίου. Αυτά τα στοιχεία διασπώνται με την πάροδο του χρόνου και εκπέμπουν ακτινοβολία άλφα, βήτα και γάμμα. Η ποσότητα της επίγειας ακτινοβολίας εξαρτάται από τον τύπο του πετρώματος ή του εδάφους και τη θέση του. Για παράδειγμα, τα γρανιτικά πετρώματα περιέχουν περισσότερο ουράνιο και παράγουν περισσότερη ακτινοβολία από άλλους τύπους πετρωμάτων.

- **Ραδιενεργά ισότοπα στην ατμόσφαιρα:** Ραδιενεργά ισότοπα όπως ο άνθρακας-14, το τρίτιο και το βηρύλλιο-7 υπάρχουν στην ατμόσφαιρα και παράγονται από την κοσμική ακτινοβολία που αλληλεπιδρά με την ατμόσφαιρα της Γης. Ο άνθρακας-14 χρησιμοποιείται στη χρονολόγηση με άνθρακα για τον προσδιορισμό της ηλικίας των οργανικών υλικών, ενώ το τρίτιο χρησιμοποιείται ως ιχνηλάτης σε περιβαλλοντικές μελέτες.
- **Ραδιενεργά ισότοπα στους ωκεανούς:** Ραδιενεργά ισότοπα όπως το κάλιο-40, το ουράνιο και το θόριο υπάρχουν επίσης στους ωκεανούς, και η διάσπασή τους συμβάλλει στα επίπεδα ακτινοβολίας του φυσικού υποβάθρου. Τα επίπεδα αυτών των ισωτόπων ποικίλλουν ανάλογα με την τοποθεσία και το βάθος του ωκεανού.
- **Κοσμικές ακτίνες που αλληλεπιδρούν με την ατμόσφαιρα:** Οι κοσμικές ακτίνες αλληλεπιδρούν με την ατμόσφαιρα για να παράγουν δευτερογενή ακτινοβολία, συμπεριλαμβανομένων των μιονίων και των νετρονίων. Τα μίονια είναι σωματίδια υψηλής ενέργειας που μπορούν να εισχωρήσουν βαθιά μέσα στη γη, ενώ τα νετρόνια μπορούν να προκαλέσουν πυρηνικές αντιδράσεις στα υλικά.
- **Τρόφιμα και ποτά:** Μικρές ποσότητες ραδιενεργών ισωτόπων μπορούν να βρεθούν σε ορισμένα τρόφιμα και ποτά, όπως μπανάνες, πατάτες και καρύδια Βραζιλίας. Αυτά τα ισωτόπα είναι παρόντα στο έδαφος όπου καλλιεργούνται τα φυτά και προσλαμβάνονται από τις ρίζες του φυτού. Τα επίπεδα αυτών των ισωτόπων στα τρόφιμα είναι γενικά πολύ χαμηλά και δεν ενέχουν σημαντικό κίνδυνο για την υγεία.
- **Ανθρώπινο σώμα:** Το ανθρώπινο σώμα περιέχει φυσικά ραδιενεργά ισωτόπα όπως άνθρακα-14, κάλιο-40 και υδρογόνο-3 (τρίτιο). Ο άνθρακας-14 χρησιμοποιείται στην ιατρική απεικόνιση και την αρχαιολογική χρονολόγηση, ενώ το κάλιο-40 είναι σημαντικό στη διατήρηση της ισορροπίας ηλεκτρολυτών του σώματος.

Γενικά, η έκθεση σε φυσικές πηγές ακτινοβολίας είναι αναπόφευκτη και τα επίπεδα έκθεσης είναι γενικά χαμηλά και δεν αποτελούν λόγο ανησυχίας. Ωστόσο, η μακροπρόθεσμη έκθεση σε υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο καρκίνου και άλλων ασθενειών που σχετίζονται με την ακτινοβολία. Είναι σημαντικό να ληφθούν μέτρα για την ελαχιστοποίηση της έκθεσης σε ακτινοβολία, όπως οι δοκιμές για αέριο ραδόνιο, η χρήση προστατευτικού εξοπλισμού κατά τη διάρκεια ιατρικών διαδικασιών που χρησιμοποιούν

ακτινοβολία, και μετά τα πρωτόκολλα ασφαλείας σε πυρηνικούς σταθμούς και άλλες βιομηχανικές διεργασίες που περιλαμβάνουν ραδιενεργά υλικά. (L'Annunziata, 2012)

1.2.2 Ανθρωπογενείς πηγές ραδιενέργειας

Ιατρικές διαδικασίες: Οι ιατρικές διαδικασίες που χρησιμοποιούν ιονίζουσα ακτινοβολία, όπως οι ακτίνες X, οι αξονικές τομογραφίες και η πυρηνική ιατρική, είναι μια κοινή πηγή έκθεσης σε ακτινοβολία. Αυτές οι διαδικασίες είναι συχνά απαραίτητες για τη διάγνωση και τη θεραπεία, αλλά μπορούν επίσης να εκθέσουν τους ασθενείς σε σημαντικές ποσότητες ακτινοβολίας. Η ποσότητα ακτινοβολίας στην οποία εκτίθεται ο ασθενής κατά τη διάρκεια μιας ιατρικής διαδικασίας μπορεί να ποικίλει ανάλογα με παράγοντες όπως ο τύπος της διαδικασίας, ο αριθμός των σαρώσεων, η ηλικία και η κατάσταση της υγείας του ασθενούς. Για να ελαχιστοποιήσουν την έκθεση σε ακτινοβολία κατά τη διάρκεια ιατρικών διαδικασιών, οι επαγγελματίες του ιατρικού τομέα χρησιμοποιούν μια ποικιλία τεχνικών. Για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιήσουν ποδιές μόλυβδου για να θωρακίσουν τα μέρη του σώματος που δεν απεικονίζονται ή μπορούν να χρησιμοποιήσουν τη χαμηλότερη δυνατή δόση ακτινοβολίας που εξακολουθεί να παράγει υψηλής ποιότητας εικόνες. Επιπρόσθετα, οι επαγγελματίες του ιατρικού τομέα είναι εκπαιδευμένοι να αξιολογούν τους κινδύνους και τα οφέλη από τη χρήση ιονίζουσας ακτινοβολίας και να τα χρησιμοποιούν μόνο όταν είναι απαραίτητο.

Πυρηνικοί σταθμοί: Τα πυρηνικά εργοστάσια παράγουν ηλεκτρισμό αξιοποιώντας την ενέργεια που απελευθερώνεται από τις πυρηνικές αντιδράσεις. Αν και η πυρηνική ενέργεια είναι σχετικά καθαρή και αποδοτική πηγή ενέργειας, παράγει επίσης ραδιενεργά απόβλητα και μπορεί να δημιουργήσει κινδύνους για τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον. Τα ραδιενεργά απόβλητα που παράγονται από πυρηνικούς σταθμούς μπορούν να παραμείνουν επικίνδυνα για χιλιάδες χρόνια και πρέπει να αντιμετωπιστούν προσεκτικά για την πρόληψη της μόλυνσης του περιβάλλοντος. Εκτός από τον κίνδυνο ραδιενεργών αποβλήτων, οι πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής μπορούν επίσης να θέσουν σε κίνδυνο τη δημόσια ασφάλεια σε περίπτωση ατυχήματος. Το πιο γνωστό πυρηνικό ατύχημα είναι η καταστροφή του Τσερνομπίλ το 1986, η οποία απελευθέρωσε μεγάλες ποσότητες ραδιενεργού υλικού στο περιβάλλον και προκάλεσε σημαντικά προβλήματα υγείας σε όσους εκτέθηκαν στην

ακτινοβολία. Από τότε, έχουν τεθεί αυστηροί κανονισμοί και πρωτόκολλα ασφαλείας για να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος πυρηνικών ατυχημάτων. (Giusti, 2009)

Βιομηχανικές διεργασίες: Ορισμένες βιομηχανικές διεργασίες μπορούν να παράγουν ραδιενεργά απόβλητα και να εκθέσουν τους εργαζομένους σε ακτινοβολία. Για παράδειγμα, η εξόρυξη και η επεξεργασία ουρανίου και άλλων ραδιενεργών υλικών μπορούν να απελευθερώσουν ραδιενεργό σκόνη και αέρια στο περιβάλλον. Οι εργαζόμενοι σε αυτές τις βιομηχανίες κινδυνεύουν να εκτεθούν σε ραδιενεργά υλικά, γεγονός που μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο ανάπτυξης καρκίνου και άλλων προβλημάτων υγείας. Άλλες βιομηχανικές διεργασίες που περιλαμβάνουν ιονίζουσα ακτινοβολία, όπως η ακτινοβόληση τροφίμων και η αποστείρωση ιατρικού εξοπλισμού, μπορούν επίσης να συμβάλουν σε ανθρωπογενείς πηγές ακτινοβολίας. Ωστόσο, αυτές οι διαδικασίες γενικά θεωρούνται ασφαλείς και έχουν αυστηρούς κανονισμούς και πρωτόκολλα για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου έκθεσης σε ακτινοβολία στους εργαζόμενους και στο κοινό.

Καταναλωτικά προϊόντα: Ορισμένα καταναλωτικά προϊόντα, όπως ανιχνευτές καπνού και φωτεινά ρολόγια, περιέχουν μικρές ποσότητες ραδιενεργού υλικού. Αν και τα προϊόντα αυτά ενέχουν μικρό κίνδυνο για τη δημόσια υγεία, μπορούν να συμβάλουν στις ανθρωπογενείς πηγές ακτινοβολίας. Σε γενικές γραμμές, ο κίνδυνος από αυτά τα καταναλωτικά προϊόντα είναι πολύ χαμηλός και συχνά αντισταθμίζεται από τα οφέλη που παρέχουν.

Στρατιωτικές δραστηριότητες: Στρατιωτικές δραστηριότητες, όπως οι δοκιμές πυρηνικών όπλων και η εξόρυξη ουρανίου για την παραγωγή πυρηνικών όπλων, έχουν συμβάλει σημαντικά στις ανθρωπογενείς πηγές ακτινοβολίας. Η χρήση απεμπλουτισμένου ουρανίου σε στρατιωτικό εξοπλισμό έχει επίσης προκαλέσει ανησυχίες για την έκθεση σε ραδιενεργά υλικά στο στρατιωτικό προσωπικό και τους πολίτες. Η έκθεση στο απεμπλουτισμένο ουράνιο μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο καρκίνου και άλλων προβλημάτων υγείας, ιδιαίτερα αν εμφανίζεται για παρατεταμένο χρονικό διάστημα.

Τα ραδιενεργά απόβλητα από πυρηνικούς σταθμούς, ιατρικές εγκαταστάσεις και άλλες πηγές μπορούν να παραμείνουν ραδιενεργά για χιλιάδες χρόνια και να δημιουργήσουν κινδύνους για τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον. Η κατάλληλη αποθήκευση και διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων είναι απαραίτητη για την πρόληψη της έκλυσης ακτινοβολίας στο

περιβάλλον. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος αποθήκευσης ραδιενεργών αποβλήτων είναι σε εξειδικευμένους περιέκτες που είναι σχεδιασμένοι για την πρόληψη διαρροής και μόλυνσης. Ορισμένες χώρες χρησιμοποιούν επίσης βαθιές γεωλογικές αποθήκες, οι οποίες περιλαμβάνουν την αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων σε υπόγειους θαλάμους που έχουν σχεδιαστεί για να τα απομονώνουν από το περιβάλλον. Γενικά, οι ανθρωπογενείς πηγές ακτινοβολίας μπορούν να δημιουργήσουν κινδύνους για τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον, και εφαρμόζονται αυστηροί κανονισμοί και πρωτόκολλα ασφαλείας για την ελαχιστοποίηση αυτών των κινδύνων. Είναι σημαντικό να συνεχίσετε να παρακολουθείτε ανθρωπογενείς πηγές ακτινοβολίας, ώστε να διασφαλίσετε ότι η διαχείρισή τους γίνεται με ασφάλεια και να εμποδίσετε τυχαίες εκλύσεις ή εκθέσεις. Κατανοώντας τις πηγές και τους κινδύνους της τεχνητής ακτινοβολίας, μπορούμε να συνεχίσουμε να αναπτύσσουμε τεχνολογίες και πρωτόκολλα που ελαχιστοποιούν την έκθεση και διασφαλίζουν ότι μπορούμε να απολαμβάνουμε τα οφέλη της ιονίζουσας ακτινοβολίας, ενώ ελαχιστοποιούμε τους κινδύνους (Hu, 2010).

1.3 Επιπτώσεις της ραδιενέργειας

1.3.1 Επιπτώσεις ραδιενέργειας στην ανθρώπινη υγεία

Η ραδιενέργεια μπορεί να έχει διάφορες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, ανάλογα με την ποσότητα και τον τύπο της έκθεσης σε ακτινοβολία. Εδώ είναι μερικά από τα πιθανά αποτελέσματα: Τα ραδιενεργά σωματίδια αλληλεπιδρούν κυρίως με τα κύτταρα και τους ιστούς του ανθρώπινου σώματος μέσω της βλάβης του δέρματος, του πεπτικού και του αναπνευστικού συστήματος, υπερβαίνοντας το επίπεδο ανοχής της λαμβανόμενης δόσης. Ήπια συμπτώματα είναι ορατά με τη δόση των 30 rads (Gofman, 1981). Με την επέκταση του ρυθμού δόσης, της διάρκειας και της συνολικής δόσης αυξάνεται και η πιθανότητα μετρήσιμων επιπτώσεων. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας για τη μέτρηση της ακτινοβολίας είναι τα μέρη του σώματος που εκτίθενται στην ακτινοβολία.

Ιστός και κυτταρικό DNA

Τα όργανα που αποτελούνται από κύτταρα που διαιρούνται αργά (μυς, οστά, ήπαρ, νεφρά, πνεύμονες) χαρακτηρίζονται συχνά ως ανθεκτικά στη ραδιενέργεια. Αντίθετα, τα ταχέως πολλαπλασιαζόμενα κύτταρα του μυελού των οστών, τα βλαστικά κύτταρα που υπάρχουν στους όρχεις και στα επιθηλιακά κύτταρα του δέρματος, του στομάχου και του εντέρου- όλα ταξινομούνται ως ραδιενεργοευαίσθητα. Η σοβαρότητα της βλάβης ανιχνεύεται μέσω της

ικανότητας επαναπληθυσμού μετά την έκθεση στην ραδιενέργεια. Ο τραυματισμός θα είναι επανορθώσιμος εάν το ποσοστό των λειτουργικών κυττάρων μετά την έκθεση πέσει κάτω από την καταδίκη επίπεδο. Γενικά χρειάζονται αρκετές εβδομάδες για την αποκατάσταση του ιστού. Η κατάσταση της βλάβης θα μετρηθεί με βάση την κατάσταση της υγείας, τη δόση και τη διάρκεια, καθώς και την έκταση ανοχής του ιστού, η οποία θα δηλώσει τη μειονεξία ή τη σοβαρότητα του αντίκτυπου. Ωστόσο, είναι εξαιρετικά απίθανο ο ρυθμός βλάβης να εξαρτάται από το μέγεθος παρά από την κινητικότητα των κυττάρων του ιστού. Για το λόγο αυτό, ο κυτταρικός θάνατος και η εξάντληση παρουσιάζονται περισσότερο σε ταχέως διαιρούμενους ιστούς (γαστρεντερικό σύστημα, όρχεις) και λιγότερο σε αργά διαιρούμενους ιστούς (νεφρά, πνεύμονες). Η ραδιενέργεια γενικά ιονίζει συγκεκριμένα κύτταρα και προκαλεί βλάβες. Μεταξύ αυτών, η ακτινοβολία γάμμα λέγεται ότι είναι η πιο επικίνδυνη, καθώς μπορεί να ιονίσει το μόριο του νερού και το ιόν της μπορεί να αντιδράσει με το DNA και να το διαρρήξει κατά τη διέλευσή του από ένα κύτταρο. Χαμηλές δόσεις ακτινοβολίας υποβάθρου για μεγάλο χρονικό διάστημα μπορεί να προκαλέσουν μόνιμη βλάβη στα κύτταρα, αλλά μπορεί να επιδιορθώσουν τη βλάβη λανθασμένα, γεγονός που θα οδηγήσει περαιτέρω σε γενετική μετάλλαξη. Σε υψηλές δόσεις ακτινοβολίας, τα κύτταρα μπορεί να συνεχίσουν να παράγουν μη φυσιολογικά κύτταρα που μπορεί να είναι καρκινικά και μερικές φορές οι ιστοί δεν λειτουργούν πλέον. Η διάσπαση της διπλής έλικας του DNA (DSBs) θεωρείται μέχρι σήμερα ιδιαίτερα υπεύθυνη για το θάνατο των κυττάρων λόγω της επίδρασης της ραδιενέργειας στο κυτταρικό DNA. Διάφορες γενετικές ασθένειες οδηγούν σε ραδιενεργοευαισθησία, ανοσοανεπάρκεια και μερικές φορές σε καρκινογένεση που προκαλείται από βλάβες στην επιδιόρθωση των DSB35 (Kufe DW, 2003).

Αναπαραγωγή

Εκτός από την έκθεση σε φυσική ραδιενέργεια, επιπτώσεις στο αναπαραγωγικό όργανο μπορεί να προέρχονται από τον αντίκτυπο της ιατρικής θεραπείας και τις συνέπειες της θεραπευτικής ακτινοβολίας και της σκόπιμης έκθεσης στην έρευνα. Η ραδιενέργεια τείνει να έχει σημαντική επίδραση στην αναπαραγωγική λειτουργία, η οποία εξαρτάται γενικά από τη συνολική δόση, τη διάρκεια και το τυχόν κάταγμα που υπάρχει σε διάφορους ιστούς και όργανα. Οι γονάδες είναι ιδιαίτερα ακτινοευαίσθητα όργανα που έχουν επακόλουθες ή μόνιμες επιπτώσεις στη γονιμότητα. Κατά συνέπεια, οι ενήλικες μπορεί να παρουσιάσουν διακυμάνσεις ή ανεπάρκεια των ορμονών του φύλου και οι ανήλικοι μπορεί να υποφέρουν από δυσλειτουργία στην εφηβεία. Όσον αφορά το κεντρικό νευρικό σύστημα, ο άξονας

υποθαλάμου-υπόφυσης σχετίζεται με την εμφάνιση της εφηβείας, την κατανομή των ορμονών κ.λπ. Έτσι, η κρανιακή ακτινοβολία μπορεί να εμφανίσει τα συμπτώματα της πρόωμης ή όψιμης εφηβείας, της έλλειψης ορμονών του φύλου, της υπερβολικής ροής της ορμόνης προλακτίνης. Παρόλο που επηρεάζει ομοίως τόσο τους άνδρες όσο και τις γυναίκες, οι γυναίκες φαίνεται να είναι πιο ευάλωτες σε χαμηλότερες δόσεις ακτινοβολίας, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στη θεραπεία που έλαβαν για τη λεμφοβλαστική λευχαιμία. Η έκθεση σε ακτινοβολία της κοιλιάς, της πύελου, της σπονδυλικής στήλης ή των όρχεων μπορεί να προκαλέσει υπογονιμότητα και μειωμένη μείωση των στεροειδών του φύλου. Ωστόσο, αναφέρονται επίσης πρόωρος τοκετός, πρόωρα μωρά, χαμηλός αριθμός σπερματοζωαρίων, γενετική μετάλλαξη, μη φυσιολογική ανάπτυξη του μωρού, αποβολές, προβληματική εγκυμοσύνη λόγω σωστής διαστολής της μήτρας, δυσλειτουργία των ωοθηκών, ενδοκρινικές δυσλειτουργίες ως αποτέλεσμα της ακτινοβολίας (Ash, 1980).

Οξεία ασθένεια από ακτινοβολία:

Η οξεία ασθένεια από την ακτινοβολία προκαλείται από την έκθεση σε υψηλά επίπεδα ιονίζουσας ακτινοβολίας σε σύντομο χρονικό διάστημα. Η σοβαρότητα των συμπτωμάτων εξαρτάται από το επίπεδο και τη διάρκεια της έκθεσης. Η έναρξη των συμπτωμάτων μπορεί να συμβεί μέσα σε λίγα λεπτά έως και λίγες ημέρες μετά την έκθεση. Τα συμπτώματα μπορεί να περιλαμβάνουν ναυτία, έμετο, διάρροια, κόπωση, πυρετό, τριχόπτωση, εγκαύματα στο δέρμα και εξασθενημένο ανοσοποιητικό σύστημα. Σε σοβαρές περιπτώσεις, η οξεία ασθένεια από την ακτινοβολία μπορεί να οδηγήσει σε ανεπάρκεια οργάνων και θάνατο. Η θεραπεία της οξείας ασθένειας από την ακτινοβολία περιλαμβάνει τη διαχείριση των συμπτωμάτων και την υποστήριξη της ικανότητας του σώματος να ανακάμψει. Η θεραπεία μπορεί να περιλαμβάνει φάρμακα για την αντιμετώπιση συμπτωμάτων όπως η ναυτία και το άλγος, μεταγγίσεις αίματος για την αντικατάσταση κατεστραμμένων κυττάρων αίματος και αντιβιοτικά για την πρόληψη λοιμώξεων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι μεταμοσχεύσεις μυελού των οστών μπορεί να είναι απαραίτητες για την αποκατάσταση της ικανότητας του σώματος να παράγει αιμοσφαίρια (Donnelly, 2010).

Αυξημένος κίνδυνος καρκίνου:

Η έκθεση σε ιονίζουσα ακτινοβολία μπορεί να βλάψει το DNA, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μεταλλάξεις που αυξάνουν τον κίνδυνο καρκίνου. Ο κίνδυνος καρκίνου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος της ακτινοβολίας, η δόση και η

διάρκεια της έκθεσης. Μερικοί τύποι καρκίνου που μπορεί να προκληθούν από την έκθεση στην ακτινοβολία περιλαμβάνουν τη λευχαιμία, τον καρκίνο του θυρεοειδούς, τον καρκίνο του πνεύμονα και τον καρκίνο του μαστού. Ο κίνδυνος καρκίνου από την έκθεση στην ακτινοβολία γενικά θεωρείται μικρός σε χαμηλές δόσεις. Ωστόσο, δεν υπάρχει όριο κάτω από το οποίο δεν υπάρχει κίνδυνος καρκίνου. Συνεπώς, είναι σημαντικό να ελαχιστοποιείται η περιττή έκθεση στην ακτινοβολία, ιδιαίτερα για άτομα που είναι πιο ευαίσθητα στις επιπτώσεις της ακτινοβολίας, όπως παιδιά και έγκυες γυναίκες (Mettler, 2012).

Γενετική βλάβη:

Η έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί επίσης να βλάψει το DNA στα αναπαραγωγικά κύτταρα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε γενετικές μεταλλάξεις που μεταβιβάζονται στις μελλοντικές γενιές. Ο κίνδυνος γενετικής βλάβης εξαρτάται από παράγοντες όπως ο τύπος της ακτινοβολίας, η δόση και η ηλικία του ατόμου κατά τη στιγμή της έκθεσης. Οι επιπτώσεις της γενετικής βλάβης από την έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί να μην είναι εμφανείς για αρκετές γενιές. Ο κίνδυνος γενετικής βλάβης είναι υψηλότερος για τα άτομα που εκτίθενται σε ακτινοβολία πριν από τη γέννηση ή κατά τη διάρκεια της παιδικής ηλικίας. Έγκυες γυναίκες και γυναίκες σε αναπαραγωγική ηλικία πρέπει να λαμβάνουν επιπρόσθετες προφυλάξεις για να αποφύγουν την περιττή έκθεση σε ακτινοβολία. Οι μεταλλάξεις είναι αλλαγές στη δομή του DNA που μπορούν να συμβούν με διάφορους τρόπους, αλλά δύο βασικές βάσεις είναι η ραδιενέργεια και τα χημικά μεταλλαξιογόνα. Μεταξύ ιονίζουσας και μη ιονίζουσας ακτινοβολίας, η ιονίζουσα ακτινοβολία τείνει να έχει πιο βλαβερές συνέπειες καθώς εκπέμπει υψηλή ενέργεια από τη μη ιονίζουσα ακτινοβολία. Η ιονίζουσα ακτινοβολία επιτίθεται στα κανονικά άτομα και τα αναγκάζει να διασπαστούν σε ιόντα και ελεύθερες ρίζες. Αυτά τα φορτισμένα ελεύθερα σωματίδια χτυπούν στη συνέχεια τον ομοιοπολικό δεσμό που υπάρχει στον νουκλεοτιδικό δεσμό στην αλυσίδα του DNA. Ως αποτέλεσμα, το DNA διασπάται σε πολλά μικρά τμήματα, τα οποία τα κύτταρα προσπαθούν να ανακτήσουν μόνα τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα κύτταρα ανακτούν τα κομμάτια του DNA λανθασμένα και αλλάζουν την αλληλουχία του DNA, γεγονός που δημιουργεί μεταλλαξιγένεση. Οι μεταλλάξεις είναι δύο τύπων, η μία είναι οι αντικαταστάσεις και η άλλη οι μεταλλάξεις μετατόπισης πλαισίου. Η υποκατάσταση είναι η αντικατάσταση μιας βάσης από μια άλλη και οι μεταλλάξεις μετατόπισης πλαισίου περιλαμβάνουν είτε επιπλέον νουκλεοτίδια είτε την αφαίρεση ενός ή περισσότερων νουκλεοτιδίων. Αυτή η λειτουργία μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή καρκινικών κυττάρων όπως η λευχαιμία και ο καρκίνος

του θυρεοειδούς. Εκτός αυτού, γενετικές ασθένειες που οφείλονται σε μονοκυτταρική κληρονομικότητα είναι η κυστική ίνωση, η δρεπανοκυτταρική αναιμία, το σύνδρομο Marfan- λόγω πολυπαραγοντικής γενετικής κληρονομικότητας είναι η νόσος του Alzheimer, η αρθρίτιδα κ.λπ. μπορούν επίσης να συμβούν σε περίπτωση διπλασιασμού της δόσης (BEIR.V, 1990).

Μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στην υγεία:

Η έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο μακροπρόθεσμων επιδράσεων στην υγεία όπως καρδιαγγειακή νόσο, καταρράκτης και άλλες χρόνιες παθήσεις. Ο κίνδυνος αυτών των επιδράσεων εξαρτάται από παράγοντες όπως ο τύπος της ακτινοβολίας, η δόση, η ηλικία και η κατάσταση της υγείας του ατόμου κατά τη στιγμή της έκθεσης. Οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε ακτινοβολία θεωρούνται γενικά ότι είναι μεγαλύτερος κίνδυνος σε υψηλότερες δόσεις και για παρατεταμένες περιόδους έκθεσης. Είναι σημαντικό να ακολουθούνται τα πρωτόκολλα ασφαλείας και οι κανονισμοί για την έκθεση σε ακτινοβολία, ιδιαίτερα σε επαγγελματικούς χώρους όπου είναι πιθανότερο να συμβεί έκθεση.

Καρδιαγγειακές και νευρολογικές διαταραχές

Εκτός από τη φυσική ραδιενέργεια, οι ιατρικές τεχνολογίες έχουν επίσης αντίκτυπο στο ανθρώπινο καρδιαγγειακό και νευρολογικό σύστημα όσον αφορά τις θεραπείες. Η ακτινοθεραπεία είναι μια δημοφιλής μέθοδος θεραπείας για την αφαίρεση όγκων και καρκίνου, η οποία χρησιμοποιείται με τη σύνθεση υψηλής ενέργειας (πάνω από 30-35 Gy) που οδηγεί σε καρδιακές παθήσεις που προκαλούνται από την ακτινοβολία, προβλήματα στο κυκλοφορικό σύστημα και δημιουργεί καρδιοτοξικότητα. Σύμφωνα με την τρέχουσα βιβλιογραφία, υπάρχουν τρεις προτεινόμενοι μηχανισμοί καρδιαγγειακών παθήσεων που οφείλονται στην επαγόμενη ακτινοβολία. Ο πρώτος είναι η ισχαιμία που μπορεί να προέρχεται από σοβαρή δυσλειτουργία των τριχοειδών δικτύων .Ο δεύτερος είναι η ανατομική καταστροφή των αρτηριών που υπάρχουν στην καρδιά και ο τελευταίος είναι η συνεχής αντίδραση της φλεγμονής η οποία αποδίδεται σε μεταγραφικό παράγοντα που ρυθμίζει γονίδια υπεύθυνα για την ανοσολογική απόκριση. Η ραδιενέργεια μπορεί να προκαλέσει μια σειρά καρδιακών παθήσεων που περιλαμβάνουν περικαρδίτιδα (φλεγμονή των ιστών της καρδιάς), πρόωρη στεφανιαία νόσο, νόσο των καρδιακών βαλβίδων, αρρυθμία (μεταβολή του καρδιακού ρυθμού), αθηροσκλήρωση, μυοκαρδιοπάθεια

(διογκωμένη καρδιά), συμφορητική καρδιακή ανεπάρκεια (απώλεια της ικανότητας άντλησης της καρδιάς) και ανωμαλία της καρδιακής αγωγιμότητας. Η σημαντικότερη αιτία θανάτου λόγω ακτινοθεραπείας είναι οι στεφανιαίες αλλοιώσεις. Λόγω της βαριάς έκθεσης σε ραδιενέργεια, ο συνδυασμός διαφόρων κυττάρων στο δίκτυο του ιππόκαμπου μπορεί να είναι η αιτία της μεταβολής των επιπέδων των συναπτικών πρωτεϊνών, της πολυπλοκότητας των δενδριτών κ.λπ. Η έρευνα για την ραδιενέργεια δήλωσε ότι η θεωρούμενη ασφαλής δόση οξείας έκθεσης είναι 0,1 Gy⁴⁸. Σύμφωνα με μελέτες, η νευρογένεση αναστέλλεται από την ραδιενέργεια μέσω του ποσού της δόσης (>2 Gy έως 45 Gy) και μέσω των μητρικών κυττάρων και του ακτινοευαίσθητου πληθυσμού των νευρικών βλαστών που καταστρέφονται στον εγκέφαλο. Η διαδικασία αυτή εμποδίζει τη δημιουργία νέων κυττάρων και προκαλεί νευροφλεγμονή. Η έκθεση σε χαμηλές δόσεις ραδιενέργειας τείνει να ξεκινήσει την αλλαγή της οξειδοαναγωγικής ισορροπίας με την αύξηση του αντιδραστικού οξυγόνου και των ειδών του αζώτου στο Κεντρικό Νευρικό Σύστημα (Limoli, 2004). Εκτός από αυτό, η έκθεση σε υψηλές δόσεις έχει γενικά διάφορες επιπτώσεις στον εγκέφαλο και τη γνωστική λειτουργία και παρεμποδίζει την ικανότητα απομνημόνευσης και μάθησης. Μπορεί επίσης να βλάψει έμμεσα τα άλλα ρυθμιστικά συστήματα που δημιουργούνται από το Κεντρικό Νευρικό Σύστημα. Τόσο η οξεία όσο και η χρόνια έκθεση μπορεί να μεταβάλει τη λειτουργία του Κεντρικού Νευρικού Συστήματος που οδηγεί περαιτέρω στο θάνατο ενός κυττάρου από την τριβή των πρωτεϊνών, το οξειδωτικό στρες και τη μιτοχονδριακή βλάβη που προκαλούν νευρολογικές ασθένειες. Εκτός από αυτό, οι δυσλειτουργικές ή κακοδιπλωμένες πρωτεΐνες μπορεί να είναι ο εκκινητής της νόσου του Alzheimer ή του Parkinson, η οποία μπορεί να διεγείρει τα μονοπάτια απόκρισης στο στρες για την απομάκρυνση των συσσωρευμένων πρωτεϊνών. Ο αντίκτυπος της ραδιενέργειας στο κεντρικό νευρικό σύστημα είναι ιδιαίτερα πιο αισθητός στα παιδιά απ' ό,τι στους ενήλικες και μπορεί να προκαλέσει μαθησιακές ανικανότητες και γνωστικές διαταραχές.

Αναπνευστικές και γαστρεντερικές διαταραχές

Η εισπνοή ραδιονουκλιδίων στο φυσιολογικό περιβάλλον που υπερβαίνουν τη δόση στο εκτεθειμένο άτομο μπορεί επίσης να προκαλέσει αναπνευστική νόσο λόγω ιονίζουσας ακτινοβολίας. Γενικά, οι πνεύμονες είναι ραδιενεργοευαίσθητοι και συνεπώς δεν μπορούν να αντέξουν μεγάλες δόσεις ραδιενέργειας λόγω της αναγεννητικής τους ικανότητας. Με βάση τη συνολική δόση έκθεσης, ο όγκος της ακτινοβολημένης μερίδας ραδιονουκλιδίων

μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες που μπορεί να οδηγήσουν σε μειωμένη οξυγόνωση και μειωμένο δυναμικό κυκλοφορίας. Οι οξείες επιδράσεις της ραδιενέργειας στο αναπνευστικό σύστημα μπορούν να χωριστούν σε δύο σύνδρομα. Το ένα είναι η πνευμονίτιδα από ακτινοβολία, η οποία είναι μια αντίδραση ευαισθησίας που τελικά οδηγεί σε χρόνια ινωτική αντίδραση. Τόσο η οξεία όσο και η χρόνια φάση μπορεί να οδηγήσουν σε θάνατο (αναπτύσσεται εντός 6 μηνών μετά από έκθεση σε δόσεις 8 Gy ακτίνων X - ή ακτίνων γάμμα). Ωστόσο, η αγγειακή σκλήρυνση, η ατροφία του εντερικού επιθηλιακού βλεννογόνου μπορεί να εμφανιστεί μόνο μετά από 3 μήνες έκθεσης που ονομάζονται καθυστερημένες επιδράσεις. Όλες αυτές οι επιπτώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε τελική δυσλειτουργία στο ορθό και στον ειλέο, αργή έως βαριά αιμορραγία μέσω του ορθού, δυσσαπορρόφηση κ.λπ. Ωστόσο, χωρίς καμία βλάβη ο ανθρώπινος οργανισμός μπορεί να απορροφήσει οξεία έως και 200 rads. Όταν το βιολογικό σύστημα εκτίθεται, περίπου το 50% των ανθρώπων αναμένεται να πεθάνει μέσα σε 60 ημέρες από την έκθεση. Από την άλλη πλευρά, εάν μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα η συνολική δόση του σώματος παραμείνει υψηλότερη από 600 rads, ονομάζεται θανατηφόρα. Εν ολίγοις, οι επιπτώσεις της ραδιενέργειας στην ανθρώπινη υγεία μπορεί να κυμαίνονται από την οξεία ασθένεια από την ακτινοβολία έως τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στην υγεία, όπως ο καρκίνος και οι χρόνιες ασθένειες. Η σοβαρότητα των επιδράσεων εξαρτάται από παράγοντες όπως ο τύπος της ακτινοβολίας, η δόση και η διάρκεια της έκθεσης. Είναι σημαντικό να ελαχιστοποιείται η άσκοπη έκθεση σε ακτινοβολία και να ακολουθούνται τα πρωτόκολλα και οι κανονισμοί ασφαλείας για την έκθεση σε ακτινοβολία ώστε να ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος βλάβης της ανθρώπινης υγείας (Henriksen, 2002).

1.3.2 Επιπτώσεις ραδιενέργειας στο περιβάλλον

Η υψηλή έκθεση σε ραδιενέργεια μπορεί να επηρεάσει δυσμενώς όχι μόνο τον άνθρωπο αλλά και άλλα μέρη του περιβάλλοντος, όπως τα ζώα, τα φυτά και τα ασπόνδυλα, λόγω των διαφόρων επιπέδων ευαισθησίας. Οι επιπτώσεις της ραδιενέργειας στο περιβάλλον ποσοτικοποιούνται από τη σχέση απόκρισης δόσης μεταξύ ατόμων, η οποία δείχνει την κατάσταση ενός συνολικού πληθυσμού. Οι δόσεις ραδιενέργειας που χορηγούνται σε διάστημα 5 έως 60 ημερών μπορούν να επηρεάσουν διάφορα ασπόνδυλα του εδάφους, φύκια, βρύα και άλλες φυτικές κοινότητες. Το ελάχιστο επίπεδο έκθεσης μπορεί να προκαλέσει μεταλλαξιγένεση, η οποία μεταβάλλει τη φυσιολογία των απογόνων και την ικανότητα αναπαραγωγής, καθώς και άλλες δευτερεύουσες επιδράσεις. Η αλλαγή στη

σύνθεση των ειδών, η μεταβολή της ποικιλομορφίας των ειδών μέσω του ρυθμού θνησιμότητας επιβεβαιώνει τις ενδιάμεσες επιπτώσεις της ακτινοβολίας. Η μαζική θνησιμότητα ατόμων αποκαλύπτει το σημάδι των σοβαρών επιπτώσεων.

Πανίδα

Τα σπονδυλωτά ζώα και τα έντομα παραμένουν ασφαλή από τη φυσική ραδιενέργεια λόγω του εξωτερικού στρώματος του σώματός τους, όπως τα φτερά και η γούνα. Η περιοχή που επηρεάζεται από τη ραδιενέργεια περιλαμβάνει το έδαφος και το υδάτινο περιβάλλον που λειτουργούν ως η τελική δεξαμενή των ραδιενεργών σωματιδίων, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν τα ασπόνδυλα που βρίσκονται στο στρώμα της στρωμνής. Οι προνύμφες και οι νύμφες είναι λιγότερο πιθανό να είναι παρούσες στο στρώμα των απορριμμάτων λόγω μειωμένου ρυθμού αναπαραγωγής. Δόσεις μεγαλύτερες από 30 Gy αναφέρθηκε ότι έχουν καταστροφικές επιπτώσεις στην κοινότητα των ασπόνδυλων, οι οποίες συνίστανται σε θάνατο των εμβρύων και των ζυγωτών στην πρώιμη ζωή και αποβολές στα ενήλικα. Ωστόσο, σε σύγκριση με άλλα σπονδυλωτά τα αμφίβια εκτίθενται σε μεγάλο βαθμό στη φυσική ακτινοβολία. Σύμφωνα με τον IAEA (2006), τα θηλαστικά είναι οι πιο ραδιενεργοευαίσθητοι οργανισμοί και η έκθεση σε ραδιενέργεια μπορεί να επηρεάσει τον ρυθμό αναπαραγωγής περισσότερο από τον ρυθμό θνησιμότητάς τους. Το πείραμα δείχνει, ότι στα 3Gy επηρεάζεται ο ρυθμός θνησιμότητας και στα 0,3 Gy ο ρυθμός αναπαραγωγής. Συνεπώς, ενδέχεται να παρουσιάζεται κάποια οξεία επίπτωση σε ρυθμούς δόσης 400 μικρογραμμαρίων. Η αλλοιωμένη αναπαραγωγική ικανότητα για έκθεση σε υψηλότερο επίπεδο καταδεικνύεται για διάφορα είδη ζώων όπως κασίκες, αγελάδες, χοίρους, γαϊδούρια, σκύλους, κουνέλια, πρόβατα, πιθήκους και διαπιστώθηκε μείωση της δραστηριότητας του θυρεοειδούς, μείωση της θερμοκρασίας του σώματος, οίδημα (κατακράτηση υγρών), βαριά αναπνοή, μειωμένη γονιμότητα, στειρότητα, μείωση του αριθμού των σπερματοζωαρίων ή παραμέτρων που σχετίζονται με τη γονιμότητα, όπως ο αριθμός και το μέγεθος των απογόνων, παραμορφώσεις στα έμβρυα λόγω της έκθεσης σε ραδιενέργεια. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η παρατεταμένη έκθεση στη φυσική υπερϊώδη ακτινοβολία δημιουργεί στρεβλώσεις στο ανοσοποιητικό σύστημα των θηλαστικών. Μπορούν επίσης να εντοπιστούν ιστολογικοί και βιοχημικοί μηχανισμοί που περιλαμβάνουν αλλαγές στα κύτταρα Langerhans στο δέρμα, πιθανή βλάβη του DNA, μεταβολή στην απόκριση των αντιγόνων. Το πλαγκτόν και το βένθος από το υδάτινο

περιβάλλον μπορεί επίσης να αντιμετωπίσει διάφορους βαθμούς αλλοίωσης από μολυσμένα ιζήματα και πυρηνικά απόβλητα από σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Η φυσική ακτινοβολία (UV-B) έχει επίσης επιζήμια επίδραση σε υδρόβια είδη όπως το βακτηριοπλαγκτόν και το φυτοπλαγκτόν, η οποία περιλαμβάνει πρόωμη θνησιμότητα, μειωμένη ανάπτυξη και παραγωγικότητα. Όμως, μεταξύ των υδρόβιων οργανισμών, τα ψάρια είναι λιγότερο ανθεκτικά στη ραδιενέργεια. Οι κακοήθειες συνέπειες μπορούν να παρατηρηθούν με την αύξηση του ρυθμού δόσης και σε 1mGy φαίνεται να αποκαλύπτονται ορατά συμπτώματα. Κατά τα στάδια της γαμετογένεσης και της ανάπτυξης του εμβρύου γίνονται πιο ευαίσθητα. Αυτό το εμπόδιο μπορεί να επιλυθεί με την ικανότητα κινητοποίησης από τη μετακίνηση από περιοχή υψηλής έκθεσης σε περιοχές χαμηλής έκθεσης, η οποία δεν είναι διαθέσιμη για τα σταθερά ασπόνδυλα του εδάφους. Έτσι, τα σταθερά ασπόνδυλα του εδάφους τείνουν να λαμβάνουν σημαντικές δόσεις έκθεσης σε σχέση με τους άλλους οργανισμούς του ζωικού βασιλείου. Για τα πτηνά όπως το χελιδόνι του αχυρώνα, ο μειωμένος ρυθμός αναπαραγωγής δεν είναι σε θέση να υποστηρίξει σταθερό πληθυσμό και μπορεί να είναι ο λόγος που καθιστά το συγκεκριμένο είδος ευάλωτο ή απειλούμενο. Παρατηρήθηκε επίσης συνεπακόλουθη αύξηση των ανώμαλων σπερματοζωαρίων, μείωση των αντιοξειδωτικών στο αίμα και στο ήπαρ λόγω της εκτεθειμένης ραδιενέργειας.

Η έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί να έχει ποικίλες επιπτώσεις στην άγρια πανίδα, όπως:

- **Μειωμένη γονιμότητα:** Η έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί να βλάψει τα αναπαραγωγικά κύτταρα στα ζώα, οδηγώντας σε μειωμένη γονιμότητα και αναπαραγωγική επιτυχία.
- **Αναπτυξιακές ανωμαλίες:** Η έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί επίσης να προκαλέσει αναπτυξιακές ανωμαλίες σε ζώα, όπως παραμορφώσεις ή ανωμαλίες στην ανάπτυξη των απογόνων.
- **Αυξημένη θνησιμότητα:** Η οξεία έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει άμεσες επιπτώσεις όπως θάνατο, ενώ η χρόνια έκθεση μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένα ποσοστά θνησιμότητας με την πάροδο του χρόνου.
- **Μειωμένη διάρκεια ζωής:** Η μακροπρόθεσμη έκθεση στην ακτινοβολία μπορεί επίσης να οδηγήσει σε μειωμένη διάρκεια ζωής στα ζώα, καθώς μπορεί να βλάψει τα κύτταρα και τους ιστούς στο σώμα.
- **Μειωμένη αναπαραγωγική επιτυχία:** Εκτός από μειωμένη γονιμότητα, η έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί επίσης να οδηγήσει σε μειωμένη αναπαραγωγική επιτυχία,

καθώς μπορεί να προκαλέσει μεταλλάξεις και γενετικές βλάβες που μπορούν να επηρεάσουν τους απογόνους.

- **Αυξημένη ευαισθησία σε ασθένειες:** Η έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί επίσης να αποδυναμώσει το ανοσοποιητικό σύστημα των ζώων, καθιστώντας τα πιο ευαίσθητα σε ασθένειες και άλλους παράγοντες που προκαλούν άγχος.
- **Βιοσυσσωρευση ραδιενεργών υλικών:** Τα ραδιενεργά υλικά μπορούν να συσσωρευτούν στους ιστούς των ζώων που εκτίθενται σε αυτά, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερες συγκεντρώσεις σε ζώα σε υψηλότερα επίπεδα στην τροφική αλυσίδα.

Χλωρίδα:

Μεταξύ του φυτικού βασιλείου, τα δέντρα φαίνεται να είναι πιο ευαίσθητα στην ραδιενέργεια σε σύγκριση με τους θάμνους και τα βότανα. Στα φυτικά είδη, η χρόνια ακτινοβολία ξεκινά από τις δόσεις των 1000 έως 3000 μικρογκρέι ανά ώρα και λιγότερο από 400 μικρογκρέι ανά ώρα (10 milligray ανά ημέρα) εμφανίζει αμελητέες επιπτώσεις με βάση την ευαισθησία. Επιπλέον, τα βρύα, τα λιβάνια και οι λειχήνες τείνουν να είναι πιο ανθεκτικά στη ραδιενέργεια λόγω των κυτταρικών και μοριακών χαρακτηριστικών τους που τα βοηθούν να υποστηρίξουν το στρες της ραδιενέργειας. Ο λήθαργος ή ο ρυθμός ανάπτυξης και άλλες διεργασίες που σχετίζονται με την εποχιακή αλλαγή μπορούν να προκαλέσουν μεταβολή της ευαισθησίας. Πολλές έρευνες έδειξαν ότι τα κωνοφόρα και τα πεύκα εμφανίζουν πρώιμα σημάδια ραδιενεργού στρες. Τα μέτρια έως υψηλά επίπεδα έκθεσης σε κωνοφόρα δέντρα είναι αρκετά για να προκαλέσουν θνησιμότητα, μείωση της παραγωγικότητας και στειρότητα. Εκτός από αυτό, εντοπίζονται επίσης αναστολή της φωτοσύνθεσης, μείωση του ρυθμού διαπνοής και της σύνθεσης μεταβολιτών, νεκρές κηλίδες στα φύλλα, αποξηραμένες άκρες φύλλων. Όσον αφορά το πεύκο, εάν ο ρυθμός δόσης μπορεί να υπερβεί τα 20Gy, αρκεί για να προκαλέσει θάνατο. Το πρώτο σημάδι για την ανίχνευση του τραυματισμού από την ακτινοβολία είναι το κιτρίνισμα του αντιδραστήρα και ο θάνατος της βελόνας, που μπορεί να εμφανιστεί μεταξύ 2-3 εβδομάδων μετά την έκθεση. Διαταραγμένη ανάπτυξη στον ιστό του μεσόστεγου, μειωμένο πλάτος του κορμού, νάνοι βλαστοί ή βελόνες, ακραία ανάπτυξη βελόνων, παραμόρφωση στον

προσανατολισμό είναι μερικά κοινά σημάδια που παρατηρούνται σε έκθεση σε μέτρια δόση (5-15 Gy). Οι σπόροι από αυτά τα επηρεασμένα δέντρα τείνουν να έχουν χαμηλή βλαστική ικανότητα¹⁷. Η έκθεση σε υψηλή δόση μπορεί να οδηγήσει στο θάνατο όλων των κωνοφόρων και πεύκων στην περιοχή και μπορεί να υποστεί μετατόπιση της κοινότητας από χόρτα, θάμνους και νεαρά φυλλοβόλα είδη. Το ραδιενεργό υλικό μπορεί να προκαλέσει βλάβες στους ιστούς καθώς και στο DNA που μπορεί να προκαλέσει μετάλλαξη. Το DNA είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στη φυσική ακτινοβολία (UV-B) για να προκαλέσει φωτομετατροπή. Η αύξηση της φυσικής ραδιενέργειας έχει επίδραση στην ανάπτυξη, τη μορφολογία και τη φυσιολογία των φυτών και τα φυτά τείνουν να ανταποκρίνονται διαφορετικά ανάλογα με τη διακύμανση της φυσικής ραδιενέργειας. Η αντιστροφή της αλληλουχίας του DNA (TCAG μετατρέπεται σε GACT) και η παραμόρφωση της δομής των χρωμοσωμάτων μπορεί να εμποδίσει την κανονική ανάπτυξη ενός φυτού. Τα φυτά που καλλιεργούνται σε μεγαλύτερα υψόμετρα είναι γενικά πιο ανθεκτικά στην ραδιενέργεια από τα φυτά σε χαμηλότερα υψόμετρα λόγω των επιπέδων έκθεσης στην ραδιενέργεια.

Η έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί επίσης να έχει σειρά επιπτώσεων στα φυτά, μεταξύ των οποίων:

- **Μειωμένη ανάπτυξη και παραγωγικότητα:** Η οξεία έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί να βλάψει τα κύτταρα και τους ιστούς των φυτών, οδηγώντας σε μειωμένη ανάπτυξη και παραγωγικότητα.
- **Αλλαγές στη μορφολογία:** Η μακροπρόθεσμη έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί επίσης να προκαλέσει αλλαγές στη μορφολογία των φυτών, όπως η καθυστερημένη ανάπτυξη ή οι αλλοιωμένες αναπαραγωγικές δομές.
- **Γενετική βλάβη:** Η έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί επίσης να προκαλέσει γενετική βλάβη στα φυτά, οδηγώντας σε μεταλλάξεις και άλλες ανωμαλίες που μπορούν να επηρεάσουν την ανάπτυξη και την αναπαραγωγή τους.
- **Τροποποιημένη πρόσληψη θρεπτικών συστατικών:** Η έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί επίσης να επηρεάσει τον τρόπο με τον οποίο τα φυτά παίρνουν θρεπτικά

συστατικά, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν την ικανότητά τους να αναπτύσσονται και να αναπαράγονται. (Geras'kin, 2016)

1.3.3 Επιπτώσεις στην οικολογία και τη βιοποικιλότητα

Ο ραδιοοικολογικός αντίκτυπος μετράται γενικά με τη σχέση των μεταφερόμενων ραδιονουκλιδίων στο περιβάλλον και των δυσμενών επιπτώσεων της ραδιενέργειας στον βιόκοσμο. Τα ραδιενεργά υλικά διασπώνται συνεχώς και απελευθερώνουν ελεύθερα σωματίδια στην ατμόσφαιρα, τα οποία τελικά καταλήγουν είτε στο έδαφος είτε στο νερό, που ονομάζεται αποδέκτης των ραδιονουκλιδίων. Τα ραδιονουκλίδια διεισδύουν βαθιά στο έδαφος και μπορούν να παρεμποδίσουν την ανάπτυξη και την αναπαραγωγή των οργανισμών που υπάρχουν στα απορρίμματα και στο ανώτερο έδαφος. Τα ραδιονουκλίδια με μεγαλύτερο χρόνο ημιζωής μπορούν να δημιουργήσουν ιδιαίτερο πρόβλημα για τον οργανισμό. Τα φυτά που εκτίθενται σε φυσική ραδιενέργεια τροποποιούνται συχνά και αλληλεπιδρούν με άλλα φυτά και οργανισμούς-καταναλωτές. Παραμένουν στο έδαφος και το νερό για μεγάλο χρονικό διάστημα και μεγάλος αριθμός φυτών τα καταναλώνει και έτσι εισβάλλουν στην τροφική αλυσίδα μέσω βιομεγεθύνσεων. Στο υδάτινο οικοσύστημα, το μολυσμένο ίζημα και τα υποβρύχια φυτά προσλαμβάνουν το ραδιονουκλίδιο και κυκλοφορεί στο πλαγκτόν και το βένθος μέσω της διαδικασίας βιοσυσσώρευσης. Όμως ο υδάτινος οικότοπος τείνει να είναι πιο ανεκτικός στη ραδιενεργό μόλυνση από τον χερσαίο οικότοπο. Δεν είναι μόνο οι φυσικές ορατές βλάβες που μπορεί να εμφανιστούν στο οικοσύστημα, αλλά και οι μακροπρόθεσμες βιολογικές επιπτώσεις μπορεί να εμποδίσουν τον πληθυσμό. Οι γενετικές μεταλλάξεις θα μπορούσαν να αποτελέσουν δυνητική απειλή για τη διατήρηση της βιοποικιλότητας.

Οικολογία:

Η έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί να έχει διάφορες επιπτώσεις στα οικοσυστήματα, όπως:

- **Αλλαγές στη σύνθεση και την κατανομή των ειδών:** Η έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί να επηρεάσει την κατανομή και την αφθονία των διαφόρων ειδών σε ένα οικοσύστημα, καθώς ορισμένα είδη μπορεί να είναι πιο ευαίσθητα στην ακτινοβολία από άλλα.
- **Μεταβολές στις οικολογικές διεργασίες:** Η έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί επίσης να επηρεάσει βασικές οικολογικές διεργασίες, όπως ο κύκλος των θρεπτικών συστατικών, η επικονίαση και η αποσύνθεση, που μπορεί να έχουν επιπτώσεις στη λειτουργία του οικοσυστήματος.
- **Διαταραχές στις οικοσυστημικές υπηρεσίες:** Οι επιπτώσεις της έκθεσης σε ακτινοβολία στα οικοσυστήματα μπορούν επίσης να επηρεάσουν τις υπηρεσίες που παρέχουν στον άνθρωπο, όπως η παροχή τροφίμων και νερού, η δέσμευση του άνθρακα και η ρύθμιση του κλίματος.

Βιοποικιλότητα:

Η έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί επίσης να έχει επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα, συμπεριλαμβανομένων των εξής:

- **Μείωση της ποικιλομορφίας και της αφθονίας των ειδών:** Τα υψηλά επίπεδα έκθεσης σε ακτινοβολία μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση της ποικιλομορφίας και της αφθονίας των ειδών, καθώς ορισμένα είδη μπορεί να είναι πιο ευαίσθητα στην ακτινοβολία από άλλα.
- **Αλλαγές στη γενετική σύνθεση των πληθυσμών:** Η έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί επίσης να προκαλέσει μεταλλάξεις και άλλες γενετικές βλάβες στους πληθυσμούς, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τη γενετική τους ποικιλότητα και την προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες.
- **Εξαφάνιση ειδών:** Σε ορισμένες περιπτώσεις, η έκθεση σε ακτινοβολία μπορεί να οδηγήσει στην εξαφάνιση ειδών, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η έκθεση είναι υψηλή και επίμονη.

Οι επιπτώσεις της έκθεσης σε ακτινοβολία στην πανίδα, τη χλωρίδα, την οικολογία και τη βιοποικιλότητα μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο και τη διάρκεια της έκθεσης, καθώς και την ευαισθησία του οικοσυστήματος στην ακτινοβολία. Σε γενικές γραμμές, τα οικοσυστήματα που είναι πιο ποικίλα και ανθεκτικά μπορεί να είναι καλύτερα σε θέση να

ανεχθούν την έκθεση στην ακτινοβολία από εκείνα που είναι ήδη υπό πίεση από άλλους παράγοντες, όπως η απώλεια οικοτόπων ή η ρύπανση. Είναι σημαντικό να ελαχιστοποιείται η άσκοπη έκθεση σε ακτινοβολία και να ακολουθούνται τα πρωτόκολλα και οι κανονισμοί ασφαλείας για την έκθεση σε ακτινοβολία, ώστε να ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος βλάβης για το περιβάλλον και τους κατοίκους του. (Bréchiagnac, 2016)

2. Ραδιενεργά απόβλητα

Τα ραδιενεργά απόβλητα είναι ένας τύπος επικίνδυνων αποβλήτων που περιέχουν ραδιενεργά υλικά. Τα υλικά αυτά εκπέμπουν ιονίζουσα ακτινοβολία, η οποία μπορεί να βλάψει τους ζωντανούς οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένων των ανθρώπων. Τα ραδιενεργά απόβλητα μπορούν να προέρχονται από διάφορες πηγές, όπως πυρηνικοί σταθμοί, ιατρικές εγκαταστάσεις, ερευνητικά ιδρύματα και βιομηχανικές διεργασίες. Ταξινομείται με βάση το επίπεδο ραδιενέργειας και μπορεί να κυμαίνεται από απόβλητα χαμηλού επιπέδου, όπως μολυσμένα ρούχα ή εργαλεία, έως απόβλητα υψηλού επιπέδου, όπως αναλωμένα πυρηνικά καύσιμα ή ραδιενεργά ισότοπα που χρησιμοποιούνται στην ιατρική θεραπεία. Η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων διέπεται από κανονισμούς και πρότυπα σε εθνικό και διεθνές επίπεδο, και απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και εκτέλεση για να διασφαλιστεί η προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος. Η κυβερνητική πολιτική υπαγορεύει εάν ορισμένα υλικά - όπως τα χρησιμοποιημένα πυρηνικά καύσιμα και το πλουτώνιο - κατηγοριοποιούνται ως απόβλητα. Κάθε ραδιονουκλίδιο έχει χρόνο ημιζωής - το χρόνο που απαιτείται για να διασπαστούν τα μισά από τα άτομά του και, επομένως, για να χάσει το ήμισυ της ραδιενέργειάς του. Τα ραδιονουκλίδια με μεγάλο χρόνο ημιζωής τείνουν να εκπέμπουν ακτίνες άλφα και βήτα - γεγονός που διευκολύνει τον χειρισμό τους - ενώ εκείνα με μικρό χρόνο ημιζωής τείνουν να εκπέμπουν τις πιο διεισδυτικές ακτίνες γάμμα. Τελικά όλα τα ραδιενεργά απόβλητα διασπώνται σε μη ραδιενεργά στοιχεία. Όσο πιο ραδιενεργό είναι ένα ισότοπο, τόσο πιο γρήγορα διασπάται. Τα ραδιενεργά απόβλητα ταξινομούνται συνήθως ως χαμηλού επιπέδου (LLW), μεσαίου επιπέδου (ILW) ή υψηλού επιπέδου (HLW), ανάλογα, κυρίως, με το επίπεδο ραδιενέργειάς τους (Miller, 2000).



Εικόνα 1. Βαρέλια ραδιενεργών αποβλήτων

2.1 Πηγές ραδιενεργών αποβλήτων

Ραδιενεργά απόβλητα παράγονται σε όλα τα στάδια του κύκλου του πυρηνικού καυσίμου - της διαδικασίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνικά υλικά. Ο κύκλος καυσίμου περιλαμβάνει την εξόρυξη και την άλεση του μεταλλεύματος ουρανίου, την επεξεργασία και την κατασκευή του σε πυρηνικό καύσιμο, τη χρήση του στον αντιδραστήρα, την επανεπεξεργασία του (εάν πραγματοποιείται), την επεξεργασία του χρησιμοποιημένου καυσίμου που λαμβάνεται από τον αντιδραστήρα και, τέλος, τη διάθεση των αποβλήτων. Ενώ τα απόβλητα παράγονται κατά την εξόρυξη και την άλεση και την κατασκευή καυσίμων, η πλειονότητα (από άποψη ραδιενέργειας) προέρχεται από την πραγματική "κάυση" του ουρανίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν το χρησιμοποιημένο καύσιμο επανεπεξεργάζεται, η ποσότητα των αποβλήτων μειώνεται σημαντικά. Ο όγκος των ραδιενεργών αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας (HLW) που παράγονται από την πολιτική πυρηνική βιομηχανία είναι μικρός. Η ΙΑΕΑ εκτιμά ότι 392.000 τόνοι βαρέων μετάλλων (tHM) με τη μορφή χρησιμοποιημένων καυσίμων έχουν απεθεί από τότε που άρχισαν να λειτουργούν οι πρώτοι πυρηνικοί σταθμοί. Από αυτούς, ο οργανισμός εκτιμά ότι 127.000 tHM έχουν υποστεί επανεπεξεργασία. Η ΙΑΕΑ εκτιμά ότι ο όγκος διάθεσης του σημερινού αποθέματος στερεών αποβλήτων είναι περίπου 29.000 m³. Για λόγους σύγκρισης, ο όγκος αυτός είναι περίπου ισοδύναμος με ένα κτίριο ύψους τριών μέτρων που καλύπτει μια έκταση μεγέθους ενός γηπέδου ποδοσφαίρου. Οι ποσότητες ILW, LLW και

VLLW που παράγονται είναι μεγαλύτερες σε όγκο, αλλά είναι πολύ λιγότερο ραδιενεργές. Δεδομένης της μικρότερης εγγενούς ραδιενέργειας, η πλειονότητα των αποβλήτων που παράγονται από την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας ταξινομούνται ως LLW ή VLLW και έχουν ήδη τοποθετηθεί σε χώρο διάθεσης. Η ΙΑΕΑ εκτιμά ότι πάνω από το 80% του συνόλου των LLW και VLLW που έχουν παραχθεί μέχρι σήμερα έχει τεθεί σε διάθεση.

	Στερεά απόβλητα σε αποθηκευτικό χώρο (m ³)	Στερεά απόβλητα σε διάθεση (m ³)	Ποσοστό αποβλήτων σε διάθεση
VLLW	2,918,000	11,842,000	80%
LLW	1,471,000	18,499,000	92%
ILW	2,740,000	133,000	5%
HLW	29,000	0	0%

Πίνακας 1 Απογραφή πυρηνικών αποβλήτων (εκτιμήσεις ΙΑΕΑ, 2022)

Υπάρχουν διάφορες πηγές ραδιενεργών αποβλήτων, μεταξύ των οποίων:

- Πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής:** Οι πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής παράγουν μεγάλες ποσότητες ραδιενεργών αποβλήτων με τη μορφή αναλωμένου πυρηνικού καυσίμου και άλλων ραδιενεργών υλικών που χρησιμοποιούνται στον κύκλο πυρηνικού καυσίμου. Το αναλωμένο πυρηνικό καύσιμο είναι εξαιρετικά ραδιενεργό και εξακολουθεί να παράγει θερμότητα και ακτινοβολία για χιλιάδες χρόνια. Άλλοι τύποι ραδιενεργών αποβλήτων που παράγονται από πυρηνικούς σταθμούς περιλαμβάνουν απόβλητα χαμηλής ραδιενέργειας, όπως μολυσμένα ρούχα και εργαλεία, και απόβλητα μεσαίου επιπέδου, όπως συστατικά αντιδραστήρων και χρησιμοποιημένα πυρηνικά καύσιμα. Η αποθήκευση και η διάθεση πυρηνικών αποβλήτων αποτελεί μείζον πρόβλημα για τους πυρηνικούς σταθμούς. Τα περισσότερα πυρηνικά απόβλητα αποθηκεύονται επιτόπου στο σταθμό ηλεκτροπαραγωγής σε ειδικές εγκαταστάσεις αποθήκευσης που έχουν σχεδιαστεί για να αποτρέπουν την έκλυση ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον. Οι επιλογές μακροπρόθεσμης αποθήκευσης και διάθεσης των πυρηνικών αποβλήτων εξακολουθούν να αναπτύσσονται, με προτεινόμενες λύσεις, συμπεριλαμβανομένων των βαθιών γεωλογικών αποθετηρίων και της επανεπεξεργασίας των αναλωμένων πυρηνικών καυσίμων. Οι περισσότεροι πυρηνικοί σταθμοί είχαν αρχικά ονομαστική διάρκεια ζωής από 25 έως 40 χρόνια, αλλά οι μηχανολογικές εκτιμήσεις έχουν δείξει ότι πολλοί μπορούν να λειτουργήσουν περισσότερο. Μέχρι το τέλος του 2016, το NRC είχε χορηγήσει

ανανεώσεις αδειών σε περισσότερους από 85 αντιδραστήρες, επεκτείνοντας τη διάρκεια ζωής τους από 40 σε 60 χρόνια. Σήμερα υπάρχουν περίπου 440 πυρηνικοί αντιδραστήρες που λειτουργούν σε 32 χώρες, με συνδυασμένη δυναμικότητα περίπου 390 GWe. Το 2021 αυτά παρείχαν 2653 TWh, περίπου το 10% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας. Περίπου 100 αντιδραστήρες ενέργειας κατασκευάζονται επί του παρόντος με συνολική μικτή χωρητικότητα περίπου 100.000 MWe, κατόπιν παραγγελίας ή προγραμματισμού, και πάνω από 300 περισσότεροι προτείνονται σε 15 χώρες, ιδίως στην Κίνα, την Ινδία και τη Ρωσία. Πολλές χώρες με υπάρχοντα προγράμματα πυρηνικής ενέργειας είτε σχεδιάζουν είτε κατασκευάζουν νέους αντιδραστήρες ενέργειας. Περίπου 30 χώρες εξετάζουν, σχεδιάζουν ή ξεκινούν προγράμματα πυρηνικής ενέργειας. Η αυξημένη πυρηνική ικανότητα σε ορισμένες χώρες είναι αποτέλεσμα της αναβάθμισης στις υπάρχουσες εγκαταστάσεις. Αυτός είναι ένας εξαιρετικά οικονομικός τρόπος για να δημιουργηθεί νέα χωρητικότητα. Σε πολυάριθμους αντιδραστήρες ενέργειας στις ΗΠΑ, την Ελβετία, την Ισπανία, τη Φινλανδία και τη Σουηδία, για παράδειγμα, η παραγωγική τους ικανότητα έχει αυξηθεί. Στις ΗΠΑ, η Ρυθμιστική Επιτροπή Πυρηνικών ενέκρινε περίπου 165 αναβαθμίσεις συνολικού ύψους άνω των 7500 MWe από το 1977, μερικές από αυτές «εκτεταμένες αναβαθμίσεις» έως και 20%. Στην Ελβετία, όλοι οι αντιδραστήρες που λειτουργούν είχαν αναβαθμίσεις, αυξάνοντας τη χωρητικότητα κατά 13,4%. Η Ισπανία είχε ένα πρόγραμμα να προσθέσει 810 MWe (11%) στην πυρηνική της δυναμικότητα μέσω της αναβάθμισης των εννέα αντιδραστήρων της κατά περισσότερο στο 13%. Το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης έχει ήδη τεθεί σε εφαρμογή. Για παράδειγμα, ο πυρηνικός σταθμός του Almaraz ενισχύθηκε κατά 7,4% με κόστος 50 εκατομμυρίων δολαρίων. Η Φινλανδία αύξησε την ικανότητα του αρχικού εργοστασίου Olkiluoto κατά 29% στα 1700 MWe. Αυτό το εργοστάσιο ξεκίνησε με δύο σουηδικούς BWR των 660 MWe που τέθηκαν σε λειτουργία το 1978 και το 1980. Το εργοστάσιο της Loviisa, με δύο αντιδραστήρες VVER-440, έχει αναβαθμιστεί κατά 90 MWe (18%). Στην Σουηδία έχουν αναβαθμίσει τρεις μονάδες. Το εργοστάσιο Ringhals αναβαθμίστηκε κατά περίπου 305 MWe το 2006-14. Το Oskarshamn 3 αναβαθμίστηκε κατά 21% στα 1450 MWe με κόστος 313 εκατ. ευρώ. Το Forsmark 2 είχε αναβάθμιση 120 MWe (12%). Οι πυρηνικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και οι μονάδες επανεπεξεργασίας απελευθερώνουν μικρές ποσότητες ραδιενεργών αερίων (π.χ. κρυπτόν-85 και ξένον-133) και ίχνη ιωδίου-131 στην

ατμόσφαιρα. Ωστόσο, το κρυπτόν-85 και το ξένον-133 είναι χημικά αδρανή, και τα τρία αέρια έχουν σύντομο χρόνο ημιζωής και η ραδιενέργεια στις εκπομπές μειώνεται με την καθυστέρηση της απελευθέρωσής τους. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι πολύ μικρό για να δικαιολογεί την εξέταση σε οποιαδήποτε ανάλυση του κύκλου ζωής. Παράγεται επίσης λίγο τρίτιο, αλλά οι ρυθμιστικές αρχές δεν θεωρούν ότι η απελευθέρωσή του είναι σημαντική.



Εικόνα 2. Grohnde Nuclear Power Plant

- **Από την εξόρυξη έως την κατασκευή καυσίμων**

Η παραδοσιακή εξόρυξη ουρανίου παράγει λεπτόκοκκα αμμώδη απόβλητα, τα οποία περιέχουν σχεδόν όλα τα φυσικά ραδιενεργά στοιχεία που βρίσκονται στο μεταλλευμα ουρανίου. Τα απόβλητα συλλέγονται σε τεχνικά φράγματα και τελικά καλύπτονται με ένα στρώμα αργίλου και βράχων για να εμποδίσουν τη διαρροή αερίου ραδονίου και να εξασφαλίσουν μακροπρόθεσμη σταθερότητα. Βραχυπρόθεσμα, το υλικό απόθεσης καλύπτεται συχνά με νερό. Μετά από λίγους μήνες, το υλικό των τελμάτων περιέχει περίπου το 75% της ραδιενέργειας του αρχικού μεταλλεύματος.

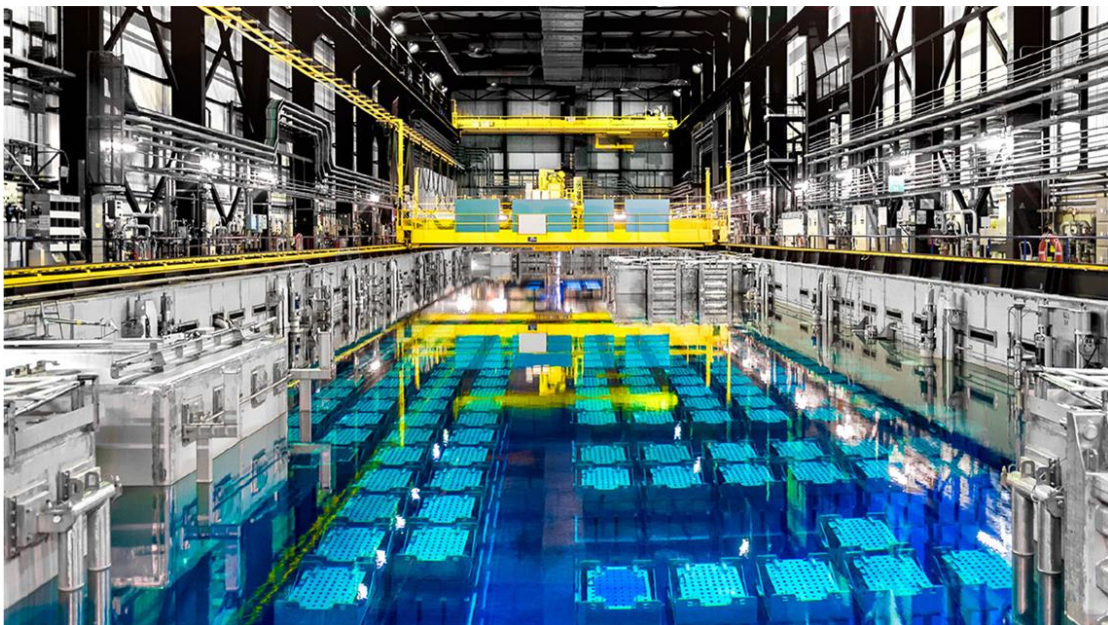


Εικόνα 3. Ορυχείο ουρανίου Rössing στην Ναμίμπια

Αυστηρά μιλώντας, αυτά δεν ταξινομούνται ως ραδιενεργά απόβλητα. το συμπύκνωμα οξειδίου του ουρανίου από την εξόρυξη, ουσιαστικά το "yellowcake" (U_3O_8), δεν είναι σημαντικά ραδιενεργό - ελάχιστα περισσότερο από τον γρανίτη που χρησιμοποιείται στα κτίρια. Καθαρίζεται και στη συνέχεια μετατρέπεται σε αέριο εξαφθοριούχο ουράνιο (UF_6). Ως αέριο, υφίσταται εμπλουτισμό για την αύξηση της περιεκτικότητας σε U-235 από 0,7% σε περίπου 3,5%. Στη συνέχεια μετατρέπεται σε σκληρό κεραμικό οξείδιο (UO_2) για τη συναρμολόγηση ως στοιχεία καυσίμου αντιδραστήρων. Το κύριο υποπροϊόν του εμπλουτισμού είναι το απεμπλουτισμένο ουράνιο (DU), κυρίως το ισότοπο U-238, το οποίο αποθηκεύεται είτε ως UF_6 είτε ως U_3O_8 . Μέρος του DU χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου η εξαιρετικά υψηλή πυκνότητά του το καθιστά πολύτιμο, όπως για τις πυθμένες των σκαφών αναψυχής και τα στρατιωτικά βλήματα. Χρησιμοποιείται επίσης (μαζί με το επανεπεξεργασμένο πλουτόνιο) για την παρασκευή καυσίμου μικτού οξειδίου (MOX) και για την αραίωση του εξαιρετικά εμπλουτισμένου ουρανίου από τα διαλυμένα όπλα, το οποίο μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για καύσιμο αντιδραστήρων.

- **Επανεπεξεργασία χρησιμοποιημένου καυσίμου**

Οποιοδήποτε χρησιμοποιημένο καύσιμο θα εξακολουθεί να περιέχει μέρος του αρχικού U-235, καθώς και διάφορα ισότοπα πλουτωνίου που έχουν σχηματιστεί μέσα στον πυρήνα του αντιδραστήρα και U-238. Συνολικά αυτά αντιπροσωπεύουν περίπου το 96% του αρχικού ουρανίου και πάνω από το ήμισυ του αρχικού ενεργειακού περιεχομένου (αγνοώντας το U-238). Τα χρησιμοποιημένα πυρηνικά καύσιμα υποβάλλονται εδώ και καιρό σε επανεπεξεργασία για την εξαγωγή σχάσιμων υλικών προς ανακύκλωση και για τη μείωση του όγκου. Η επανεπεξεργασία επιτρέπει την ανάκτηση σημαντικής ποσότητας πλουτωνίου από τα χρησιμοποιημένα καύσιμα, το οποίο στη συνέχεια αναμιγνύεται με οξείδιο του απεμπλουτισμένου ουρανίου σε εργοστάσιο παρασκευής MOX για την παραγωγή νέου καυσίμου. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την εξαγωγή περίπου 25-30% περισσότερης ενέργειας από το αρχικό μέταλλωμα ουρανίου και μειώνει σημαντικά τον όγκο των ΑΕΑ (κατά περίπου 85%). Ο ΙΑΕΑ εκτιμά ότι από τους 390.000 μετρικούς τόνους βαρέων μετάλλων (ΜΤΗΜ) που παρήχθησαν από την έναρξη της πολιτικής παραγωγής πυρηνικής ενέργειας, 127.000 ΜΤΗΜ έχουν υποστεί επανεπεξεργασία. Επιπλέον, τα εναπομείναντα είναι σημαντικά λιγότερο ραδιενεργά - διασπώνται στο ίδιο επίπεδο με το αρχικό μέταλλωμα μέσα σε 9000 χρόνια (έναντι 300.000 ετών).



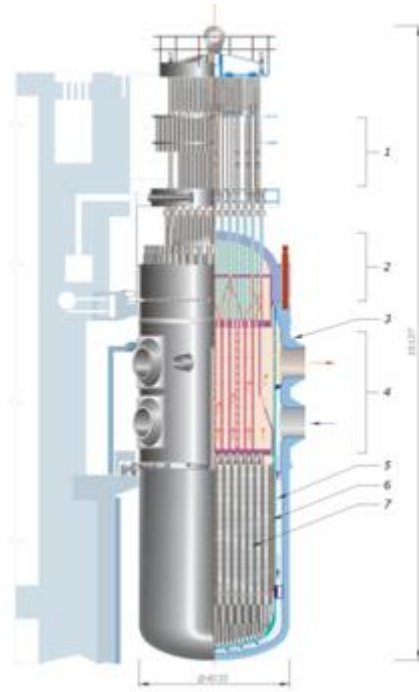
Εικόνα 4. Η εγκατάσταση επανεπεξεργασίας Orano La Hague

Εμπορικά εργοστάσια επανεπεξεργασίας λειτουργούν σήμερα στη Γαλλία και τη Ρωσία. Άλλη μία τίθεται σε λειτουργία στην Ιαπωνία και η Κίνα σχεδιάζει να κατασκευάσει επίσης μία. Η Γαλλία αναλαμβάνει την επανεπεξεργασία για επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας άλλων χωρών, και πολλά από τα καύσιμα της Ιαπωνίας έχουν επανεπεξεργαστεί εκεί, με τα απόβλητα και το ανακυκλωμένο πλουτόνιο στα καύσιμα MOX να επιστρέφονται στην Ιαπωνία. Η κύρια ιστορική και τρέχουσα διαδικασία είναι η Purex, μια υδρομεταλλουργική διαδικασία. Οι κύριες μελλοντικές είναι η ηλεκτρομεταλλουργική - που συχνά αποκαλείται πυροεπεξεργασία επειδή τυχαίνει να είναι θερμή. Με αυτήν, όλα τα ανιόντα των ακτινιδίων (κυρίως ουράνιο και πλουτόνιο) ανακτώνται μαζί. Αν και δεν είναι ακόμη λειτουργικές, οι τεχνολογίες αυτές θα οδηγήσουν σε απόβλητα που χρειάζονται μόνο 300 χρόνια για να φτάσουν στο ίδιο επίπεδο ραδιενέργειας με το αρχικά εξορυγμένο μέταλλευμα.

- **Ιατρικές εγκαταστάσεις:** Οι ιατρικές εγκαταστάσεις παράγουν μια ποικιλία ραδιενεργών αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένου μολυσμένου ιατρικού εξοπλισμού, συρίγγων και άλλων αναλώσιμων υλικών, και αποβλήτων που παράγονται από διαδικασίες ακτινοθεραπείας. Τα απόβλητα που παράγονται από ιατρικές εγκαταστάσεις ταξινομούνται γενικά σε διάφορες κατηγορίες με βάση το επίπεδο ραδιενεργειάς τους, με τα απόβλητα χαμηλής ραδιενέργειας να είναι ο πιο κοινός τύπος που παράγεται. Οι ιατρικές εγκαταστάσεις απαιτείται να διαχειρίζονται προσεκτικά και να απορρίπτουν τα ραδιενεργά απόβλητα σύμφωνα με τις κανονιστικές απαιτήσεις για την προστασία τόσο των εργαζομένων όσο και του κοινού από την άσκοπη έκθεση σε ιονίζουσα ακτινοβολία. Αυτό συνήθως περιλαμβάνει την αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων επιτόπου έως ότου αυτά μεταφερθούν σε αδειοδοτημένη εγκατάσταση διάθεσης.
- **Παροπλισμός πυρηνικών σταθμών**

Στην περίπτωση των πυρηνικών αντιδραστήρων, περίπου το 99% της ραδιενέργειας σχετίζεται με το καύσιμο. Πέρα από τυχόν επιφανειακή μόλυνση των εγκαταστάσεων, η υπόλοιπη ραδιενέργεια προέρχεται από "προϊόντα ενεργοποίησης", όπως εξαρτήματα χάλυβα που έχουν εκτεθεί επί μακρόν σε ακτινοβολία νετρονίων. Τα άτομά τους μετατρέπονται σε διάφορα ισότοπα όπως ο σίδηρος-55, το κοβάλτιο-60, το νικέλιο-63 και ο άνθρακας-14. Τα δύο πρώτα είναι ιδιαίτερα ραδιενεργά, εκπέμποντας ακτίνες γάμμα, αλλά

με αντίστοιχα μικρούς χρόνους ημιζωής, έτσι ώστε μετά από 50 χρόνια από την τελική διακοπή λειτουργίας ο κίνδυνος τους να είναι πολύ μειωμένος.



Εικόνα 5 Πυρήνας πυρηνικού εργοστασίου

Κάποιο μέρος του καϊσίου-137 μπορεί επίσης να βρεθεί στα απόβλητα παροπλισμού. Κάποια απόβλητα από τον παροπλισμό μπορούν να ανακυκλωθούν, αλλά για χρήσεις εκτός της βιομηχανίας εφαρμόζονται πολύ χαμηλά επίπεδα εκκαθάρισης, οπότε τα περισσότερα θάβονται και κάποια ανακυκλώνονται εντός της βιομηχανίας.

- **Κληροδοτημένα απόβλητα**

Εκτός από τα συνήθη απόβλητα από την τρέχουσα παραγωγή πυρηνικής ενέργειας υπάρχουν και άλλα ραδιενεργά απόβλητα που αναφέρονται ως "κληροδοτημένα απόβλητα". Αυτά τα απόβλητα υπάρχουν σε αρκετές χώρες που πρωτοστάτησαν στην πυρηνική ενέργεια και ιδίως εκεί όπου τα προγράμματα ενέργειας αναπτύχθηκαν από στρατιωτικά προγράμματα. Μερικές φορές είναι ογκώδη και δύσκολα διαχειρίσιμα και προέκυψαν κατά τη διάρκεια της πορείας των χωρών αυτών να φτάσουν σε μια θέση όπου η πυρηνική τεχνολογία αποτελεί εμπορική πρόταση για την παραγωγή ενέργειας. Αντιπροσωπεύει μια υποχρέωση που δεν καλύπτεται από τις τρέχουσες ρυθμίσεις χρηματοδότησης. Στο

Ηνωμένο Βασίλειο, περίπου 164 δισεκατομμύρια λίρες (χωρίς προεξόφληση) εκτιμάται ότι απαιτούνται για την αντιμετώπιση αυτών των αποβλήτων - κυρίως από τη Magnox και ορισμένες πρώτες εξελίξεις της AGR - και περίπου το 30% του συνόλου αποδίδεται σε στρατιωτικά προγράμματα. Στις ΗΠΑ, τη Ρωσία και τη Γαλλία οι υποχρεώσεις είναι επίσης σημαντικές.

- **Ερευνητικά εργαστήρια:** Τα ερευνητικά εργαστήρια χρησιμοποιούν ραδιενεργά υλικά σε ποικίλες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της ανίχνευσης και απεικόνισης ακτινοβολίας, καθώς και στην ιατρική έρευνα και θεραπεία. Τα απόβλητα που παράγονται από τα ερευνητικά εργαστήρια μπορούν να περιλαμβάνουν μολυσμένο εξοπλισμό, εργαστηριακές προμήθειες και ραδιενεργά ισότοπα. Τα ερευνητικά εργαστήρια πρέπει να διαθέτουν κατάλληλες διαδικασίες για την ασφαλή διαχείριση και διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένης της αποθήκευσης αποβλήτων σε κατάλληλους περιέκτες και της μεταφοράς αποβλήτων σε εγκεκριμένες εγκαταστάσεις διάθεσης.
- **Βιομηχανικές διεργασίες:** Μερικές βιομηχανικές διεργασίες, όπως η εξόρυξη πετρελαίου και φυσικού αερίου, η εξόρυξη και η διύλιση μετάλλων, μπορούν να δημιουργήσουν ραδιενεργά απόβλητα με τη μορφή μολυσμένου εξοπλισμού και αποβλήτων. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει μολυσμένο έδαφος, νερό και αέρα, καθώς και μολυσμένο εξοπλισμό και εργαλεία. Η διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων που παράγονται από βιομηχανικές διεργασίες υπόκειται σε ρύθμιση από κυβερνητικές υπηρεσίες για να διασφαλιστεί ότι γίνεται ασφαλής διαχείριση και διάθεση τους και δεν αποτελεί κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία ή το περιβάλλον.
- **Στρατιωτικές δραστηριότητες:** Στρατιωτικές δραστηριότητες όπως η παραγωγή και δοκιμή πυρηνικών όπλων μπορούν να παράγουν σημαντικές ποσότητες ραδιενεργών αποβλήτων με τη μορφή μολυσμένου εξοπλισμού και υλικών αποβλήτων. Το Υπουργείο Ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών (DOE) είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων που παράγονται από την παραγωγή και τις δοκιμές πυρηνικών όπλων, συμπεριλαμβανομένης της διάθεσης των αποβλήτων στην πιλοτική μονάδα απομόνωσης αποβλήτων (WIPP) στο Νέο Μεξικό.
- **Φυσικά ραδιενεργά υλικά:** Ορισμένα φυσικά υλικά, όπως το ουράνιο και το θόριο, μπορούν να προκαλέσουν ραδιενεργά απόβλητα κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων εξόρυξης και επεξεργασίας. Η διαχείριση και η διάθεση των φυσικά ραδιενεργών

αποβλήτων ρυθμίζεται από κυβερνητικές υπηρεσίες για να διασφαλιστεί ότι ο χειρισμός και η διάθεσή τους γίνεται με ασφάλεια και δεν ενέχει κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία ή το περιβάλλον. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει μέτρα όπως περιορισμό και παρακολούθηση των αποβλήτων, καθώς και μεταφορά σε αδειοδοτημένες εγκαταστάσεις διάθεσης.

2.2 Τύποι ραδιενεργών αποβλήτων

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ραδιενεργών αποβλήτων, τα οποία ταξινομούνται με βάση το επίπεδο ραδιενέργειας και τη φύση του υλικού. Τα κύρια είδη ραδιενεργών αποβλήτων είναι:

- **Ραδιενεργά απόβλητα χαμηλής ραδιενέργειας (LLW):**

Τα απόβλητα χαμηλής ραδιενέργειας (LLW) έχουν ραδιενεργό περιεχόμενο που δεν υπερβαίνει τα τέσσερα γίγα-μπεκερέλ ανά τόνο (GBq/t) δραστηριότητας άλφα ή τα 12 GBq/t δραστηριότητας βήτα-γάμμα. Το LLW συνήθως περιέχει βραχύβια ισότοπα με χρόνους ημιζωής μικρότερους των 30 ετών. Τα LLW δεν απαιτούν θωράκιση κατά το χειρισμό και τη μεταφορά. Το LLW συνήθως περιέχει σχετικά χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας και παρουσιάζει σχετικά χαμηλό κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Το LLW περιλαμβάνει είδη όπως μολυσμένα ενδύματα, εργαλεία και εξοπλισμό, καθώς και υλικά που χρησιμοποιούνται σε δραστηριότητες απολύμανσης. Αυτά τα απόβλητα συνήθως παράγονται από πυρηνικούς σταθμούς, ιατρικές εγκαταστάσεις και ερευνητικά εργαστήρια. Το LLW συνήθως αποθηκεύεται επιτόπου στην εγκατάσταση που το παράγαγε, έως ότου αποσταλεί σε εγκατάσταση διάθεσης. Οι μέθοδοι διάθεσης για το LLW περιλαμβάνουν ταφή σε ειδικά σχεδιασμένους χώρους υγειονομικής ταφής ή αποθήκευση σε υπέργειες εγκαταστάσεις. Ωστόσο, ένα μέρος του LLW μπορεί να συμπιεστεί ή να αποτεφρωθεί πριν από τη διάθεση. Τα LLW περιλαμβάνουν περίπου το 90% του όγκου αλλά μόνο το 1% της ραδιενέργειας όλων των ραδιενεργών αποβλήτων.

- **Ενδιάμεσα ραδιενεργά απόβλητα (ILW):** Το ILW συνήθως περιέχει υψηλότερα επίπεδα ραδιενέργειας από το LLW και ενέχει υψηλότερο κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Τα απόβλητα μέσης ραδιενέργειας (ILW) είναι πιο ραδιενεργά από τα LLW, αλλά η θερμότητα που παράγουν (<2 kW/m³) δεν

επαρκεί για να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό ή την επιλογή των εγκαταστάσεων αποθήκευσης και διάθεσης. Λόγω των υψηλότερων επιπέδων ραδιενέργειας, τα ILW απαιτούν κάποια θωράκιση. Συνήθως περιέχει ισότοπα με μεγαλύτερους χρόνους ημιζωής μέχρι και αρκετές εκατοντάδες χρόνια. Το ILW παράγεται συνήθως από πυρηνικούς σταθμούς και άλλες βιομηχανικές διεργασίες. Το ILW περιλαμβάνει στοιχεία όπως συστατικά αντιδραστήρων, ρητίνες ανταλλαγής ιόντων και ραδιενεργή ιλύ. Οι μέθοδοι διάθεσης για το ILW περιλαμβάνουν ταφή σε ειδικά σχεδιασμένους χώρους υγειονομικής ταφής ή αποθήκευση σε υπέργειες εγκαταστάσεις. Μικρότερα αντικείμενα και τυχόν μη στερεά μπορούν να στερεοποιηθούν σε σκυρόδεμα ή άσφαλτο για διάθεση. Αποτελεί περίπου το 7% του όγκου και αποτελούν το 4% της ραδιενέργειας όλων των ραδιενεργών αποβλήτων.

- **Ραδιενεργά απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας (HLW):** Το HLW συνήθως περιέχει τα υψηλότερα επίπεδα ραδιενέργειας και ενέχει τον υψηλότερο κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Τα απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας (HLW) είναι επαρκώς ραδιενεργά ώστε η θερμότητα διάσπασής τους ($>2\text{kW/m}^3$) να αυξάνει σημαντικά τη θερμοκρασία τους και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντός τους. Κατά συνέπεια, τα απόβλητα πρέπει να θωρακίζονται και να αποθηκεύεται σε ειδικά σχεδιασμένες δεξαμενές ψύξης ή σε ξηρούς περιέκτες αποθήκευσης για την πρόληψη τυχαίας απελευθέρωσης. Τα HLW έχουν μακρά ημιζωή, που κυμαίνεται από χιλιάδες έως εκατομμύρια χρόνια, και αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Το HLW παράγεται συνήθως από πυρηνικούς σταθμούς και περιλαμβάνει αναλωμένο πυρηνικό καύσιμο και άλλα ραδιενεργά υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί στον κύκλο του πυρηνικού καυσίμου. Το HLW απαιτεί ειδικές μεθόδους χειρισμού και διάθεσης λόγω του υψηλού επιπέδου ραδιενέργειας και του μεγάλου χρόνου ημιζωής. Τα HLW αντιπροσωπεύουν μόλις το 3% του όγκου, αλλά το 95% της συνολικής ραδιενέργειας των παραγόμενων αποβλήτων. Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη HLW:
- Χρησιμοποιημένα καύσιμα που έχουν χαρακτηριστεί ως απόβλητα.
- Διαχωρισμένα απόβλητα από την επανεπεξεργασία χρησιμοποιημένων καυσίμων.

Τα HLW έχουν τόσο μακρόβια όσο και βραχύβια συστατικά, ανάλογα με το χρονικό διάστημα που θα χρειαστεί για να μειωθεί η ραδιενέργεια συγκεκριμένων ραδιονουκλιδίων σε επίπεδα που θεωρούνται μη επικίνδυνα για τους ανθρώπους και το περιβάλλον. Εάν τα γενικά βραχύβια προϊόντα σχάσης μπορούν να διαχωριστούν από τα μακρόβια ακτινίδια, η διάκριση αυτή καθίσταται σημαντική για τη διαχείριση και τη διάθεση των HLW. Τα HLW αποτελούν το επίκεντρο σημαντικής προσοχής όσον αφορά την πυρηνική ενέργεια, και η διαχείρισή τους γίνεται αναλόγως. Η διάθεση της HLW συνήθως περιλαμβάνει την εναπόθεση των αποβλήτων σε βαθιές γεωλογικές αποθήκες σχεδιασμένες για την απομόνωση των αποβλήτων από το περιβάλλον για δεκάδες χιλιάδες χρόνια.

- **Υπερουράνια απόβλητα (TRU):** Τα απόβλητα TRU περιέχουν ραδιενεργά στοιχεία με ατομικούς αριθμούς υψηλότερους από το ουράνιο (δηλαδή, υπερουράνια στοιχεία) και συνήθως παράγονται από την παραγωγή πυρηνικών όπλων και τις ερευνητικές δραστηριότητες. Τα απορρίμματα της TRU περιλαμβάνουν είδη όπως εξοπλισμό, γάντια, εργαλεία, ρούχα και χόμα μολυσμένα με υπερουράνια στοιχεία. Τα απορρίμματα της TRU έχουν μεγάλο χρόνο ημιζωής και απαιτούν ειδικές διαδικασίες χειρισμού και διάθεσης. Οι μέθοδοι διάθεσης αποβλήτων TRU περιλαμβάνουν ταφή σε ειδικά σχεδιασμένους χώρους υγειονομικής ταφής ή αποθήκευση σε υπέργειες εγκαταστάσεις μέχρι η ραδιενέργεια να έχει εξασθενήσει σε ασφαλή επίπεδα, μετά την οποία μπορούν να απορριφθούν σε ρηχό χώρο ταφής.
- **Αναλωμένο πυρηνικό καύσιμο (SNF):**
Το SNF είναι το ραδιενεργό υλικό που έχει απομείνει μετά τη χρήση πυρηνικού καυσίμου σε πυρηνικό αντιδραστήρα. Περιέχει ένα μείγμα ραδιενεργών ισotόπων, συμπεριλαμβανομένου του πλουτωνίου και του ουρανίου, και παράγει σημαντικές ποσότητες θερμότητας. Το SNF αποθηκεύεται συνήθως σε εξειδικευμένες δεξαμενές ψύξης ή σε ξηρούς περιέκτες αποθήκευσης για να αποφευχθεί η τυχαία απελευθέρωση ραδιενέργειας. Το SNF έχει μεγάλο χρόνο ημιζωής και απαιτεί ειδικές διαδικασίες χειρισμού και διάθεσης. Η τελική διάθεση του SNF γίνεται συνήθως σε βαθιά γεωλογικά αποθετήρια.

- **Υπολειμματικές ύλες μύλων ουρανίου:** Τα υπολείμματα μύλων ουρανίου παράγονται κατά την επεξεργασία μεταλλεύματος ουρανίου και περιέχουν χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας. Οι υπολειμματικές μονάδες μύλου ουρανίου περιλαμβάνουν απόβλητα πέτρας, άμμο και ιλύ που περιέχουν ραδιενεργά υλικά όπως ουράνιο, θόριο και ράδιο. Οι μέθοδοι διάθεσης για την αποτέφρωση υπολειμμάτων μονάδων ουρανίου περιλαμβάνουν ταφή σε ειδικά σχεδιασμένους χώρους υγειονομικής ταφής ή αποθήκευση σε υπέργειες εγκαταστάσεις.

- **Απόβλητα πολύ χαμηλής ραδιενέργειας(VLLW)**

Τα εξαιρούμενα απόβλητα και τα απόβλητα πολύ χαμηλής ραδιενέργειας (VLLW) περιέχουν ραδιενεργά υλικά σε επίπεδο που δεν θεωρείται επιβλαβές για τους ανθρώπους ή το περιβάλλον. Αποτελούνται κυρίως από κατεδαφισμένα υλικά (όπως σκυρόδεμα, γύψος, τούβλα, μέταλλα, βαλβίδες, σωληνώσεις κ.λπ.) που παράγονται κατά τη διάρκεια εργασιών αποκατάστασης ή αποσυναρμολόγησης σε πυρηνικές βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Άλλες βιομηχανίες, όπως η επεξεργασία τροφίμων, η χημική βιομηχανία, η χαλυβουργία κ.λπ., παράγουν επίσης VLLW ως αποτέλεσμα της συγκέντρωσης φυσικής ραδιενέργειας που υπάρχει σε ορισμένα ορυκτά που χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες παραγωγής τους. Συνεπώς, τα απόβλητα αυτά απορρίπτονται μαζί με τα οικιακά απορρίμματα, αν και χώρες όπως η Γαλλία αναπτύσσουν επί του παρόντος ειδικά σχεδιασμένες εγκαταστάσεις διάθεσης VLLW.

Ο όγκος των ραδιενεργών αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας (HLW) που παράγονται από την πολιτική πυρηνική βιομηχανία είναι μικρός. Ο ΙΑΕΑ εκτιμά ότι 392.000 τόνοι βαρέων μετάλλων (tHM) με τη μορφή χρησιμοποιημένου καυσίμου έχουν εκκενωθεί από τότε που άρχισαν να λειτουργούν οι πρώτοι πυρηνικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής. Από αυτά, ο οργανισμός εκτιμά ότι έχουν υποστεί επανεπεξεργασία 127.000 tHM. Ο ΙΑΕΑ εκτιμά ότι ο όγκος διάθεσης του τρέχοντος αποθέματος στερεών HLW είναι περίπου 29.000 m³ (ΙΑΕΑ, 2022). Για τα δεδομένα, αυτός είναι ένας όγκος περίπου ισοδύναμος με ένα κτίριο ύψους τριών μέτρων που καλύπτει μια περιοχή μεγέθους ενός γηπέδου ποδοσφαίρου. Οι ποσότητες ILW, LLW, και τα παραγόμενα VLLW είναι μεγαλύτερα σε όγκο, αλλά είναι πολύ λιγότερο ραδιενεργά. Δεδομένης της χαμηλότερης εγγενούς ραδιενέργειας του, η πλειονότητα των αποβλήτων που παράγονται από την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας και ταξινομούνται ως

LLW ή VLLW έχουν ήδη τεθεί σε διάθεση. Ο ΙΑΕΑ εκτιμά ότι πάνω από το 80% όλων των LLW και VLLW που έχουν παραχθεί μέχρι σήμερα είναι σε διάθεση. Όλα τα επικίνδυνα απόβλητα απαιτούν προσεκτική διαχείριση και διάθεση, όχι μόνο τα ραδιενεργά απόβλητα. Η ποσότητα των αποβλήτων που παράγονται από τη βιομηχανία πυρηνικής ενέργειας είναι μικρή σε σχέση τόσο με άλλες μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όσο και με τη γενική βιομηχανική δραστηριότητα. Για παράδειγμα, στο Ηνωμένο Βασίλειο – την παλαιότερη πυρηνική βιομηχανία στον κόσμο – η συνολική ποσότητα ραδιενεργών αποβλήτων που έχει παραχθεί μέχρι σήμερα, και προβλέπεται για το 2125, είναι περίπου 4,9 εκατομμύρια τόνοι. Αφού συσκευαστούν όλα τα απορρίμματα, εκτιμάται ότι ο τελικός όγκος θα καταλάμβανε χώρο παρόμοιο με αυτόν ενός μεγάλου, σύγχρονου γηπέδου ποδοσφαίρου. Αυτό συγκρίνεται με μια ετήσια παραγωγή 200 εκατομμυρίων τόνων συμβατικών αποβλήτων, εκ των οποίων 4,3 εκατομμύρια τόνοι ταξινομούνται ως επικίνδυνα. Περίπου το 94% των ραδιενεργών αποβλήτων στο Ηνωμένο Βασίλειο ταξινομούνται ως LLW, περίπου το 6% είναι ILW και λιγότερο από 0,03% ταξινομούνται ως HLW (NDA, 2010). Για περισσότερα από 50 χρόνια στην πυρηνική ενέργεια, η διαχείριση και η διάθεση πυρηνικών αποβλήτων δεν προκάλεσε σοβαρά προβλήματα υγείας ή περιβάλλοντος, ούτε αποτελούσε πραγματικό κίνδυνο για το ευρύ κοινό. Οι εναλλακτικές λύσεις για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι χωρίς προκλήσεις και τα ανεπιθύμητα υποπροϊόντα τους γενικά δεν ελέγχονται καλά. Για να τεθεί η παραγωγή και η διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων στο πλαίσιο, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη τα μη επιθυμητά υποπροϊόντα - κυρίως το διοξείδιο του άνθρακα εκπομπές – άλλων μεγάλης κλίμακας εμπορικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το 2019, οι πυρηνικοί σταθμοί παρείχαν 2657 TWh ηλεκτρικής ενέργειας, περίπου το 10% της συνολικής παγκόσμιας κατανάλωσης. Τα ορυκτά καύσιμα παρείχαν περίπου το 63%, εκ των οποίων ο άνθρακας συνεισέφερε περισσότερο (9914 TWh), ακολουθούμενο από το αέριο (6346 TWh) και το πετρέλαιο (747 TWh). Εάν το περίπου 10% της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται από την πυρηνική ενέργεια είχε αντικατασταθεί από αέριο – μακράν το πιο καθαρό ορυκτό καύσιμο – ένα επιπλέον 1300 εκατομμύρια τόνοι CO₂ θα είχαν απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα το οποίο ισοδυναμεί με το να κυκλοφορήσουν επιπλέον 250 εκατομμύρια αυτοκίνητα (EPA, 2014). Η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων διέπεται από κανονισμούς και πρότυπα σε εθνικό και διεθνές επίπεδο, και απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και εκτέλεση για να διασφαλιστεί η προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος. Αυτό περιλαμβάνει τη διασφάλιση ότι ο χειρισμός και η διάθεση των ραδιενεργών αποβλήτων γίνεται με τρόπο που ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο έκθεσης σε

ιονίζουσα ακτινοβολία και ότι τα απόβλητα αποθηκεύονται με τρόπο που τα αποτρέπει από τη μόλυνση του περιβάλλοντος. Επιπλέον, η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων απαιτεί συνεχή παρακολούθηση και συντήρηση ώστε να εξασφαλίζεται η συνεχής ασφάλεια του χώρου διάθεσης των αποβλήτων (Hosan, 2017).

2.3 Διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων

Τα ραδιενεργά απόβλητα λόγω της επικινδυνότητάς τους για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, χρήζουν είτε άμεσης / βραχυπρόθεσμης εγκεκριμένης διαχείρισης απευθείας από τον παραγωγό τους, είτε μακροπρόθεσμης και οργανωμένης διαχείρισης σε εγκεκριμένες από την Πολιτεία για τον σκοπό αυτό ειδικές εγκαταστάσεις. Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα, η τελική διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- με αποδέσμευση στο περιβάλλον, εφόσον πληρούνται τα θεσμοθετημένα επίπεδα αποδέσμευσης, όπως περιγράφεται στους Κανονισμούς Ακτινοπροστασίας. Τα θεσμοθετημένα αυτά επίπεδα αποδέσμευσης έχουν τεθεί με κριτήριο, ώστε οποιοδήποτε άτομο του πληθυσμού να μην δέχεται δόση ακτινοβολίας πάνω από 10 μSv ανά έτος από την απελευθέρωση του συγκεκριμένου επιπέδου ραδιενέργειας στο περιβάλλον. Επισημαίνεται ότι το όριο δόσης για ένα άτομο του πληθυσμού από το σύνολο των πρακτικών ιοντιζουσών ακτινοβολιών είναι 1000 μSv ανά έτος. Τα όρια αυτά είναι τα ίδια σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο.
- με διάθεση (δηλαδή μόνιμη και οριστική εναπόθεση, χωρίς πρόθεση επανάκτησης) σε εγκεκριμένη εγκατάσταση διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων. Υπάρχουν διάφορα είδη εγκαταστάσεων διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων, όπως ενδεικτικά, εναπόθεση σε έκταση (land field disposal), εναπόθεση σε επιφανειακή εγκατάσταση μικρού βάθους (near surface disposal), εναπόθεση σε γεώτρηση κάποιων δεκάδων μέτρων (borehole), κλπ. Η επιλογή του είδους της εγκατάστασης διάθεσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το είδος, η μορφή, η κατάσταση και η ποσότητα των ραδιενεργών αποβλήτων, οι περιέκτες (συσκευασία) των ραδιενεργών αποβλήτων, οι υφιστάμενες και μελλοντικές περιβαλλοντικές συνθήκες (γεωλογικές, σεισμολογικές, υδρολογικές, κ.ο.κ), τα αναπτυξιακά σχέδια διαμόρφωσης περιοχών, οι υπάρχουσες και οι μελλοντικές υποδομές και διαθεσιμότητα χώρων, οικονομικοί-κοινωνικοί παράγοντες, κλπ.

Η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων περιλαμβάνει διάφορα μέτρα για να εξασφαλιστεί ότι ο χειρισμός και η διάθεσή τους γίνεται με ασφάλεια, κατά τρόπο που να ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο έκθεσης των εργαζομένων και του κοινού σε ιονίζουσα ακτινοβολία και να προστατεύει το περιβάλλον (Saling, 2001). Η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων περιλαμβάνει κατά κανόνα τα ακόλουθα στάδια:

2.3.1 Κατεργασία και προσαρμογή

Η κατεργασία περιλαμβάνει εργασίες που αποσκοπούν στην τροποποίηση των χαρακτηριστικών των υγρών αποβλήτων για τη βελτίωση της ασφάλειας ή της οικονομίας. Οι τεχνικές κατεργασίας μπορεί να περιλαμβάνουν συμπίεση για τη μείωση του όγκου, διήθηση ή ανταλλαγή ιόντων για την εξάλειψη της συγκέντρωσης των ραδιονουκλεϊδίων ή καθίζηση για την επίτευξη μεταβολών στη σύνθεση. Η προσαρμογή πραγματοποιείται για να μετατραπούν τα απόβλητα σε μορφή κατάλληλη για ασφαλή χειρισμό, μεταφορά, αποθήκευση και διάθεση. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει συνήθως την τοποθέτηση των αποβλήτων σε περιέκτες. Τα υγρά LLW και ILW στερεοποιούνται συνήθως με τσιμέντο, ενώ τα HLW πυρακτώνονται/αποξηραίνονται και στη συνέχεια υαλοποιούνται σε μια μήτρα. Τα αδρανποιημένα απόβλητα τέλος τοποθετούνται σε περιέκτη κατάλληλο για τα χαρακτηριστικά τους.

2.3.2 Μεταφορά

Η μεταφορά αποτελεί σημαντική πτυχή της διαχείρισης των ραδιενεργών αποβλήτων. Η μεταφορά ραδιενεργών αποβλήτων πρέπει να πραγματοποιείται κατά τρόπο που να διασφαλίζει την ασφάλεια του κοινού, του περιβάλλοντος και των εργαζομένων που συμμετέχουν στη διαδικασία μεταφοράς. Αυτό απαιτεί συμμόρφωση με μια σειρά από εθνικούς και διεθνείς κανονισμούς και πρότυπα, καθώς και τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού και διαδικασιών. Τα ραδιενεργά απόβλητα μεταφέρονται σε εξειδικευμένους περιέκτες που έχουν σχεδιαστεί για να αποτρέπουν την έκλυση ραδιενεργών υλικών κατά τη μεταφορά. Τα εμπορευματοκιβώτια πρέπει να είναι σε θέση να αντέχουν στις συνήθεις καταπονήσεις και καταπονήσεις κατά τη μεταφορά, καθώς και σε τυχόν ατυχήματα ή συμβάντα που ενδέχεται να συμβούν κατά τη διαμετακόμιση. Επιπλέον, οι περιέκτες πρέπει να είναι σε θέση να παρέχουν ακτινοπροστασία για την προστασία των εργαζομένων και του κοινού από την έκθεση σε ιονίζουσα ακτινοβολία. Η μεταφορά ραδιενεργών αποβλήτων

υπόκειται σε αυστηρούς κανονισμούς και απαιτήσεις που έχουν θεσπιστεί από εθνικούς και διεθνείς οργανισμούς. Οι κανονισμοί αυτοί καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα πτυχών της διαδικασίας μεταφοράς, συμπεριλαμβανομένων των απαιτήσεων συσκευασίας και επισήμανσης, της χρήσης των οδών μεταφοράς και των προσόντων του προσωπικού που εμπλέκεται στη διαδικασία μεταφοράς. Οι κανονισμοί απαιτούν επίσης την ανάπτυξη σχεδίων αντιμετώπισης εκτάκτων αναγκών και την παροχή επαρκούς εκπαίδευσης και εξοπλισμού για τη μεταφορά προσωπικού. Η μεταφορά ραδιενεργών αποβλήτων υψηλού επιπέδου, όπως αναλωμένων πυρηνικών καυσίμων, υπόκειται σε ακόμα πιο αυστηρούς κανονισμούς και απαιτήσεις λόγω των υψηλών επιπέδων ραδιενέργειας και των πιθανών συνεπειών ενός μεταφορικού ατυχήματος. Εκτός από τους κανονισμούς που διέπουν τη μεταφορά όλων των ειδών ραδιενεργών αποβλήτων, η μεταφορά αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας πρέπει να συμμορφώνεται με πρόσθετες απαιτήσεις, όπως η χρήση εξειδικευμένων οχημάτων μεταφοράς και η παροχή πρόσθετων μέτρων ασφαλείας. Η μεταφορά ραδιενεργών αποβλήτων μπορεί επίσης να περιλαμβάνει τη χρήση πολλαπλών μέσων μεταφοράς, συμπεριλαμβανομένων των χερσαίων, εναέριων και θαλάσσιων μεταφορών. Η χρήση διαφορετικών τρόπων μεταφοράς εισάγει πρόσθετες πολυπλοκότητες και προκλήσεις, καθώς κάθε τρόπος μεταφοράς έχει διαφορετικές κανονιστικές απαιτήσεις και παρουσιάζει διαφορετικούς κινδύνους. Συνολικά, η μεταφορά ραδιενεργών αποβλήτων είναι ένα σύνθετο και δύσκολο έργο που απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό, προσοχή στη λεπτομέρεια και αυστηρή τήρηση των ρυθμιστικών απαιτήσεων. Η ασφάλεια του κοινού, του περιβάλλοντος και των εργαζομένων που συμμετέχουν στη διαδικασία μεταφοράς πρέπει πάντοτε να αποτελεί πρώτη προτεραιότητα και όλες οι πτυχές της διαδικασίας μεταφοράς πρέπει να διεξάγονται με ασφαλή και υπεύθυνο τρόπο (Rao, 2022).

2.3.4 Χειρισμός και αποθήκευση

Ο χειρισμός και η αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων αποτελεί κρίσιμο μέρος της διαδικασίας διαχείρισης. Ο χειρισμός και η αποθήκευση των ραδιενεργών αποβλήτων είναι ουσιαστικής σημασίας ώστε να αποτρέπεται η έκλυση ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον, να ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος έκθεσης των εργαζομένων και του κοινού σε ιονίζουσα ακτινοβολία και να προστατεύεται το περιβάλλον. Η διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων περιλαμβάνει τη χρήση κατάλληλων δοχείων και εξοπλισμού χειρισμού για την πρόληψη της έκλυσης ραδιενεργών υλικών. Η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων πρέπει να γίνεται σύμφωνα με αυστηρές κανονιστικές απαιτήσεις και οι εργαζόμενοι που χειρίζονται

ραδιενεργά απόβλητα πρέπει να είναι κατάλληλα εκπαιδευμένοι και ειδικευμένοι για να το κάνουν. Τα ραδιενεργά απόβλητα συνήθως αποθηκεύονται σε ειδικά σχεδιασμένες εγκαταστάσεις αποθήκευσης που παρέχουν πολλαπλά εμπόδια για την αποτροπή της έκλυσης ραδιενεργών υλικών. Οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης πρέπει να είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να αντέχουν σε φυσικές καταστροφές, όπως σεισμούς και πλημμύρες, και να αποτρέπουν τη διαφυγή ραδιενεργών υλικών σε περίπτωση πυρκαγιάς ή άλλου ατυχήματος. Οι περιέκτες που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων πρέπει να είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να αποτρέπουν την έκλυση ραδιενεργών υλικών και να αντέχουν στις σκληρές συνθήκες που ενδέχεται να προκύψουν κατά την αποθήκευση, όπως υψηλές θερμοκρασίες, έκθεση σε ακτινοβολία και έκθεση σε διαβρωτικές χημικές ουσίες. Οι περιέκτες πρέπει να είναι ισχυροί, ανθεκτικοί και ανθεκτικοί σε κρούσεις και παρακεντήσεις και να μπορούν να αντέχουν σε ακραίες μεταβολές θερμοκρασίας. Τα ραδιενεργά απόβλητα πρέπει επίσης να αποθηκεύονται με τρόπο που να αποτρέπει τη μόλυνση των εργαζομένων και του περιβάλλοντος. Αυτό συνήθως περιλαμβάνει την αποθήκευση των αποβλήτων σε ελεγχόμενο περιβάλλον που είναι απομονωμένο από το περιβάλλον και τη λήψη μέτρων για την πρόληψη της διαφυγής ραδιενεργών υλικών στον αέρα ή στο νερό. Η αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας, όπως τα αναλωμένα πυρηνικά καύσιμα, είναι ιδιαίτερα δύσκολη λόγω των υψηλών επιπέδων ραδιενέργειας και των μεγάλων χρόνων ημιζωής των σχετικών ισοτόπων. Τα αναλωμένα πυρηνικά καύσιμα συνήθως αποθηκεύονται σε ειδικά σχεδιασμένες δεξαμενές αποθήκευσης ή σε ξηρά βαρέλια, τα οποία είναι σχεδιασμένα για να αποτρέπουν την έκλυση ραδιενεργών υλικών και να παρέχουν ψύξη για την πρόληψη υπερθέρμανσης. Γενικά, ο χειρισμός και η αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων είναι ένα πολύπλοκο και δύσκολο έργο που απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό, προσοχή στη λεπτομέρεια και αυστηρή τήρηση των κανονιστικών απαιτήσεων. Είναι απαραίτητο ο χειρισμός και η αποθήκευση των ραδιενεργών αποβλήτων να γίνεται με ασφάλεια για την προστασία των εργαζομένων και του περιβάλλοντος και για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου έκθεσης σε ιονίζουσα ακτινοβολία (Pusch, 2009).

2.3.5 Διάθεση

Η τελική διάθεση είναι το τελικό στάδιο της διαχείρισης των ραδιενεργών αποβλήτων. Στόχος της διάθεσης των ραδιενεργών αποβλήτων είναι η ασφαλής απομόνωση των

αποβλήτων από το περιβάλλον και το κοινό για όσο διάστημα παραμένουν επικίνδυνα. Η διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει μια ποικιλία μεθόδων, ανάλογα με τον τύπο και τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων. Μια από τις πιο κοινές μεθόδους διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων είναι η γεωλογική διάθεση, η οποία περιλαμβάνει την απομόνωση των αποβλήτων σε βαθιά υπόγεια γεωλογικά σχήματα. Το γεωλογικό αποθετήριο έχει σχεδιαστεί για να παρέχει μακροπρόθεσμη απομόνωση των αποβλήτων από το περιβάλλον και το κοινό. Τα απόβλητα αποθηκεύονται σε μηχανοποιημένους περιέκτες οι οποίοι τοποθετούνται σε γεωτρήσεις ή σήραγγες που εκσκάπτονται στο βράχο υποδοχής. Το αποθετήριο πρέπει να βρίσκεται σε κατάλληλο γεωλογικό σχηματισμό που να παρέχει επαρκή απομόνωση από το περιβάλλον, όπως ο σταθερός σχηματισμός πετρωμάτων με χαμηλή διαπερατότητα και χαμηλή ροή υπόγειων υδάτων. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή του αποθετηρίου πρέπει να εξασφαλίζει την ακεραιότητα των περιεκτών αποβλήτων και να αποτρέπει την έκλυση ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον. Μια άλλη μέθοδος διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων είναι η χρήση εγκαταστάσεων διάθεσης κοντά στην επιφάνεια, οι οποίες είναι ρηχά αποθετήρια που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Οι εγκαταστάσεις αποκομιδής κοντά στην επιφάνεια χρησιμοποιούνται για απόβλητα χαμηλού και μεσαίου επιπέδου. Τα απόβλητα αποθηκεύονται σε μηχανοποιημένους περιέκτες οι οποίοι τοποθετούνται σε τάφρους ή θύλακες που στη συνέχεια καλύπτονται με χώμα και άλλα υλικά για να αποτρέψουν την έκλυση ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή της εγκατάστασης διάθεσης πρέπει να εξασφαλίζει την ακεραιότητα των περιεκτών αποβλήτων και να αποτρέπει την απελευθέρωση ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον. Εκτός από τη γεωλογική και την εγγύς στην επιφάνεια διάθεση, υπάρχουν και άλλες μέθοδοι διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων, όπως η διάθεση σε βαθιές γεωτρήσεις, η διάθεση στο διάστημα και η μεταστοιχείωση. Η διάθεση των βαθιών γεωτρήσεων περιλαμβάνει την εναπόθεση αποβλήτων σε βαθιές γεωτρήσεις που διατρέχουν τη γη. Η διάθεση του διαστήματος περιλαμβάνει την εκτόξευση αποβλήτων στο διάστημα, ενώ η μεταστοιχείωση περιλαμβάνει τη μετατροπή των ραδιενεργών ισοτόπων σε σταθερά ισότοπα με τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος και τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων, οι κανονιστικές απαιτήσεις και η κοινωνική αποδοχή της μεθόδου διάθεσης. Η διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας, όπως αναλωμένου πυρηνικού καυσίμου, υπόκειται σε αυστηρές κανονιστικές απαιτήσεις και η μέθοδος διάθεσης πρέπει να παρέχει μακροπρόθεσμη απομόνωση των αποβλήτων από το περιβάλλον και το κοινό.

Συνολικά, η διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων είναι ένα σύνθετο και δύσκολο έργο που απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό, προσοχή στη λεπτομέρεια και αυστηρή τήρηση των κανονιστικών απαιτήσεων. Η ασφάλεια του κοινού, του περιβάλλοντος και των εργαζομένων που συμμετέχουν στη διαδικασία διάθεσης πρέπει πάντοτε να αποτελεί ύψιστη προτεραιότητα και όλες οι πτυχές της διαδικασίας διάθεσης πρέπει να διεξάγονται με ασφάλεια και υπευθυνότητα (Charman, 2012).

2.3.6 Παρακολούθηση και επιτήρηση

Η παρακολούθηση και η επιτήρηση αποτελούν σημαντικές συνιστώσες της διαχείρισης των ραδιενεργών αποβλήτων. Σκοπός της παρακολούθησης και της επιτήρησης είναι να εξασφαλιστεί ότι τα απόβλητα τυγχάνουν ασφαλούς διαχείρισης και δεν ενέχουν κίνδυνο για το περιβάλλον ή το κοινό. Οι δραστηριότητες παρακολούθησης και επιτήρησης μπορούν να περιλαμβάνουν τη μέτρηση των επιπέδων ακτινοβολίας εντός και γύρω από τις εγκαταστάσεις αποθήκευσης και διάθεσης, την επιθεώρηση των περιεκτών αποβλήτων και των εγκαταστάσεων αποθήκευσης και διάθεσης, καθώς και την εκτίμηση των δυνητικών επιπτώσεων των αποβλήτων στο περιβάλλον και στο κοινό. Οι δραστηριότητες παρακολούθησης και επιτήρησης διεξάγονται συνήθως από τους οργανισμούς διαχείρισης αποβλήτων και τις ρυθμιστικές αρχές. Οι οργανισμοί διαχείρισης αποβλήτων είναι υπεύθυνοι για την παρακολούθηση των επιπέδων ραδιενέργειας μέσα και γύρω από τις εγκαταστάσεις αποθήκευσης και διάθεσης και για τη διασφάλιση ότι οι περιεκτές αποβλήτων και οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης και διάθεσης συντηρούνται και λειτουργούν σωστά. Οι ρυθμιστικές αρχές είναι υπεύθυνες για την επαλήθευση της συμμόρφωσης των οργανισμών διαχείρισης αποβλήτων προς τις κανονιστικές απαιτήσεις και της ορθής διεξαγωγής των δραστηριοτήτων παρακολούθησης και εποπτείας. Οι δραστηριότητες παρακολούθησης και επιτήρησης μπορούν να περιλαμβάνουν τη χρήση διαφόρων τεχνικών και εργαλείων, όπως ανιχνευτές ακτινοβολίας, κάμερες και τεχνολογίες τηλεπισκόπησης. Οι ανιχνευτές ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των επιπέδων ακτινοβολίας που εκπέμπουν τα δοχεία αποβλήτων και οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης και διάθεσης. Οι κάμερες χρησιμοποιούνται για την επιθεώρηση των περιεκτών απορριμμάτων και των εγκαταστάσεων αποθήκευσης και διάθεσης για σημεία φθοράς ή φθοράς. Οι τεχνολογίες τηλεπισκόπησης χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων των αποβλήτων στο περιβάλλον, όπως η μετακίνηση των υπόγειων υδάτων και η μετανάστευση των ρύπων. Οι δραστηριότητες παρακολούθησης και επιτήρησης μπορούν να διεξάγονται

σε τακτική βάση ή σε ανταπόκριση σε συγκεκριμένα γεγονότα ή περιστατικά. Για παράδειγμα, οι δραστηριότητες παρακολούθησης και επιτήρησης ενδέχεται να αυξηθούν λόγω αλλαγών στην απογραφή των αποβλήτων, αλλαγών στις περιβαλλοντικές συνθήκες ή συμβάντων όπως ατυχήματα ή φυσικές καταστροφές. Τα αποτελέσματα των δραστηριοτήτων παρακολούθησης και επιτήρησης χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση σχετικά με τη διαδικασία λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων. Οι πληροφορίες που συλλέγονται από τις δραστηριότητες παρακολούθησης και εποπτείας χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό δυνητικών κινδύνων και για την ανάπτυξη στρατηγικών για τον μετριασμό των εν λόγω κινδύνων. Τα αποτελέσματα των δραστηριοτήτων παρακολούθησης και επιτήρησης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση του σχεδιασμού και της λειτουργίας των εγκαταστάσεων αποθήκευσης και διάθεσης, για τη βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων και για την ενίσχυση της ασφάλειας και προστασίας των εργασιών διαχείρισης των αποβλήτων. Συνοπτικά, η παρακολούθηση και η επιτήρηση αποτελούν κρίσιμα στοιχεία της διαχείρισης των ραδιενεργών αποβλήτων. Οι δραστηριότητες αυτές είναι απαραίτητες για να εξασφαλιστεί ότι η διαχείριση των αποβλήτων γίνεται με ασφάλεια και δεν θέτουν σε κίνδυνο το περιβάλλον ή το κοινό. Οι δραστηριότητες παρακολούθησης και εποπτείας περιλαμβάνουν τη χρήση διαφόρων τεχνικών και εργαλείων και διεξάγονται συνήθως από τους οργανισμούς διαχείρισης αποβλήτων και τις ρυθμιστικές αρχές. Τα αποτελέσματα των δραστηριοτήτων παρακολούθησης και επιτήρησης χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση σχετικά με τη διαδικασία λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων και για τη βελτίωση της ασφάλειας και της αποτελεσματικότητας των εργασιών διαχείρισης αποβλήτων (IAEA, 2013).

2.4 Αποθήκευση και διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων

Η αποθήκευση των αποβλήτων μπορεί να πραγματοποιηθεί σε οποιοδήποτε στάδιο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας διαχείρισης. Η αποθήκευση περιλαμβάνει τη διατήρηση των αποβλήτων κατά τρόπο ώστε να είναι δυνατή η ανάκτησή τους, εξασφαλίζοντας παράλληλα την απομόνωσή τους από το εξωτερικό περιβάλλον. Τα απόβλητα μπορεί να αποθηκεύονται για να διευκολυνθεί το επόμενο στάδιο της διαχείρισης (για παράδειγμα, επιτρέποντας τη διάσπαση της φυσικής ραδιενέργειάς τους). Οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης βρίσκονται συνήθως στο χώρο του σταθμού παραγωγής ενέργειας, αλλά μπορεί επίσης να είναι ξεχωριστές από την εγκατάσταση όπου παράχθηκαν. Η διάθεση των αποβλήτων

πραγματοποιείται όταν δεν υπάρχει περαιτέρω προβλέψιμη χρήση τους και, στην περίπτωση των HLW, όταν η ραδιενέργεια έχει διασπαστεί σε σχετικά χαμηλά επίπεδα μετά από περίπου 40-50 χρόνια.



Εικόνα 6. Ινστιτούτο πυρηνικής τεχνολογίας Ταϊλάνδης (TINT), βαρέλια με χαμηλής ραδιενέργειας απόβλητα

2.4.1 Αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων:

- Προσωρινή αποθήκευση: Η προσωρινή αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων χρησιμοποιείται για απόβλητα που τελικά θα απορριφθούν σε μόνιμη εγκατάσταση. Αυτός ο τύπος αποθήκευσης μπορεί να είναι υπέργειος ή προσωρινός. Οι υπέργειες εγκαταστάσεις αποθήκευσης χρησιμοποιούνται συνήθως για απόβλητα που απαιτούν ψύξη πριν να μπορούν να απορριφθούν. Για παράδειγμα, οι ράβδοι αναλωμένου καυσίμου από πυρηνικούς αντιδραστήρες αποθηκεύονται σε δεξαμενές ψύξης για αρκετά χρόνια πριν μεταφερθούν σε μόνιμη εγκατάσταση διάθεσης. Οι ενδιάμεσες εγκαταστάσεις αποθήκευσης χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση αποβλήτων που πρόκειται να απορριφθούν. Οι εγκαταστάσεις αυτές είναι σχεδιασμένες για την αποθήκευση αποβλήτων για αρκετά χρόνια, έως ότου καταστεί διαθέσιμη κατάλληλη εγκατάσταση μόνιμης διάθεσης. (Thomauske, 2003)

- **Μακροπρόθεσμη αποθήκευση:** Η μακροχρόνια αποθήκευση χρησιμοποιείται για απόβλητα που θα παραμείνουν ραδιενεργά για παρατεταμένο χρονικό διάστημα. Αυτός ο τύπος αποθήκευσης συνήθως περιλαμβάνει τη χρήση υπόγειων αποθηκών. Τα αποθετήρια είναι σχεδιασμένα για να παρέχουν μακροπρόθεσμη συγκράτηση των αποβλήτων και μπορούν να βρίσκονται σε γεωλογικά σταθερούς σχηματισμούς. Τα απόβλητα συνήθως τοποθετούνται σε περιέκτες, όπως βαρέλια χάλυβα ή σκυροδέματος, τα οποία είναι σχεδιασμένα να παρέχουν μακροπρόθεσμη συγκράτηση των αποβλήτων. Η μακροπρόθεσμη αποθήκευση μπορεί να είναι απαραίτητη για τα ραδιενεργά απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας, τα οποία παραμένουν επικίνδυνα για χιλιάδες χρόνια. (Dellamano, 2007)

2.4.2 Διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων:

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων, κάθε μία από τις οποίες έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι πιο κοινά αποδεκτές επιλογές διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων είναι: η επιφανειακή διάθεση στο επίπεδο του εδάφους ή σε σπήλαια κάτω από το επίπεδο του εδάφους σε βάθη δεκάδων μέτρων και η βαθιά γεωλογική διάθεση σε βάθη μεταξύ 250m και 1000m για αποθήκες εξόρυξης (mined repositories) και 2000m έως 5000m για γεωτρήσεις (boreholes). Λόγω της μακροπρόθεσμης φύσης αυτών των σχεδίων διαχείρισης, οι βιώσιμες επιλογές πρέπει να έχουν ένα ή περισσότερα προκαθορισμένα ορόσημα στα οποία θα μπορούσε να ληφθεί απόφαση σχετικά με το ποια επιλογή θα ακολουθηθεί. Ένα τρέχον ερώτημα είναι αν τα απόβλητα πρέπει να τοποθετούνται έτσι ώστε να είναι εύκολα ανακτήσιμα από τους χώρους αποθήκευσης. Υπάρχουν βάσιμοι λόγοι για να παραμείνουν τέτοιες επιλογές ανοικτές - ειδικότερα, είναι πιθανό οι μελλοντικές γενιές να θεωρήσουν ότι τα θαμμένα απόβλητα αποτελούν πολύτιμο πόρο. Από την άλλη πλευρά, το μόνιμο κλείσιμο θα μπορούσε να αυξήσει τη μακροπρόθεσμη ασφάλεια της εγκατάστασης. Αφού θαφτούν για περίπου 1000 χρόνια, το μεγαλύτερο μέρος της ραδιενέργειας θα έχει διασπαστεί. Η ποσότητα της ραδιενέργειας που θα απομένει τότε θα είναι παρόμοια με εκείνη του φυσικού μεταλλεύματος ουρανίου από το οποίο προήλθε, αν και θα είναι πιο συμπυκνωμένη. Στις εξορυγμένες αποθήκες, οι οποίες αποτελούν την κύρια ιδέα που επιδιώκεται, η δυνατότητα ανάκτησης μπορεί να είναι απλή,

αλλά οποιαδήποτε διάθεση σε βαθιά γεώτρηση είναι μόνιμη. ο νόμος της Γαλλίας για τα απόβλητα του 2006 αναφέρει ότι η διάθεση των HLW πρέπει να είναι "αναστρέψιμη", κάτι που διευκρινίστηκε με τροπολογία του 2015, ώστε να σημαίνει την εξασφάλιση μακροπρόθεσμης ευελιξίας στην πολιτική διάθεσης, ενώ η "δυνατότητα ανάκτησης" αναφέρεται στη βραχυπρόθεσμη πρακτικότητα. Η Γαλλία, η Ελβετία, ο Καναδάς, η Ιαπωνία και οι ΗΠΑ απαιτούν δυνατότητα ανάκτησης. Η πολιτική αυτή ακολουθείται και στις περισσότερες άλλες χώρες, αν και αυτό προϋποθέτει ότι μακροπρόθεσμα η αποθήκη θα σφραγιστεί για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις ασφαλείας.

Επιφανειακή διάθεση(near surface disposal)

Συνήθως αποτελείται από τάφρους ή θόλους κατασκευασμένους στην επιφάνεια του εδάφους ή σε μερικά δεκάδες μέτρα κάτω από το έδαφος και αφορούν απόβλητα κατηγορίας LLW έως ILW. Οι εγκαταστάσεις αυτές θα επηρεαστούν από τις μακροπρόθεσμες κλιματικές αλλαγές και η επίδραση αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την εξέταση της ασφάλειας, καθώς οι αλλαγές αυτές θα μπορούσαν να διαταράξουν τις εγκαταστάσεις αυτές. Αυτός ο τύπος εγκαταστάσεων χρησιμοποιείται επομένως συνήθως για τα LLW και τα βραχύβια ILW με χρόνο ημιζωής έως και 30 έτη.

- **Εγκαταστάσεις διάθεσης στο επίπεδο του εδάφους:** Αυτές οι εγκαταστάσεις βρίσκονται πάνω ή κάτω από την επιφάνεια όπου το προστατευτικό κάλυμμα έχει πάχος της τάξης των λίγων μέτρων. Τα δοχεία απορριμμάτων τοποθετούνται σε κατασκευασμένους θόλους και όταν γεμίσουν επιχωματώνονται. Τελικά θα καλυφθούν με αδιαπέραστη μεμβράνη και φυτόχωμα. Αυτές οι εγκαταστάσεις μπορεί να ενσωματώνουν κάποια μορφή αποστράγγισης και πιθανώς ένα σύστημα εξαερισμού αερίου.
- **Εγκαταστάσεις διάθεσης σε στοές κάτω από το επίπεδο του εδάφους:** Σε αντίθεση με τη διάθεση στο επίπεδο του εδάφους, όπου οι εκσκαφές πραγματοποιούνται στην επιφάνεια, η μέθοδος αυτή απαιτεί υπόγεια εκσκαφή στοών. Η εγκατάσταση βρίσκεται σε βάθος μερικών δεκάδων μέτρων κάτω από την επιφάνεια της γης και η πρόσβαση σε αυτήν γίνεται μέσω μιας σήραγγας.

Βαθιά Γεωλογική Διάθεση(Deep geological disposal)

Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει την τοποθέτηση των αποβλήτων σε ένα βαθύ γεωλογικό σχηματισμό, συνήθως αρκετές εκατοντάδες μέτρα κάτω από την επιφάνεια. Τα απόβλητα

τοποθετούνται σε μηχανοποιημένες εγκαταστάσεις σχεδιασμένες να παρέχουν μακροπρόθεσμη απομόνωση από τη βιόσφαιρα. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εξετάζονται για την διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων περιλαμβάνουν αλάτι, άργιλο και γρανίτη. Σε σχηματισμό αλάτος, η θερμότητα που παράγεται από τα απόβλητα προκαλεί το περιβάλλον αλάτι να ρέει αργά και να κλείνει στα απόβλητα, παρέχοντας ένα φυσικό εμπόδιο για την απελευθέρωση ραδιενεργών υλικών. Σε έναν αργιλώδη σχηματισμό, τα απόβλητα περιβάλλονται με μπεντονίτη, ο οποίος έχει την ικανότητα να απορροφά το νερό και να διογκώνεται, παρέχοντας μια σφιχτή στεγανότητα γύρω από τα απόβλητα. Σε ένα γρανιτικό σχηματισμό, τα απόβλητα τοποθετούνται σε σήραγγες και περιβάλλεται από μια ποικιλία φραγμάτων, συμπεριλαμβανομένης του μπεντονίτη και ένα τσιμεντένιο ενέμα (Miller, 2000). Η βαθιά γεωλογική διάθεση θεωρείται ευρέως ως η προτιμώμενη μέθοδος για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας (McCartin, 2020), διότι:

- Ένα γεωλογικό αποθετήριο χρησιμοποιεί πολλαπλά φράγματα που περιλαμβάνουν τα απόβλητα από τη μορφή, τον περιέκτη, τα υλικά σφράγισης και το βράχο υποδοχής. Το σύστημα είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε η βλάβη ενός εξαρτήματος να μην θέτει σε κίνδυνο την ασφάλεια του συστήματος συγκράτησης στο σύνολό του.
- Ο βράχος θα είναι σταθερός και προβλέψιμος για μεγάλες χρονικές περιόδους.
- Ο χαμηλής διαπερατότητας βράχος θα εξασφάλιζε ότι τα νερά απομονώνονται και δεν αναμιγνύονται με επιφανειακά ύδατα.
- Το σύστημα γεωλογικού αποθετηρίου σε βάθος θα διατηρεί ένα χημικό και υδρολογικό περιβάλλον που είναι ευνοϊκό για τη σταθερότητα και την απόδοση του αποθετηρίου.
- Τα φυσικά ανάλογα παρέχουν στοιχεία που αποδεικνύουν ότι τα κατασκευαστικά στοιχεία του συστήματος φραγμού είναι σταθερά για πολύ μεγάλες χρονικές περιόδους κάτω από παρόμοιες βαθιές γεωλογικές συνθήκες.
- Το βάθος του αποθετηρίου θα είναι τέτοιο ώστε η μελλοντική ακούσια ανθρώπινη παρέμβαση στο κλειστό αποθετήριο θα είναι πολύ απίθανη.
- Η διεθνής πρόοδος όσον αφορά την εφαρμογή του αποθετηρίου παρέχει τη βεβαιότητα ότι η διάθεση σε γεωλογικούς σχηματισμούς αποτελεί άρτια τεχνική λύση και παρέχει πρακτική εμπειρία.
- Μελέτες περιπτώσεων εκτίμησης της ασφάλειας δείχνουν ότι οι τυχόν επιπτώσεις είναι πιθανόν να είναι σαφώς χαμηλότερες από τους συνιστώμενους περιορισμούς δόσης και τους φυσικούς ρυθμούς αρχικής δόσης.

- Ένα γεωλογικό αποθετήριο μπορεί να κατασκευαστεί και να λειτουργήσει με ασφάλεια χρησιμοποιώντας αποδεδειγμένες τεχνολογίες.
- Τα ραδιονουκλεΐδια στο χρησιμοποιούμενο καύσιμο διασπώνται με τον χρόνο.
- Η τοποθεσία του αποθετηρίου μπορεί να παρακολουθείται για να επιβεβαιωθεί η απόδοση του συστήματος.

Βαθιά διάθεση μέσω γεωτρήσεων (Deep borehole disposal)

Η διάθεση με βαθιές γεωτρήσεις περιλαμβάνουν μιας γεώτρηση αρκετά χιλιόμετρα βαθιά μέσα στη γη και την διάθεση των αποβλήτων στην γεώτρηση. Στη συνέχεια, η γεώτρηση γεμίζεται με άργιλο και μπεντονίτη για να παρέχει πρόσθετη απομόνωση. Η μέθοδος αυτή έχει προταθεί ως πιθανή επιλογή διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας αλλά δεν έχει χρησιμοποιηθεί ακόμα. Το πλεονέκτημα της διάθεσης των βαθιών γεωτρήσεων είναι ότι τα απόβλητα απομονώνονται από το περιβάλλον με πολλά χιλιόμετρα πετρωμάτων και αργίλου. Αυτή η μέθοδος έχει επίσης ένα μικρό εμβαδόν επιφάνειας, και η γεώτρηση μπορεί να τρυπηθεί σε μια απομακρυσμένη τοποθεσία μακριά από κατοικημένες περιοχές.

Άλλες προτεινόμενες μέθοδοι για την διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων είναι η υποθαλάσσια διάθεση, όπου τα απόβλητα τοποθετούνται σε ιζήματα κάτω από το πυθμένα των ωκεανών, η διάθεση στο διάστημα, όπου τα απόβλητα εκτοξεύονται στο διάστημα και εναποτίθενται σε άλλο πλανήτη ή στον ήλιο, διάθεση σε στρώμα πάγου, κ.α. Ωστόσο, αυτές οι μέθοδοι βρίσκονται ακόμα στη φάση της έρευνας και ανάπτυξης ή έχουν απορριφθεί και δεν χρησιμοποιούνται αυτήν τη στιγμή. Συνοπτικά, η επιλογή μιας μεθόδου διάθεσης για ραδιενεργά απόβλητα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του τύπου και της ποσότητας των αποβλήτων, της γεωλογίας, της υδρογεωλογίας και της εγγύτητας σε πληθυσμούς και οικοσυστήματα. Στόχος κάθε μεθόδου διάθεσης είναι η μακροπρόθεσμη απομόνωση των αποβλήτων από το περιβάλλον και η ελαχιστοποίηση των κινδύνων για τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον.

Διαχείριση LLW και βραχύβια HLW: Τα περισσότερα από τα LLW και τα βραχύβια HLW αποστέλλονται συνήθως σε χερσαία διάθεση αμέσως μετά τη συσκευασία τους. Αυτό σημαίνει ότι για την πλειονότητα (>90% κατ' όγκο) όλων των τύπων αποβλήτων, έχει αναπτυχθεί και εφαρμόζεται σε όλο τον κόσμο ένα ικανοποιητικό μέσο διάθεσης.

Εγκαταστάσεις διάθεσης κοντά στην επιφάνεια της γης λειτουργούν σήμερα σε πολλές χώρες, μεταξύ των οποίων:

- UK - LLW Repository at Drigg in Cumbria που λειτουργεί από την UK Nuclear Waste Management (κοινοπραξία με επικεφαλής την Washington Group International και τις Studsvik UK, Serco και Areva) για λογαριασμό της Nuclear Decommissioning Authority.
- Ισπανία - εγκατάσταση διάθεσης LLW και ILW στο El Cabril που λειτουργεί από την ENRESA.
- Γαλλία - Centre de l'Aube και Morvilliers που διαχειρίζεται η ANDRA.
- Σουηδία - SFR στο Forsmark που λειτουργεί από την SKB.
- Φινλανδία - Olkiluoto και Loviisa, που λειτουργούν από την TVO και την Fortum.
- Ρωσία - Ozersk, Tomsk, Novouralsk, Sosnovy Bor, που λειτουργούν από τη NO RAO.
- Νότια Κορέα - Wolsong, που λειτουργεί από την KORAD.
- Ιαπωνία - Κέντρο Διάθεσης LLW στο Rokkasho-Mura, το οποίο λειτουργεί από την Japan Nuclear Fuel Limited.
- ΗΠΑ - πέντε εγκαταστάσεις διάθεσης LLW: Barnwell, Νότια Καρολίνα, Clive, Γιούτα, Oak Ridge, Τενεσί - όλες λειτουργούν από την Energy Solutions- και Richland, Ουάσιγκτον - λειτουργεί από την American Ecology Corporation.

Ορισμένα υγρά LLW από εγκαταστάσεις επανεπεξεργασίας απορρίπτονται στη θάλασσα. Αυτά περιλαμβάνουν ραδιονουκλίδια που είναι διακριτά, ιδίως το τεθένιο-99 (που χρησιμοποιείται μερικές φορές ως ιχνηθέτης σε περιβαλλοντικές μελέτες), και αυτό μπορεί να διακριθεί σε απόσταση πολλών εκατοντάδων χιλιομέτρων. Ωστόσο, οι απορρίψεις αυτές ρυθμίζονται και ελέγχονται, και η μέγιστη δόση ακτινοβολίας που λαμβάνει κανείς από αυτές είναι ένα μικρό κλάσμα της φυσικής ακτινοβολίας υποβάθρου .

Διαχείριση ILW και HLW μακράς διάρκειας ζωής: Το μακρύ χρονικό διάστημα κατά το οποίο ορισμένα ILW και HLW - συμπεριλαμβανομένων των χρησιμοποιημένων καυσίμων όταν θεωρούνται απόβλητα - παραμένουν ραδιενεργά έχει οδηγήσει στην καθολική αποδοχή της έννοιας της βαθιάς γεωλογικής διάθεσης. Έχουν διερευνηθεί πολλές άλλες επιλογές διαχείρισης αποβλήτων μακράς διάρκειας, αλλά η βαθιά γεωλογική διάθεση είναι πλέον

η προτιμώμενη επιλογή στις περισσότερες χώρες. Στις ΗΠΑ λειτουργεί το πιλοτικό εργοστάσιο απομόνωσης αποβλήτων (WIPP) βαθιάς γεωλογικής απόθεσης αποβλήτων για τη διάθεση των τρανσουρανικών αποβλήτων από στρατιωτικές πηγές, μολυσμένων με πλουτόνιο. Όπως προαναφέρθηκε, τα χρησιμοποιημένα καύσιμα μπορούν είτε να επανεπεξεργαστούν είτε να διατεθούν απευθείας. Όπως και να έχει, υπάρχει ισχυρό τεχνικό κίνητρο για την καθυστέρηση της τελικής διάθεσης των HLW για περίπου 40-50 χρόνια μετά την απομάκρυνσή τους, οπότε η θερμότητα και η ραδιενέργεια θα έχουν μειωθεί πάνω από 99% (IAEA, 2022). Η προσωρινή αποθήκευση των χρησιμοποιημένων καυσίμων γίνεται κυρίως σε δεξαμενές αποθήκευσης που συνδέονται με μεμονωμένους αντιδραστήρες, ή σε μια κοινή δεξαμενή σε εγκαταστάσεις πολλαπλών αντιδραστήρων, ή περιστασιακά σε μια κεντρική τοποθεσία. Επί του παρόντος, υπάρχουν περίπου 263.000 τόνοι χρησιμοποιημένου καυσίμου σε αποθήκευση (IAEA, 2022). Πάνω από τα δύο τρίτα αυτού βρίσκονται σε δεξαμενές αποθήκευσης, ενώ ένα αυξανόμενο ποσοστό βρίσκεται σε ξηρή αποθήκευση. Οι δεξαμενές αποθήκευσης στους αντιδραστήρες, και εκείνες σε κεντρικές εγκαταστάσεις όπως το CLAB στη Σουηδία, έχουν βάθος 7-12m, ώστε να επιτρέπουν την ύπαρξη αρκετών μέτρων νερού πάνω από το αναλωμένο καύσιμο (συναρμολογημένο σε ράφια μήκους συνήθως περίπου 4m). Τα πολλαπλά ράφια είναι κατασκευασμένα από μέταλλο με ενσωματωμένους απορροφητές νετρονίων. Το νερό που κυκλοφορεί μας προστατεύει και ψύχει το καύσιμο. Οι δεξαμενές αυτές είναι στιβαρές κατασκευές από παχύ οπλισμένο σκυρόδεμα με χαλύβδινες επενδύσεις. Οι δεξαμενές στους αντιδραστήρες σχεδιάζονται συχνά για να συγκρατούν όλα τα χρησιμοποιημένα καύσιμα που παράγονται κατά τη διάρκεια της προγραμματισμένης διάρκειας λειτουργίας του αντιδραστήρα. Ορισμένα καύσιμα που έχουν ψυχθεί σε δεξαμενές αποθήκευσης για τουλάχιστον πέντε χρόνια αποθηκεύονται σε ξηρά δοχεία ή σε θήκες με κυκλοφορία αέρα μέσα σε θωράκιση από σκυρόδεμα. Ένα συνηθισμένο σύστημα είναι τα σφραγισμένα χαλύβδινα δοχεία ή τα δοχεία πολλαπλών χρήσεων (MPCs) που το καθένα περιέχει έως και 40 περίπου συγκροτήματα καυσίμου με αδρανές αέριο. Τα κιβώτια/MPCs μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά και την ενδεχόμενη διάθεση των χρησιμοποιημένων καυσίμων. Για την αποθήκευση, κάθε ένα από αυτά είναι κλεισμένο σε αεριζόμενη μονάδα αποθήκευσης από σκυρόδεμα και γάλυβα.. Οι μονάδες είναι ανθεκτικές και παρέχουν πλήρη θωράκιση. Κάθε κιβώτιο έχει θερμικό φορτίο έως 45 kW. Εάν τα χρησιμοποιημένα καύσιμα αντιδραστήρων επανεπεξεργάζονται, τα προκύπτοντα υγρά HLW πρέπει να στερεοποιηθούν. Το HLW παράγει επίσης σημαντική ποσότητα θερμότητας και απαιτεί ψύξη. Υαλοποιείται σε βοριοπυριτικό γυαλί (Pyrex), σφραγίζεται σε βαριούς κυλίνδρους

από ανοξειδωτο χάλυβα ύψους περίπου 1,3 μέτρων και αποθηκεύεται για ενδεχόμενη διάθεση βαθιά κάτω από το έδαφος. Το υλικό αυτό δεν έχει καμία πιθανή μελλοντική χρήση και χαρακτηρίζεται παγκοσμίως ως απόβλητο. Η Γαλλία διαθέτει δύο εμπορικά εργοστάσια υαλοποίησης HLW που έχουν απομείνει από την επανεπεξεργασία καυσίμων, ενώ υπάρχουν επίσης εργοστάσια στο Ηνωμένο Βασίλειο και το Βέλγιο. Η δυναμικότητα αυτών των δυτικοευρωπαϊκών μονάδων είναι 2500 δοχεία (1000 τόνοι) ετησίως και ορισμένες λειτουργούν εδώ και τρεις δεκαετίες. Το Sellafield, στο Ηνωμένο Βασίλειο, έχει παράγει πάνω από 6000 δοχεία υαλοποιημένου HLW. Το αυστραλιανό σύστημα Synroc (συνθετικό πέτρωμα) είναι ένας πιο εξελιγμένος τρόπος διαχείρισης τέτοιων αποβλήτων, και η διαδικασία αυτή μπορεί τελικά να χρησιμοποιηθεί για τα πολιτικά απόβλητα αν τα χρησιμοποιημένα καύσιμα αντιδραστήρων δεν επανεπεξεργαστούν, θα εξακολουθούν να περιέχουν όλα τα ιδιαίτερα ραδιενεργά ισότοπα. Τα αναλωμένα καύσιμα που δεν επανεπεξεργάζονται αντιμετωπίζονται ως HLW για άμεση διάθεση. Αυτό παράγει πολλή θερμότητα και απαιτεί ψύξη. Ωστόσο, δεδομένου ότι αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από ουράνιο (με λίγο πλουτόνιο), αντιπροσωπεύει έναν δυνητικά πολύτιμο πόρο, και υπάρχει μια αυξανόμενη απροθυμία για την αμετάκλητη διάθεσή του. Για την τελική διάθεση, για να εξασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρξουν σημαντικές περιβαλλοντικές εκπομπές για δεκάδες χιλιάδες χρόνια, σχεδιάζεται η γεωλογική διάθεση με "πολλαπλά φράγματα". Αυτή η τεχνική θα ακινητοποιήσει τα ραδιενεργά στοιχεία στα HLW και τα μακράς διάρκειας ILW και θα τα απομονώσει από τη βιόσφαιρα. Οι πολλαπλοί φραγμοί είναι οι εξής:

- Ακινητοποίηση των αποβλήτων σε μια αδιάλυτη μήτρα, όπως βοριοπυριτικό γυαλί ή συνθετικό πέτρωμα (τα σφαιρίδια καυσίμου είναι ήδη ένα πολύ σταθερό κεραμικό, UO₂).
- Συγκράτηση των αποβλήτων σφραγισμένα μέσα σε δοχείο ανθεκτικό στη διάβρωση, όπως ο ανοξειδωτος χάλυβας.
- Απομόνωση των αποβλήτων από τους ανθρώπους και το περιβάλλον, ώστε τελικά να τοποθετηθούν βαθιά στο υπέδαφος σε μια σταθερή βραχώδη δομή.
- Φραγμός οποιασδήποτε σημαντικής μετανάστευσης ραδιονουκλιδίων από την αποθήκη, οπότε περιβάλλετε τους περιέκτες με ένα αδιαπέραστο επίχωμα, όπως μπεντονίτη.

2.5 Διαχρονικά ενεργά και υπό κατασκευή υπόγεια αποθετήρια ραδιενεργών αποβλήτων

2.5.1 Hostim, Τσεχοσλοβακία

Στην Τσεχοσλοβακία χρησιμοποιήθηκαν δύο υπόγειοι θάλαμοι συνολικής χωρητικότητας περίπου 1.600 m³ σε ένα λατομείο αδρανών του οποίου η λειτουργία χρονολογείται από τη δεκαετία του 1940 κοντά στο χωριό Hostim στην κεντρική Βοημία. Οι εργασίες διήρκησαν από το 1959 έως το 1965, ο χώρος δέχτηκε περίπου 400 m³ χαμηλού και μεσαίου επιπέδου ραδιενεργών αποβλήτων σε βάθος 30 m. Η ραδιενέργεια που μετρήθηκε το 2005 ήταν κάτω από το 0,1 TBq και ο χώρος έκλεισε οριστικά το 1997 (Rempe, 2007).

2.5.2 Richard, Τσεχοσλοβακία

Ο πρώτος χρησιμοποιούμενος χώρος διάθεσης ενεργών αποβλήτων στην Τσεχοσλοβακία λειτούργησε στην περιοχή Richard κοντά στην πόλη Litomerice στα βόρεια της Βοημίας σε πρώην λατομείο αδρανών και σε βάθος 70 m. Ο υπόγειος χώρος βρίσκεται σε ένα στρώμα ασβεστόλιθου πάχους 5 m το οποίο βρισκόταν έγκλειστο σε ένα στρώμα αδιαπέρατης μάργας πάχους 50 m. Η εξόρυξη του ασβεστόλιθου στο χώρο αυτό ξεκίνησε από τα μέσα του 19ου αιώνα. Στον κενό αυτό χώρο αποθηκεύτηκαν 25000 συσκευασίες αποβλήτων ενεργότητας 1015 Bq, καταλαμβάνοντας ωφέλιμο χώρο 2700 m³ ενώ απέμεναν 3800 m³ για μελλοντική χρήση (Rempe, 2007). Ο χώρος δέχεται ραδιενεργά απόβλητα τόσο από βιομηχανικές όσο και από ιατρικές, ερευνητικές και αγροτικές εφαρμογές και ο χρόνος λειτουργίας του ενδέχεται να συνεχιστεί μέχρι και το 2070 (Rempe, 2007).

2.5.3 Konrad, Γερμανία

Το ορυχείο σιδήρου της περιοχής που βρίσκεται στην Κάτω Σαξονία, έκλεισε λόγω οικονομικών λόγων το 1976. Και από την ίδια κιόλας χρονιά, άρχισε να διερευνάτε η πιθανότητα απόθεσης αποβλήτων λόγω του μεγάλου βάθους του ορίζοντα του κοιτάσματος, των συνθηκών απουσίας της υγρασίας στο χώρο και την ιδανική απομόνωση του χώρου από το υπόγειο νερό από τους υπερκείμενους αργιλικούς σχηματισμούς. Τα αποτελέσματα της έρευνας και των διαδικασιών έγκρισης οδηγήθηκαν σε μία θετική εξέλιξη το 1982. Ο χώρος θα αποτελείται από 6 πεδία απόθεσης σε διαφορετικά επίπεδα και σε βάθος μεταξύ 800 και 1.300 m με τη χωρητικότητα να φτάνει τα 650.000 m³. Ο χώρος είναι μία περίπτωση που κοινωνικοί παράγοντες δεν επέτρεψαν την πλήρη λειτουργία του. Παρά τους αρχικούς

σχεδιασμούς, ο χώρος το 2003 είχε την άδεια για 303.000 m³ με βάση την προσωρινή άδεια λειτουργίας. Αξίζει να σημειωθεί πως η λειτουργία του χώρου έχει σχεδιαστεί μέχρι το έτος 2080 (Rempe, 2007).

2.5.4 Bratrstvi, Τσεχοσλοβακία

Το 1974 η Τσεχοσλοβακία ξεκίνησε τη διάθεση αποβλήτων, τα οποία περιείχαν ραδιονουκλίδια από φυσικές πηγές, σε πέντε θαλάμους ενός εγκαταλελειμμένου υπόγειου ορυχείου ουρανίου κοντά στην πόλη Jachymov, στη βόρεια περιοχή της Βοημίας. Ο κενός χώρος του ορυχείου, που ήταν αρχικά διαθέσιμος, είχε χωρητικότητα της τάξης των 1.000 m³. Το 2001 η αναφερόμενη διάθεση αποβλήτων ανήλθε σε 700 μονάδες (Rempe, 2007) και η λειτουργία του εκτιμάται ότι θα συνεχιστεί μέχρι το 2030 (Rempe, 2007).

2.5.5 Morsleben, Γερμανία

Η ανατολική Γερμανία ξεκίνησε τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων χαμηλού και μέσου επιπέδου σε ένα πρώην ορυχείο εξόρυξης ποτάσας και άλατος στην περιοχή Morsleben το 1978. Η διάθεση αποβλήτων, η οποία διενεργείτο σε βάθος 500 m, διακόπηκε από το 1991 έως το 1994 προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια τεχνική επαναξιολόγηση με αφορμή την επανένωση της Γερμανίας, και έπαψε οριστικά το 1998. Ο υπόγειος χώρος περιέχει 36.752 m³ αποβλήτων και ένα σύνολο από 6621 πηγές ακτινοβολίας. Η β και γ ακτινοβολία έχουν μετρηθεί σε 3,8E14 Bq ενώ η α σε 2,3E11 Bq. Για την ενίσχυση του ορυχείου αποφασίστηκε η επανεπίχωση ορισμένων από τους κενούς θαλάμους (20000 m³) με ορυκτό άλας. Είχε υπολογιστεί ότι ένα σύνολο από 20 ακόμα θαλάμους θα γέμιζε με ένα ειδικό μίγμα τσιμέντου μέχρι το 2010 οπότε και αναμενόταν το οριστικό κλείσιμο του χώρου (Rempe,

2007).



Εικόνα 7. Morsleben, Germany

2.5.6 Forsmark, Σουηδία

Ο χώρος αποθήκευσης κοντά στην πόλη Forsmark στα νότια της Σουηδίας (ονομαζόμενος Swedish Final Repository, SFR) λειτουργεί από το 1988. Η εγκατάσταση αποτελείται από 4 οριζόντιους θαλάμους για την απόθεση χαμηλού επιπέδου αποβλήτων και έναν κάθετο για μέσου επιπέδου. Ο χώρος έχει εκσκαφθεί ειδικώς στο μεταμορφωμένο υπόστρωμα 50 m κάτω από τη Βαλτική θάλασσα. Η είσοδος παρέχεται από 2 κεκλιμένες σήραγγες από την κοντινή στεριά. Η συνολική χωρητικότητα της εγκατάστασης είναι 63.000 m³ και ο υπολογιζόμενος ετήσιος ρυθμός απόθεσης ανέρχεται περίπου στα 1.000 m³. Έχει υπολογιστεί ότι με εκσκαφή σε δεύτερη και τρίτη φάση μπορεί να προστεθεί μια

χωρητικότητα της τάξης των 30.000 και 100.000 m³ αντίστοιχα (Remppe, 2007).



Εικόνα 8 Forsmark, Σουηδία

2.5.7 Olkiluoto & Loviisa, Φινλανδία

Στη Φινλανδία λειτουργούν από τη δεκαετία του 1990 δύο υπόγειο χώροι διάθεσης αποβλήτων, όπου και οι δύο δέχονται απόβλητα χαμηλού και μεσαίου επιπέδου. Η εγκατάσταση στο Olkiluoto ξεκίνησε να λειτουργεί το 1992 και στη Loviisa το 1997. Και οι δύο εγκαταστάσεις βρίσκονται σε κρυσταλλικό υπόβαθρο, 70 -100 m βάθος. Η είσοδος τους αποτελείται από κεκλιμένες σήραγγες και κάθετα φρεάτια. Η προβλεπόμενη χωρητικότητα του Olkiluoto ανέρχεται περίπου σε 8.000 m³ ενώ στο Loviisa σε περίπου 4.000 m³ . Μέχρι το τέλος του 2004, το Olkiluoto είχε δεχθεί 4.140 και το Loviisa 1.234 (Remppe, 2007).

2.5.8 Zheleznogorsk, Ρωσία

Το 1967 ξεκίνησε η διοχέτευση ραδιενεργών αποβλήτων σε μια βαθιά γεώτρηση νότια του Kransnoyarsk. Δύο υδροφόροι ορίζοντες σε στρώματα άμμων, χαλίκων και ψαμμιτών χρησιμοποιήθηκαν για τη διοχέτευση με το αδιαπέρατο στρώμα της αργίλου να παίζει το ρόλο του φραγμού. Αξίζει να σημειωθεί πως ανεξάρτητοι ειδικοί συμπεριλαμβανομένων και δυτικών επιστημόνων, που ερεύνησαν το χώρο, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως αυτό το σύστημα διάθεσης δεν εγκυμονεί κινδύνους για την επιφάνεια. (Remppe, 2007)

2.5.9 Tomsk, Ρωσία

Δύο υδροφόροι ορίζοντες χρησιμοποιήθηκαν με τρεις γεωτρήσεις σε βάθη 349- 386m, 314-341m και 270-320m κάτω από την επιφάνεια της γης από το 1963.

2.5.10 Dimitrovgrad, Ρωσία

Σε αυτό το χώρο πραγματοποιήθηκαν οι βαθύτερες γεωτρήσεις σε δύο περιοχές σε βάθη της τάξης των 1.440 – 1.550m και 1.130-1.410m από το 1966.

2.5.11 Stripa, Σουηδία

Η μεταλλευτική δραστηριότητα στο ορυχείο Stripa, ξεκινάει από τον 15ο αιώνα και μετά από σποραδικές εκμεταλλεύσεις και μία παύση που διήρκησε περίπου έναν αιώνα, το 1976 κλείνει οριστικά με τη συνολική παράγωγή του να φτάνει τα 18 εκατομμύρια τόνους κοιτάσματος χαλαζιακού αιματίτη και οδηγώντας στη πλήρη εξόφλησή του. Μεταξύ των ετών 1977 και 1980, ένα κοινό ερευνητικό πρόγραμμα των χωρών Σουηδίας και Αμερικής, ξεκίνησε στο ορυχείο. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδωσαν εκτενής πληροφορίες για τους μηχανισμούς θερμικής αγωγιμότητας και τη ροή του υπόγειου νερού στη ρωγματομένη βραχομάζα. Το 1980 τη θέση του Σουηδο-αμερικάνικου προγράμματος, πήρε ένα διεθνή πρόγραμμα με τη συμμετοχή διαφόρων χωρών και υπό την αιγίδα της Διεθνούς Ατομικής Επιτροπής. Αυτό το πρόγραμμα διήρκησε μέχρι το 1991 και οι τομείς της έρευνας ήταν: ανίχνευση και χαρτογράφηση των ζωνών ρωγμάτωσης, συνθήκες του υπόγειου νερού και μετακίνηση των ραδιονουκλιδίων και εξέταση επανεπίχωσης με μίγμα μπεντονίτη. Η τρίτη και τελευταία φάση του προγράμματος προσανατολίστηκε στην υδρογεωλογία, την χημική κινητικότητα, τους τεχνητούς φραγμούς και τη γεωφυσική (Kaliampakos et al., 2006)

2.5.12 Bure, Γαλλία

Στη Γαλλία ερευνάται ένας αργιλικός σχηματισμός πάχους 130 m., σε βάθη μεταξύ 420 και 550 m στην περιοχή Bure στη Λωρραίνη, 45 km νότια του Bar-leDuc για τη δυνατότητα υποδοχής ραδιενεργών αποβλήτων υψηλού και μεσαίου επιπέδου. Ο υπόγειος πειραματικός χώρος αποτελείται από φρέατα και θαλάμους καθώς και ερευνητικές στοές. Η κατασκευή του χώρου ξεκίνησε το 2000 και οι πειραματικές εφαρμογές το 2004. Το νομικό πλαίσιο δεν επιτρέπει τη διάθεση αποβλήτων σε ερευνητικούς χώρους, ωστόσο εάν η εγκατάσταση πετύχει τους στόχους ένας ξεχωριστός χώρος θα κατασκευαστεί στην περιοχή για αυτό το σκοπό (Rempe, 2007).

2.5.13 Gorleben, Γερμανία

Για δύο δεκαετίες, ο δόμος ορυκτού άλατος στο Gorleben στα βόρεια της κεντρικής Γερμανίας είχε ερευνηθεί για τη δυνατότητα απόθεσης όλων των τύπων των ραδιενεργών αποβλήτων. Οι εργασίες περιλάμβαναν τη δημιουργία 2 φρεάτων και των εκσκαφή ερευνητικών στοών σε βάθος των 850 m περίπου από την επιφάνεια. Μέχρι τότε δεν υπήρξε κανένας λόγος ακύρωσης του σχεδιασμού, ωστόσο η ολοκλήρωση της εγκατάστασης είχε μείνει ανεκτέλεστη (Rempe, 2007).

2.5.14 Oskarshamn ,Σουηδία

Στη Σουηδία δύο περιοχές ερευνώνται για τη δυνατότητα υποδοχής ραδιενεργών αποβλήτων σε βάθη περίπου 500 m σε κρυσταλλικό υπόστρωμα. Τα συμπεράσματα των ερευνών από την πειραματική εγκατάσταση του Äspö Hard Rock Laboratory ήταν ο οδηγός των εξετάσεων των περιοχών. Ο σχεδιασμός της απόθεσης είναι παρόμοιος με αυτόν της Φιλανδίας και η λειτουργία της εγκατάστασης είχε προσδιοριστεί το 2020. Το σύνολο των δοχείων που έχει σχεδιαστεί να αποθηκευτούν στο χώρο είναι 4.500 και ανά έτος 200 (Rempe, 2007).

2.5.15 Yucca Mountain, Η.Π.Α

Η οροσειρά Yucca που βρίσκεται στα βόρεια του Las Vegas, στη Νεβάδα, αποτελείται από ηφαιστειακούς τόφφους. Ο χώρος είχε ήδη εξεταστεί από το 1978 για τη δυνατότητά του να δεχθεί ραδιενεργά απόβλητα, τόσο στρατιωτικών όσο και πολιτικών εφαρμογών. Η μοναδικότητα του χώρου παγκοσμίως έγκειται στο γεγονός πως η εγκατάσταση βρίσκεται 300 m πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα και για την αντιμετώπιση των πιθανών απορροών είχε προταθεί η εφαρμογή αντιδιαβρωτικών συσκευασιών από κράματα αλουμινίου και ασπίδες τιτανίου. Ξεκινώντας το έργο το 1993, περισσότερα από 8 km ερευνητικών στοών είχαν διανοιχθεί σε βάθος 300 m. Το αμερικάνικο Κογκρέσο περιόρισε τη δυναμικότητα αποθήκευσης του χώρου στους 70.000 tn, παρόλο που από τεχνικής άποψης η αποθηκευτική ικανότητα θα μπορούσε να είναι ιδιαίτερα μεγαλύτερη. Η λειτουργία του υπολογιζόταν για το 2020 όμως λόγω κοινωνικών και πολιτικών αντιδράσεων το 2011 σταμάτησε οριστικά η χρηματοδότηση του έργου και το 2019 έκλεισε οριστικά (Rempe, 2007).

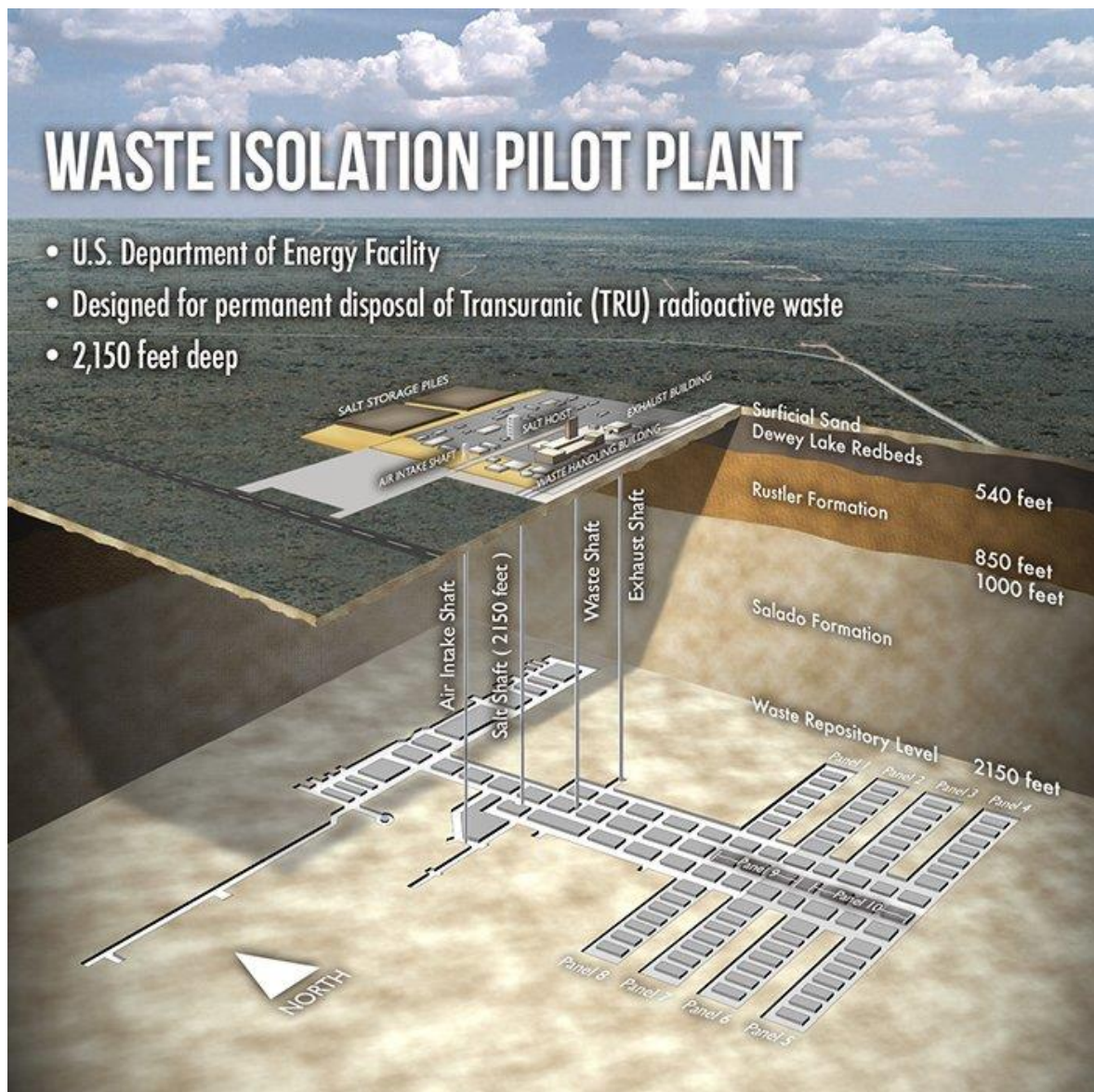
2.5.16 Asse, Γερμανία

Το πρώην ορυχείο άλατος Asse τοποθετημένο στο βορειο – κεντρικό τμήμα της Γερμανίας, αν και δεν αποτελεί έναν επίσημο (βάσει νομικών κριτηρίων) αποθηκευτικό χώρο ραδιενεργών αποβλήτων για πολιτικούς αλλά και ιστορικούς λόγους, συγκεντρώνει όλα τα τεχνικά κριτήρια ενός τέτοιου χώρου. Η εξόρυξη άλατος από τις αρχές του 20ου αιώνα άφησε πίσω τεράστιους υπόγειους θαλάμους μερικοί εκ των οποίων συμπληρώθηκαν κατά το διάστημα των ετών 1967 και 1978 με ραδιενεργά απόβλητα χαμηλού και μέσου επιπέδου. Συνολικά ο χώρος συγκεντρώνει περίπου 125.000 μονάδες χαμηλού επιπέδου αποβλήτων σε βάθη 725 m και 750 m, και περίπου 1.300 μονάδες μέσου επιπέδου αποβλήτων σε βάθος 511 m. Η μέγιστη χωρητικότητά του είναι της τάξης των 47.000 m³ με συνολική δυναμική 90.000 τόνων. Το 1995 ξεκίνησε σταδιακά μια προσπάθεια επανεπίχωσης των εναπομεινάντων ανοικτών θαλάμων με το ήδη εξορυχθέν άλας. Οι μετρήσεις κατά τη διάρκεια της διάθεσης ήταν της τάξης περίπου των 7,8E15 Bq ενώ η λειτουργία του χώρου είχε εκτιμηθεί μέχρι το 2013 (Rempe, 2007).

2.5.17 Waste Isolation Pilot Plant, Η.Π.Α

Το Waste Isolation Pilot Plant κοντά στο Carlsbad στο νοτιοανατολικό Νέο Μεξικό, ξεκίνησε τη λειτουργία του το 1999 με τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων μέσου επιπέδου, που περιείχαν ραδιονουκλίδια με μεγάλος ημίσειας ζωής. Το 60% των αποβλήτων έχει υποστεί ανάμειξη ραδιενεργών υλικών με άλλα επικίνδυνα τοξικά απόβλητα. Ο ορίζοντας του χώρου είναι στο μέσο ενός γιγαντιαίου σχηματισμού ορυκτού άλατος, 655m κάτω από την επιφάνεια της γης. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο χώρος κατασκευάστηκε και συνεχίζεται να κατασκευάζεται αποκλειστικά για διάθεση αποβλήτων. Η σχεδιαζόμενη χωρητικότητά του ανέρχεται στα 175.000m³ και το ισχύον θεσμικό πλαίσιο επιτρέπει τη διάθεση

ραδιενεργών υλικών προερχόμενα από τη στρατιωτική βιομηχανία (Rempe, 2007).

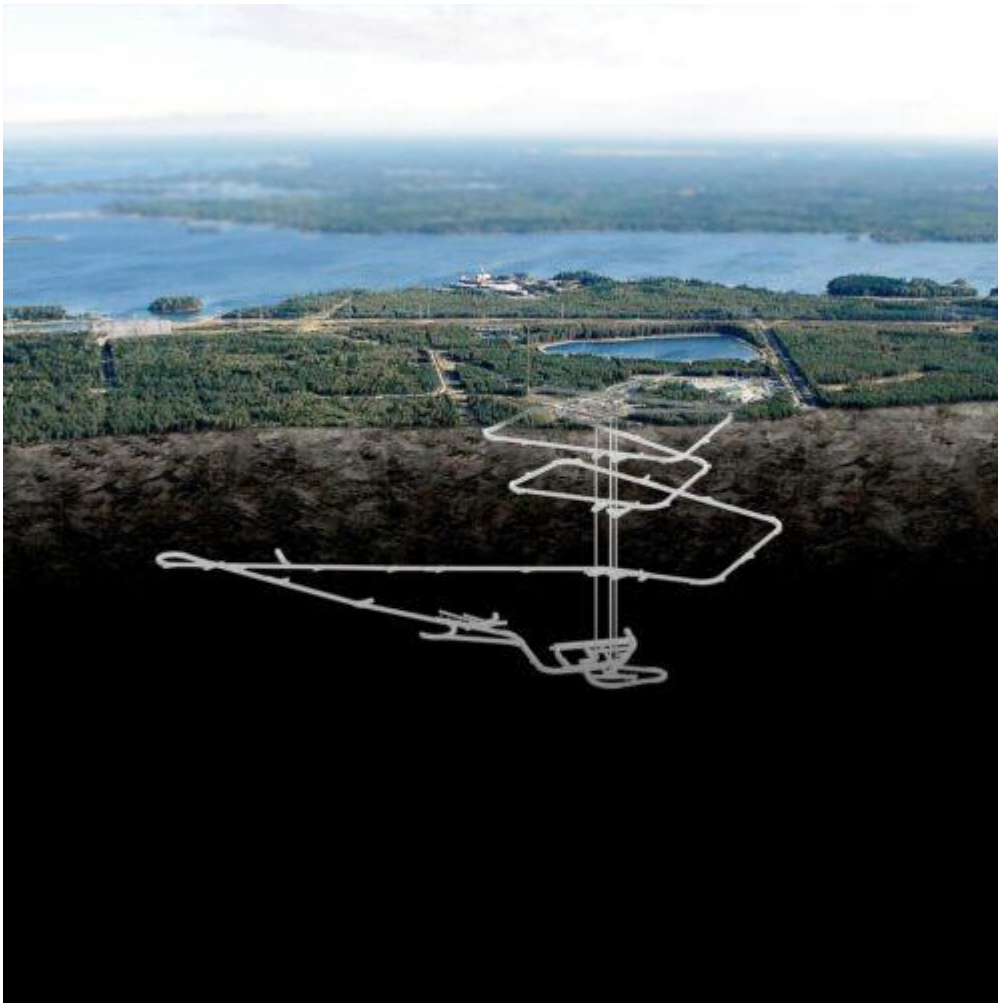


Εικόνα 9 Waste Isolation Pilot Plant, Η.Π.Α

2.5.17 Onkalo, Φινλανδία

Το αποθετήριο αναλωμένου πυρηνικού καυσίμου Onkalo είναι ένα βαθύ γεωλογικό αποθετήριο για την τελική διάθεση του αναλωμένου πυρηνικού καυσίμου. Βρίσκεται κοντά στο πυρηνικό εργοστάσιο Olkiluoto στο δήμο Eurajoki, στη δυτική ακτή της Φινλανδίας. Κατασκευάζεται από την Posiva και βασίζεται στη μέθοδο KBS-3 για την ταφή των πυρηνικών αποβλήτων που αναπτύχθηκε στη Σουηδία από την Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB). Ο σχεδιασμός της διάθεσης συμπεριελάμβανε τη χρησιμοποίηση σιδερένιων κυλίνδρων με περίβλημα χαλκού, και την τοποθέτηση αυτών σε τρύπες στο σχηματισμό από τους τοίχους μέσα από τα ανοίγματα των εκσκαφών. Τα

ανοίγματα θα σφραγίζονται με μίγμα μπεντονίτη. Η μονάδα αναμένεται να τεθεί σε λειτουργία το 2024.



Εικόνα 10 Onkalo, Φιλανδία

3. Κύριοι τύποι πετρωμάτων που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων

Η αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων σε γεωλογικούς σχηματισμούς είναι μια διαδικασία απομόνωσης και αποθήκευσης ραδιενεργών αποβλήτων σε φυσικούς γεωλογικούς σχηματισμούς βαθιά υπόγεια. Οι κύριοι τύποι πετρωμάτων που χρησιμοποιούνται για τη γεωλογική αποθήκευση είναι κρυσταλλικά πετρώματα, ιζηματογενή πετρώματα,

σχηματισμοί εβαποριτών και ηφαιστειακοί τόφοι. Κάθε ένας από αυτούς τους τύπους πετρωμάτων έχει μοναδικές ιδιότητες που τους καθιστούν κατάλληλους για αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων. (Tsang, 2005)

3.1 Κρυσταλλικά πετρώματα

Τα κρυσταλλικά πετρώματα είναι ένα είδος ηφαιστειακών ή μεταμορφωτικών πετρωμάτων τα οποία θεωρούνται κατάλληλα για γεωλογική αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων. Παραδείγματα κρυσταλλικών πετρωμάτων περιλαμβάνουν γρανίτη, γνεύσιο και βασάλτη. Αυτά τα πετρώματα έχουν χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα, η οποία τα καθιστά αδιαπέραστα και παρέχει ένα αποτελεσματικό φράγμα στην κίνηση των ραδιενεργών υλικών. Επιπλέον, τα κρυσταλλικά πετρώματα έχουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα, η οποία μπορεί να βοηθήσει στη διάχυση της θερμότητας που παράγεται από τα ραδιενεργά απόβλητα. Οι σχηματισμοί κρυσταλλικών πετρωμάτων έχουν διάφορες ιδιότητες που τους καθιστούν κατάλληλα για την αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων. Μία από τις πιο σημαντικές ιδιότητες είναι η χαμηλή διαπερατότητά τους, που σημαίνει ότι είναι συνήθως αδιαπέραστα από το νερό και τα αέρια. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στην πρόληψη της μετανάστευσης ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον, το οποίο είναι κρίσιμο για τη μακροπρόθεσμη ασφάλεια οποιασδήποτε εγκατάστασης αποθήκευσης ραδιενεργών αποβλήτων. Μια άλλη σημαντική ιδιότητα των σχηματισμών κρυσταλλικών πετρωμάτων είναι η υψηλή μηχανική αντοχή τους. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να αντέξουν υψηλά επίπεδα πίεσης, που μπορούν να βοηθήσουν στην αποτροπή της κατάρρευσης υπόγειων σπηλαίων ή θαλάμων αποθήκευσης. Τέλος, οι σχηματισμοί κρυσταλλικών πετρωμάτων έχουν επίσης σχετικά χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να απαιτούν πρόσθετα μέτρα για τη διασπορά της θερμότητας που παράγεται από τα ραδιενεργά απόβλητα. Οι σχηματισμοί κρυσταλλικών πετρωμάτων είναι πιο κατάλληλοι για την αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας, τα οποία παράγονται από πυρηνικούς σταθμούς ή άλλες πυρηνικές εγκαταστάσεις. Τα ραδιενεργά απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας συνήθως περιέχουν ισότοπα μακράς διάρκειας ζωής που μπορούν να παραμείνουν επικίνδυνα για χιλιάδες χρόνια, και ως τέτοια, απαιτούν μια λύση αποθήκευσης που μπορεί να παρέχει μακροπρόθεσμη απομόνωση από το περιβάλλον. Εκτός από την καταλληλότητά τους για ραδιενεργά απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας, οι σχηματισμοί κρυσταλλικών πετρωμάτων μπορεί επίσης να είναι κατάλληλοι για την αποθήκευση

άλλων τύπων ραδιενεργών αποβλήτων, όπως τα απόβλητα χαμηλής ραδιενέργειας ή τα υπερουράνια απόβλητα (Tsang, 2005).

Γρανίτης: Γρανίτης είναι ένα είδος πυριγενή πετρώματος που σχηματίζεται από την στερεοποίηση του μάγματος ή λάβας. Αποτελείται κυρίως από χαλαζία, άστρο και μαρμαρυγία. Ο γρανίτης είναι γνωστός για την υψηλή μηχανική αντοχή του και τη χαμηλή διαπερατότητα, γεγονός που τον καθιστά κατάλληλο βράχο για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων. Ο πυρηνικός σταθμός του Ολκιλούτο στη Φινλανδία βρίσκεται σε γρανιτικό βραχώδη σχηματισμό και σχεδιάζει να κατασκευάσει ένα βαθύ γεωλογικό αποθετήριο για αναλωμένα πυρηνικά καύσιμα στον ίδιο σχηματισμό. Το Σουηδικό Βαθύ Γεωλογικό Αποθετήριο, που βρίσκεται στο Oskarshamn, είναι επίσης χτισμένο σε γρανιτικό σχηματισμό. Εκτός από τη δύναμη και τη χαμηλή διαπερατότητα, ο γρανίτης είναι επίσης χημικά σταθερός, γεγονός που μειώνει τον κίνδυνο χημικών αντιδράσεων μεταξύ των αποβλήτων και του βράχου του ξενιστή. Ωστόσο, ο γρανίτης μπορεί να έχει κάποια κατάγματα ή σχισμές που θα μπορούσαν να επιτρέψουν στο νερό να διεισδύσει και ενδεχομένως να προκαλέσουν την έκλυση ραδιενεργών υλικών.

Γνεύσιος: Ο γνεύσιος είναι ένας τύπος μεταμορφωσιγενούς πετρώματος που σχηματίζεται από την ανακρυστάλλωση προϋπαρχόντων πετρωμάτων υπό υψηλή πίεση και θερμοκρασία. Αποτελείται από ορυκτά όπως χαλαζία, άστρο και μαρμαρυγία. Ο Γνεύσιος είναι γνωστός για την υψηλή μηχανική αντοχή του και τη χαμηλή διαπερατότητα, που το καθιστούν κατάλληλο βράχο ξενιστή για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων. Ο γνεύσιος έχει παρόμοια σύνθεση με τον γρανίτη, αλλά είναι συνήθως πιο έντονα φυλλωμένος, που σημαίνει ότι έχει μια εμφάνιση με ζώνες λόγω της ευθυγράμμισης των ορυκτών κατά τη μεταμορφωτική διαδικασία.

Σχιστόλιθος: Ο σχιστόλιθος είναι ένας άλλος τύπος μεταμορφωσιγενούς πετρώματος που σχηματίζεται από την ανακρυστάλλωση προϋπαρχόντων πετρωμάτων. Αποτελείται από ορυκτά όπως μαρμαρυγία, χαλαζία και άστρο. Ο σχιστόλιθος είναι γνωστός για την υψηλή

μηχανική αντοχή του και τη χαμηλή διαπερατότητά του, που τον καθιστούν κατάλληλο βράχο ξενιστή για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων. Το προτεινόμενο βαθύ γεωλογικό αποθετήριο για τα ραδιενεργά απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας στον Καναδά, που ονομάζεται Deep Geological Repository (DGR), πρόκειται να βρίσκεται σε σχηματισμό σχιστόλιθου. Ο αλμυρός θόλος του Γκορλέμπεν στη Γερμανία, ο οποίος αρχικά εθεωρείτο για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων, περιβάλλεται από στρώμα σχιστόλιθου. Ο σχιστόλιθος γενικά δεν είναι τόσο ισχυρός όσο ο γρανίτης ή ο γνεύσιος αλλά μπορεί να αποτελέσει ένα αποτελεσματικό εμπόδιο στη μετανάστευση ραδιενεργών υλικών λόγω της χαμηλής διαπερατότητάς του.

Διορίτης: Ο διορίτης είναι ένα είδος παρεμβατικού πυριγενή πετρώματα που αποτελείται κυρίως από πλαγιόκλαστους άστριους, κερροστίλβη και βιοτίτη. Το χρώμα του είναι συνήθως γκριζό ή μαύρο και έχει τραχιά υφή. Ο διορίτης είναι γνωστός για την υψηλή μηχανική αντοχή του και τη χαμηλή διαπερατότητά του, που τον καθιστούν κατάλληλο βράχο ξενιστή για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων. Τα ραδιενεργά απόβλητα του El Cabril στην Ισπανία βρίσκονται σε διείσδυση διορίτη. Ο πιθανός χώρος για ένα βαθύ γεωλογικό αποθετήριο ραδιενεργών αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας στη Νότια Αυστραλία, που ονομάζεται Εθνική Εγκατάσταση Διαχείρισης Ραδιενεργών Αποβλήτων, βρίσκεται σε ένα σχηματισμό διορίτη. Ο διορίτης δεν χρησιμοποιείται τόσο συχνά ως γρανίτης ή γνεύσιος, αλλά έχει ληφθεί υπόψη για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων σε ορισμένες χώρες.

Βασάλτης: Ο βασάλτης είναι ένας τύπος εξωθητικού ενδογενούς πετρώματος που αποτελείται κυρίως από πλαγιόκλαση και πυροξένιο. Το χρώμα του είναι συνήθως μαύρο ή σκούρο γκρι και έχει λεπτόκοκκη υφή. Η βασάλτη είναι επίσης γνωστή για την υψηλή μηχανική αντοχή της και τη χαμηλή διαπερατότητα, που την καθιστούν κατάλληλο βράχο ξενιστή για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων. Το αποθετήριο πυρηνικών αποβλήτων του όρους Γιούκα στη Νεβάδα των ΗΠΑ, είχε αρχικά προγραμματιστεί να βρίσκεται σε σχηματισμό βασάλτη, αλλά το έργο ακυρώθηκε το 2010. Οι σχηματισμοί βασάλτη δεν χρησιμοποιούνται τόσο συχνά ως γρανίτης ή γνεύσιος για την διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων, αλλά μπορούν να είναι κατάλληλοι σε ορισμένες περιπτώσεις.

3.2 Ιζηματογενή πετρώματα

Τα ιζηματογενή πετρώματα είναι λεπτόκοκκα πετρώματα που αποτελούνται από αργιλώδη ορυκτά και έχουν χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα, γεγονός που τα καθιστά ιδανικό υποψήφιο για τη γεωλογική αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων. Παραδείγματα αργιλωδών πετρωμάτων περιλαμβάνουν άργιλο, πηλίτες και μάργα. Η χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα αυτών των πετρωμάτων οφείλεται στο μικρό μέγεθος των πόρων μεταξύ των σωματιδίων αργίλου, το οποίο περιορίζει την κίνηση του νερού και άλλων υγρών. Αυτοί οι σχηματισμοί αποτελούνται από πετρώματα όπως ψαμμίτη, ασβεστόλιθο και σχιστόλιθο, τα οποία σχηματίστηκαν από την εναπόθεση ιζήματος σε στρώματα με την πάροδο του χρόνου. Οι ιζηματογενείς σχηματισμοί πετρωμάτων έχουν διάφορες ιδιότητες που τους καθιστούν κατάλληλα για την αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων. Μία από τις πιο σημαντικές ιδιότητες είναι η χαμηλή διαπερατότητά τους, που σημαίνει ότι είναι συνήθως αδιαπέραστα από το νερό και τα αέρια. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στην πρόληψη της μετανάστευσης ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον, το οποίο είναι ένα κρίσιμο μέλημα για τη μακροπρόθεσμη ασφάλεια οποιασδήποτε εγκατάστασης αποθήκευσης ραδιενεργών αποβλήτων. Μια άλλη σημαντική ιδιότητα των ιζηματογενών πετρωμάτων είναι η υψηλή μηχανική τους σταθερότητα. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να αντέξουν υψηλά επίπεδα πίεσης και πίεσης, που μπορούν να βοηθήσουν στην αποτροπή της κατάρρευσης τυχόν υπόγειων σιράγγων ή θαλάμων αποθήκευσης. Τέλος, οι σχηματισμοί ιζηματογενών πετρωμάτων έχουν επίσης σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα, που σημαίνει ότι μπορούν να είναι πιο κατάλληλοι από τους σχηματισμούς κρυσταλλικών πετρωμάτων για τη διάλυση της θερμότητας που παράγεται από τα ραδιενεργά απόβλητα. Οι σχηματισμοί ιζηματογενών πετρωμάτων είναι πιο κατάλληλοι για την αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων χαμηλής και μεσαίας ραδιενέργειας, τα οποία συνήθως έχουν μικρότερους χρόνους ημιζωής και χαμηλότερα επίπεδα ραδιενέργειας από τα απόβλητα υψηλής ραδιενέργειας. Τα απόβλητα χαμηλού και ενδιάμεσου επιπέδου παράγονται από πυρηνικούς σταθμούς, νοσοκομεία και ερευνητικές εγκαταστάσεις, και απαιτούν μια λύση αποθήκευσης που μπορεί να παρέχει ασφαλή και ασφαλή απομόνωση από το περιβάλλον για αρκετές εκατοντάδες χρόνια. Εκτός

από την καταλληλότητά τους για ραδιενεργά απόβλητα χαμηλού και ενδιάμεσου επιπέδου, οι σχηματισμοί ιζηματογενών πετρωμάτων μπορεί επίσης να είναι κατάλληλοι για την αποθήκευση αποβλήτων υψηλού επιπέδου, αν και περαιτέρω έρευνα θα ήταν απαραίτητη για να προσδιοριστεί η μακροπρόθεσμη σταθερότητα και ικανότητά τους να περιέχουν τα απόβλητα. Υπάρχουν αρκετοί ιζηματογενείς σχηματισμοί πετρωμάτων που αξιολογούνται αυτήν τη στιγμή ως πιθανοί χώροι για τη γεωλογική αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων (Bourg, 2015).

3.2.1 Opalinus Clay

Το δυναμικό ενσωμάτωσης του Opalinus Clay καθορίζεται από τις φυσικές και χημικές του ιδιότητες. Ως εκ τούτου, το κύριο συμφέρον είναι η μη διαπερατότητα, η ικανότητα για αυτοσφράγιση και η συμπεριφορά διάχυσης των ραδιονουκλεϊδίων. Αν η υγρασία διεισδύει σε ανοικτές ρωγμές, το Opalinus Clay φουσκώνει, προκαλώντας ανοιχτές σχισμές, όπως αυτές που συμβαίνουν κατά την κατασκευή των σηράγγων, για να κλείσει. Αυτή η ικανότητα αυτοσφράγισης μειώνει τη διαπερατότητα των ρωγμών και ο βράχος μπορεί να ανακτήσει τα επίπεδα που βρέθηκαν στην προηγούμεως ανενόχλητη κατάσταση. Αυτοί οι συσχετισμοί διερευνώνται σε διάφορα πειράματα. Η συμπεριφορά διάχυσης των ραδιονουκλεϊδίων και το δυναμικό κατακράτησης του Opalinus Clay ερευνούνται στο πείραμα DR (διάχυση/κατακράτηση), για παράδειγμα. Σε μια μικρή γεώτρηση, ένα απομονωμένο τμήμα είναι κορεσμένο με νερό και εγχέεται με ειδική ποσότητα υλικού ιχνηθέτη (π.χ. τρίτιο). Μετά από αναμονή περισσότερο από έναν χρόνο, η μικρή τρύπα έχει βαρεθεί. Οι μετρήσεις του νέου και του μεγαλύτερου πυρήνα επιβεβαιώνουν πόσο έχει εισχωρήσει ο ιχνηλάτης στον βράχο (βλ. φωτογραφία παρακάτω). Κατά τη διεργασία, τα μη κολλητικά ραδιονουκλίδια (π.χ. τρίτιο) εξαπλώνονται ταχύτερα από τα πολύ «κολλώδη» ραδιονουκλίδια (π.χ. καίσιο, κοβάλτιο) που θα υπάρχουν σε εγκαταστάσεις βαθιάς αποθήκευσης ραδιενεργών αποβλήτων. Η διάχυση των ραδιονουκλεϊδίων που έχουν δοκιμαστεί μέχρι σήμερα σε αυτά τα πειράματα σε Opalinus Clay είναι πολύ χαμηλότερη από το εγκεκριμένο όριο (Marschall, 2005).

3.3 Σχηματισμοί εβαποριτών

Οι σχηματισμοί των εβαποριτών είναι ιζηματογενή πετρώματα που σχηματίζονται από την εξάτμιση θαλασσινού νερού ή άλλων αλατούχων διαλυμάτων. Παραδείγματα σχηματισμών

εβαπορίτων περιλαμβάνουν το αλάτι και τον γύψο. Αυτοί οι σχηματισμοί έχουν αναγνωριστεί ως πιθανοί χώροι για τη μακροπρόθεσμη αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων υψηλής ραδιενέργειας (HLW) λόγω της χαμηλής διαπερατότητάς τους, της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας και της ικανότητάς τους να παρέχουν ένα αποτελεσματικό φράγμα κατά της διήθησης του νερού. Η χρήση σχηματισμών άλατος για την διάθεση HLW είναι μια ελκυστική επιλογή, επειδή επιτρέπει την ασφαλή αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων για μεγάλο χρονικό διάστημα, μειώνοντας τον κίνδυνο έκθεσης στον άνθρωπο και το περιβάλλον. Οι σχηματισμοί άλατος αποτελούνται κυρίως από αλίτη, ένα ορυκτό άλας που σχηματίζεται μέσω της εξάτμισης του αλμυρού νερού. Ο αλίτης είναι ένα μαλακό, διαλυτό ορυκτό που μπορεί εύκολα να εκσκαφεί και να διαμορφωθεί, καθιστώντας το ένα δημοφιλές υλικό για την οικοδόμηση και την κατασκευή. Σχηματισμοί αλατιού μπορούν να βρεθούν σε όλο τον κόσμο και ποικίλλουν σε μέγεθος, σχήμα και ηλικία. Οι μεγαλύτεροι σχηματισμοί αλατιού είναι γνωστοί ως αλατούχοι θόλοι και μπορούν να μετρήσουν εκατοντάδες μέτρα σε ύψος και χιλιόμετρα σε διάμετρο. Άλλοι σχηματισμοί αλατιού περιλαμβάνουν τα στρώματα αλατιού (salt beds). Οι σχηματισμοί αλάτων βρίσκονται γενικά σε ιζηματογενείς λεκάνες, όπου σχηματίστηκαν για εκατομμύρια χρόνια μέσω της συσσώρευσης αλατωδών ιζημάτων. Αυτά τα ιζήματα στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε έντονη πίεση και θερμότητα, προκαλώντας ροή και παραμόρφωση του άλατος, με αποτέλεσμα το σχηματισμό αλατούχων δομών. Οι σχηματισμοί αλάτων συχνά συνδέονται με κοιτάσματα πετρελαίου, καθώς μπορούν να λειτουργήσουν ως παγίδα για τους υδρογονάνθρακες. Οι σχηματισμοί άλατος έχουν μια σειρά από μοναδικές ιδιότητες που τους καθιστούν κατάλληλους για την αποθήκευση του HLW. (Borojević Šostarić, 2012)

Σε αυτά περιλαμβάνονται:

- Χαμηλή διαπερατότητα: Οι σχηματισμοί άλατος έχουν χαμηλή διαπερατότητα, που σημαίνει ότι είναι πολύ ανθεκτικοί στη ροή υγρών, όπως το νερό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ο αλίτης είναι ένα μη πορώδες ορυκτό και οι διάμεσοι χώροι μεταξύ των κρυστάλλων άλατος γεμίζονται με άλμη. Αυτό καθιστά τους σχηματισμούς άλατος ένα αποτελεσματικό φράγμα ενάντια στη διήθηση του νερού, το οποίο είναι σημαντικό για τη μακροπρόθεσμη αποθήκευση του HLW.
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα: Οι σχηματισμοί άλατος έχουν υψηλή θερμική αγωγιμότητα, που σημαίνει ότι είναι σε θέση να διεξάγουν τη θερμότητα

αποτελεσματικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το αλάτι είναι ένας καλός αγωγός θερμότητας και οι πόροι που περιέχουν άλμη δρουν ως μέσο μεταφοράς θερμότητας. Αυτή η ιδιότητα είναι σημαντική για την ασφαλή διάθεση της HLW, καθώς επιτρέπει τη διασπορά της θερμότητας που παράγεται από τα απόβλητα.

- Πλαστική παραμόρφωση: Οι σχηματισμοί άλατος είναι ικανοί για πλαστική παραμόρφωση, που σημαίνει ότι είναι σε θέση να ρέουν και να παραμορφώνονται υπό πίεση. Αυτή η ιδιότητα είναι σημαντική για την ασφαλή αποθήκευση του HLW, καθώς επιτρέπει στο αλάτι να φιλοξενήσει το βάρος του υπερκείμενου βράχου και να σφραγίσει τα απόβλητα στη θέση τους.
- Αυτοσφράγιση: Οι σχηματισμοί άλατος είναι ικανοί να αυτοσφράγισουν, που σημαίνει ότι έχουν την ικανότητα να κλείνουν κατάγματα και κοιλότητες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το αλάτι είναι ένα πλαστικό υλικό, και μπορεί να ρέει και να γεμίσει κενά που δημιουργούνται από την εξόρυξη ή γεωτρήσεις δραστηριότητες. Αυτή η ιδιότητα είναι σημαντική για τη μακροπρόθεσμη σταθερότητα των χώρων αποθήκευσης HLW, καθώς εμποδίζει τη μετανάστευση των αποβλήτων μέσω ρωγμών και άλλων οδών.

Υπάρχουν αρκετοί σχηματισμοί άλατος που αξιολογούνται αυτήν τη στιγμή ως πιθανοί τόποι για τη γεωλογική αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων. Η Πιλοτική Εγκατάσταση Απομόνωσης Αποβλήτων (WIPP) στο Νέο Μεξικό είναι ένα αλατωρυχείο που χρησιμοποιείται σήμερα για την αποθήκευση υπερουράνιων αποβλήτων που παράγονται από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ. Ο αλατοθόλος του Gorleben στη Γερμανία έχει επίσης θεωρηθεί ως δυνητικός χώρος αποθήκευσης ραδιενεργών αποβλήτων.

4. Επιλογή κατάλληλου γεωλογικού περιβάλλοντος

Η επιλογή ενός γεωλογικού περιβάλλοντος για την υπόγεια διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων περιλαμβάνει μια πολύπλοκη διεργασία που λαμβάνει υπόψη ένα φάσμα γεωλογικών, υδρογεωλογικών, γεωχημικών και γεωτεχνικών παραγόντων. Τα ακόλουθα είναι μερικά από τα βασικά ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή του κατάλληλου γεωλογικού περιβάλλοντος για την υπόγεια διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων:

- **Γεωλογική σταθερότητα:** Η τοποθεσία πρέπει να βρίσκεται σε σταθερό γεωλογικό περιβάλλον, χωρίς ενεργά ρήγματα, σεισμική δραστηριότητα ή ηφαιστειακή δραστηριότητα. Ο σχηματισμός πετρωμάτων θα πρέπει να είναι ομοιογενής και απαλλαγμένος από κατάγματα που θα μπορούσαν να επιτρέψουν τη μετανάστευση ραδιονουκλεϊδίων.
- **Υδρογεωλογικές ιδιότητες:** Η τοποθεσία πρέπει να έχει ένα στρώμα χαμηλής διαπερατότητας πάνω από την περιοχή διάθεσης των αποβλήτων, για να αποτρέψει την ανοδική μετανάστευση ραδιονουκλεϊδίων. Ο σχηματισμός πετρωμάτων πρέπει επίσης να είναι υδρογεωλογικά σταθερός, χωρίς σημαντική κίνηση των υδάτων, όπως υπόγεια ρεύματα ή κανάλια.
- **Γεωχημικές συνθήκες:** Ο χώρος πρέπει να έχει γεωχημικό περιβάλλον κατάλληλο για την ασφαλή συγκράτηση ραδιενεργών αποβλήτων. Αυτό περιλαμβάνει ένα χαμηλό ποσοστό διάλυσης πετρωμάτων, μια χαμηλή συγκέντρωση των διαλυμένων ορυκτών, και μια απουσία οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων που θα μπορούσαν να προκαλέσουν την κινητοποίηση των ραδιονουκλεϊδίων.
- **Γεωτεχνικές ιδιότητες:** Ο σχηματισμός πετρωμάτων πρέπει να έχει επαρκή αντοχή για να υποστηρίζει το βάρος των δοχείων αποβλήτων και να αντιστέκεται σε κάθε πιθανή κίνηση του εδάφους ή σεισμική δραστηριότητα. Πρέπει επίσης να μπορεί να ανασκαφεί χωρίς να προκαλεί σημαντική αστάθεια ή καθίζηση.
- **Προσβασιμότητα:** Ο χώρος πρέπει να είναι προσβάσιμος για τη μεταφορά των απορριφθέντων δοχείων από και προς τον χώρο. Αυτό περιλαμβάνει τη διαθεσιμότητα μεταφορικών υποδομών, όπως οι οδικές και σιδηροδρομικές συνδέσεις.

- **Περιβαλλοντικοί και Κοινωνικοί Παράγοντες:** Η τοποθεσία πρέπει να βρίσκεται σε μια περιοχή με χαμηλή πυκνότητα πληθυσμού και περιορισμένη περιβαλλοντική ευαισθησία. Πρέπει επίσης να βρίσκεται σε μια περιοχή με σταθερό πολιτικό και κοινωνικό περιβάλλον που υποστηρίζει το έργο.

Μόλις ένας χώρος χαρακτηριστεί ως δυνητικά κατάλληλος για υπόγεια διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων, πρέπει να υποβληθεί σε αυστηρή διαδικασία χαρακτηρισμού του χώρου για να αξιολογηθεί λεπτομερέστερα η καταλληλότητά του. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τη διάνοιξη γεωτρήσεων για τη συλλογή γεωλογικών, υδρογεωλογικών, γεωχημικών και γεωτεχνικών δεδομένων. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για την κατανόηση των χαρακτηριστικών του χώρου και για τον εντοπισμό ενδεχόμενων κινδύνων ή αβεβαιοτήτων που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ασφάλεια των εργασιών διάθεσης. Συνολικά, η επιλογή ενός γεωλογικού περιβάλλοντος για την υπόγεια διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων απαιτεί προσεκτική και ολοκληρωμένη αξιολόγηση διαφόρων παραγόντων. Απώτερος στόχος είναι ο προσδιορισμός ενός χώρου που θα είναι σε θέση να παρέχει ασφαλή και μακροπρόθεσμη συγκράτηση των ραδιενεργών αποβλήτων, με ελάχιστες επιπτώσεις στο περιβάλλον και τη γύρω κοινότητα. (Miller, 2000)

4.1 Γεωλογική σταθερότητα

Η γεωλογική σταθερότητα είναι ένας κρίσιμος παράγοντας κατά την επιλογή ενός γεωλογικού περιβάλλοντος για την υπόγεια διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων. Αυτό σημαίνει ότι η επιλεγμένη περιοχή πρέπει να έχει σταθερή γεωλογική δομή που να μπορεί να αντέχει σε καταπονήσεις και πιέσεις για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η περιοχή θα πρέπει επίσης να είναι απαλλαγμένη από φυσικές καταστροφές όπως σεισμούς, ηφαιστειακές εκρήξεις και κατολισθήσεις, που θα μπορούσαν να προκαλέσουν έκλυση ραδιενεργού υλικού. Για να εξασφαλιστεί η γεωλογική σταθερότητα, η γεωλογία του χώρου πρέπει να διερευνηθεί διεξοδικά ώστε να εντοπιστούν τυχόν πιθανοί γεωλογικοί κίνδυνοι ή ασταθείς δομές. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση γεωφυσικών ερευνών, γεωλογικής χαρτογράφησης και γεωτρήσεων για την εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων και της σταθερότητας του βράχου. Η υπολογιστική μοντελοποίηση και προσομοιώσεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν τη συμπεριφορά του βράχου με την πάροδο του χρόνου και υπό διαφορετικές συνθήκες. Είναι επίσης σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η μακροπρόθεσμη σταθερότητα του τόπου. Αυτό σημαίνει ότι ο χώρος πρέπει να είναι σε θέση να διατηρήσει τη γεωλογική του σταθερότητα για δεκάδες χιλιάδες χρόνια, που είναι

το χρονικό διάστημα κατά το οποίο τα ραδιενεργά απόβλητα θα παραμείνουν επικίνδυνα. Ως αποτέλεσμα, η περιοχή πρέπει να είναι σε θέση να αντέξει τις περιβαλλοντικές αλλαγές όπως η διάβρωση, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας και οι αλλαγές στη θερμοκρασία και την πίεση για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Εν ολίγοις, η γεωλογική σταθερότητα είναι ζωτικής σημασίας κατά την επιλογή ενός γεωλογικού περιβάλλοντος για την υπόγεια διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων. Εξασφαλίζει ότι τα απόβλητα θα αποθηκεύονται με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα για το απαιτούμενο χρονικό διάστημα, χωρίς να θέτουν σε κίνδυνο το περιβάλλον ή την ανθρώπινη υγεία (Miller, 2000).

4.2 Υδρογεωλογικός παράγοντας

Ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας για την επιλογή ενός γεωλογικού περιβάλλοντος για την υπόγεια διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων είναι οι υδρογεωλογικές ιδιότητες του χώρου. Αυτό αναφέρεται στην κίνηση και τη ροή του νερού μέσω των στρωμάτων πετρωμάτων και του εδάφους πάνω και κάτω από το αποθετήριο αποβλήτων. Οι υδρογεωλογικές ιδιότητες του χώρου είναι απαραίτητες επειδή καθορίζουν τον τρόπο ροής του νερού και αλληλεπιδρούν με τα ραδιενεργά απόβλητα. Αν το νερό ρέει μέσα από τα απόβλητα, μπορεί να μεταφέρει ραδιενεργούς ρύπους στο περιβάλλον, οδηγώντας σε μόλυνση των υπόγειων υδάτων, των επιφανειακών υδάτων και του εδάφους. Για να εξασφαλιστεί ότι οι υδρογεωλογικές ιδιότητες του χώρου είναι κατάλληλες για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων, πρέπει να διερευνηθούν διεξοδικά οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες του χώρου. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση γεωφυσικών ερευνών, γεωλογική χαρτογράφηση και γεωτρήσεις για την εκτίμηση των υδρολογικών ιδιοτήτων των στρωμάτων πετρωμάτων και του εδάφους. Μοντέλα υπολογιστών και προσομοιώσεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να προβλέψουν τη ροή του νερού μέσα από τα στρώματα πετρωμάτων και να αξιολογήσουν τη μεταφορά ραδιενεργού υλικού υπό διαφορετικές υδρολογικές συνθήκες. Ο χώρος πρέπει επίσης να διαθέτει υδρογεωλογικό φράγμα, το οποίο να λειτουργεί ως φυσικό εμπόδιο για την πρόληψη της μετανάστευσης ραδιενεργών υλικών από τον χώρο εναπόθεσης αποβλήτων. Αυτό το φράγμα μπορεί να σχηματιστεί από βραχώδεις σχηματισμούς χαμηλής διαπερατότητας, όπως μεγάλα ιζηματογενή πετρώματα ή παχιά στρώματα αργίλου, που εμποδίζουν τη ροή του νερού και έτσι τη μετανάστευση ραδιενεργού υλικού. Εν ολίγοις, οι υδρογεωλογικές ιδιότητες του χώρου είναι κρίσιμες κατά την επιλογή ενός γεωλογικού περιβάλλοντος για υπόγεια διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων. Η ενδελεχής διερεύνηση των υδρογεωλογικών συνθηκών του

χώρου, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης ηλεκτρονικών μοντέλων και προσομοιώσεων, είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ασφαλούς και αποτελεσματικής αποθήκευσης ραδιενεργών αποβλήτων. Επιπλέον, απαιτείται ένα υδρολογικό φράγμα για την πρόληψη της μετανάστευσης ραδιενεργών υλικών από το αποθετήριο αποβλήτων στο περιβάλλον (Tsang, 2015).

4.3 Γεωχημικές συνθήκες

Οι γεωχημικές συνθήκες είναι ένας ακόμη βασικός παράγοντας για την επιλογή ενός γεωλογικού περιβάλλοντος για την υπόγεια διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων. Το γεωχημικό περιβάλλον της περιοχής αναφέρεται στις χημικές και φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων και των εδαφών, συμπεριλαμβανομένης της ορυκτολογίας, του πορώδους και της διαπερατότητάς τους. Οι γεωχημικές συνθήκες του χώρου πρέπει να είναι κατάλληλες για τη μακροπρόθεσμη αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων. Τα απόβλητα πρέπει να αποθηκεύονται σε σταθερό και αδρανές χημικά περιβάλλον, αποτρέποντας τη μετανάστευση ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον. Για να εξασφαλιστεί ότι οι γεωχημικές συνθήκες του χώρου είναι κατάλληλες για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων, πρέπει να αξιολογείται η χημική σύσταση και σταθερότητα των πετρωμάτων και του εδάφους. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω εργαστηριακών πειραμάτων και επιτόπιων ερευνών. Μια κρίσιμη πτυχή των γεωχημικών συνθηκών είναι η δυνατότητα σχηματισμού ραδιενεργών διασπασμένων προϊόντων και η κινητοποίηση ραδιενεργών στοιχείων. Με την πάροδο του χρόνου, μερικά ραδιενεργά ισότοπα θα διασπαστούν και θα σχηματίσουν νέα στοιχεία. Αυτά τα στοιχεία μπορεί να έχουν διαφορετικές χημικές ιδιότητες και μπορεί να είναι πιο ευκίνητα από τα αρχικά ραδιενεργά ισότοπα. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά των προϊόντων διάσπασης και την αλληλεπίδρασή τους με το πέτρωμα και τη μήτρα του εδάφους. Το γεωχημικό περιβάλλον της περιοχής θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε τα προϊόντα διάσπασης να είναι ακινητοποιημένα και να μην θέτουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία ή το περιβάλλον. Συνοπτικά, οι γεωχημικές συνθήκες αποτελούν ουσιαστικό παράγοντα για την επιλογή ενός γεωλογικού περιβάλλοντος για την υπόγεια διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων. Η χημική σύσταση και η σταθερότητα των πετρωμάτων και των εδαφών πρέπει να αξιολογούνται ώστε να εξασφαλίζεται ότι τα απόβλητα μπορούν να αποθηκευθούν με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα μακροπρόθεσμα. Πρέπει επίσης να εξεταστεί η δυνατότητα σχηματισμού ραδιενεργών

διασπασμένων προϊόντων και η κινητοποίηση ραδιενεργών στοιχείων για την πρόληψη της μετανάστευσης ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον (Brookins, 2012).

4.4 Γεωτεχνικές ιδιότητες

Οι γεωτεχνικές ιδιότητες αναφέρονται στις μηχανικές ιδιότητες του βράχου ξενιστή, οι οποίες καθορίζουν την καταλληλότητα του για την κατασκευή και λειτουργία ενός αποθετηρίου ραδιενεργών αποβλήτων. Αυτές οι ιδιότητες περιλαμβάνουν την αντοχή, τη παραμόρφωση, τη διαπερατότητα, και τη θερμική αγωγιμότητα. Η αντοχή αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τον προσδιορισμό της καταλληλότητας ενός γεωλογικού περιβάλλοντος για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων. Ο βράχος πρέπει να μπορεί να υποστηρίξει το βάρος των υπερκείμενων υλικών και να αντισταθεί στις παραμορφώσεις που προκαλούνται από τις πιέσεις στον φλοιό της γης. Η αντοχή του βράχου ξενιστή μετράται συνήθως με εργαστηριακές δοκιμές σε δείγματα πυρήνα που λαμβάνονται από τον χώρο. Η παραμόρφωση είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας, καθώς ο βράχος θα πρέπει να είναι σε θέση να διατηρήσει το σχήμα και την ακεραιότητά του για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η ιδιότητα αυτή είναι σημαντική για να εξασφαλιστεί ότι το αποθετήριο θα παραμείνει σταθερό και ότι τα απόβλητα θα παραμείνουν απομονωμένα από το περιβάλλον. Η παραμόρφωση μπορεί να μετρηθεί με εργαστηριακές δοκιμές σε δείγματα πυρήνα ή με επιτόπιες μετρήσεις με τη χρήση οργάνων. Διαπερατότητα είναι η ικανότητα του πετρώματος να επιτρέπει στα υγρά να ρέουν μέσα από αυτό. Στην περίπτωση ενός αποθετηρίου ραδιενεργών αποβλήτων, είναι σημαντικό να περιορίζεται η ροή του νερού και άλλων υγρών μέσα και έξω από το αποθετήριο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την επιλογή ενός τύπου πετρώματος με χαμηλή διαπερατότητα ή με την εγκατάσταση μηχανικών φραγμών για τον περιορισμό της ροής υγρών. Η θερμική αγωγιμότητα είναι η ικανότητα του πετρώματος να διευθύνει τη θερμότητα. Η ιδιότητα αυτή είναι σημαντική για να εξασφαλιστεί ότι τα απόβλητα δεν υπερθερμαίνονται και ότι το αποθετήριο παραμένει σταθερό με την πάροδο του χρόνου. Τύποι πετρωμάτων με υψηλή θερμική αγωγιμότητα μπορούν να βοηθήσουν στη διασπορά θερμότητας από τα απόβλητα, ενώ εκείνοι με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα μπορεί να απαιτούν πρόσθετα συστήματα ψύξης για να διατηρήσουν μια ασφαλή θερμοκρασία. Συνολικά, οι γεωτεχνικές ιδιότητες αποτελούν σημαντικό στοιχείο κατά την επιλογή ενός γεωλογικού περιβάλλοντος για την υπόγεια διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων. Ένας κατάλληλος βράχος ξενιστή πρέπει να είναι σε θέση να αντέξει τις πιέσεις της κατασκευής και της λειτουργίας, να διατηρήσει το σχήμα και την

ακεραιότητά του διαχρονικά, να περιορίσει τη ροή υγρών και να διαχέει θερμότητα από τα απόβλητα (Daniel, 2012).

4.5 Προσβασιμότητα

Η προσβασιμότητα είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή ενός γεωλογικού περιβάλλοντος για την υπόγεια διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων. Ο χώρος θα πρέπει να είναι εύκολα προσβάσιμος για τη μεταφορά των αποβλήτων στον χώρο, καθώς και για τις συνεχιζόμενες δραστηριότητες παρακολούθησης και συντήρησης. Παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την αξιολόγηση της προσβασιμότητας μιας τοποθεσίας είναι η εγγύτητα των διαδρομών μεταφοράς, το έδαφος της τοποθεσίας και η διαθεσιμότητα υποδομών όπως δρόμοι και επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας. Θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη η θέση του τόπου σε σχέση με τα πληθυσμιακά κέντρα και άλλες ευαίσθητες περιοχές. Οι χώροι θα πρέπει να βρίσκονται μακριά από περιοχές με σημαντική πυκνότητα πληθυσμού, φυσικούς πόρους ή τοποθεσίες πολιτιστικής κληρονομιάς που θα μπορούσαν να επηρεαστούν από πιθανά ατυχήματα ή εκλύσεις ακτινοβολίας. Επιπλέον, σε περίπτωση επεισοδίου, η πρόσβαση στον χώρο θα πρέπει να είναι εύκολη για την αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης και την ενημέρωση του κοινού. Είναι επίσης σημαντικό να εξεταστεί η κοινωνική και πολιτική αποδοχή της ιστοσελίδας. Η δημόσια αποδοχή και υποστήριξη είναι κρίσιμης σημασίας για την επιτυχία ενός σχεδίου διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων και η έλλειψη αποδοχής μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές καθυστερήσεις ή ακόμη και σε ακυρώσεις. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να υπάρχει έγκαιρη συμμετοχή του κοινού και των ενδιαφερόμενων μερών στη διαδικασία επιλογής των τοποθεσιών και να αντιμετωπιστούν οι ανησυχίες και τα ερωτήματά τους καθ' όλη τη διάρκεια του έργου.

4.6 Περιβαλλοντικοί και κοινωνικοί παράγοντες

Οι περιβαλλοντικοί και κοινωνικοί παράγοντες είναι σημαντικοί παράγοντες στην επιλογή ενός γεωλογικού περιβάλλοντος για την υπόγεια διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων. Οι παράγοντες αυτοί περιλαμβάνουν τις πιθανές επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον, όπως η ποιότητα των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, και τις πιθανές επιπτώσεις στις τοπικές

κοινότητες και τους αυτόχθονες λαούς. Η διαδικασία επιλογής θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τους περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η σεισμική δραστηριότητα, η διάβρωση και η παρουσία ενεργών βλαβών που μπορεί να επηρεάσουν τη σταθερότητα του γεωλογικού περιβάλλοντος. Θα πρέπει να αποφεύγονται τοποθεσίες που είναι επιρρεπείς σε πλημμύρες, κατολισθήσεις ή άλλους φυσικούς κινδύνους, καθώς θα μπορούσαν ενδεχομένως να θέσουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα του συστήματος διάθεσης και να οδηγήσουν στην έκλυση ραδιενεργών υλικών. Επιπλέον, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κοινωνικοί παράγοντες, όπως οι απόψεις και οι ανησυχίες των τοπικών κοινοτήτων, καθώς και οι πολιτιστικές και παραδοσιακές γνώσεις. Είναι σημαντικό να υπάρξει επαφή με τις κοινότητες και τους αυτόχθονες πληθυσμούς από τα πρώτα στάδια του προγράμματος και να αντιμετωπιστούν οι όποιες ανησυχίες έχουν σχετικά με τις πιθανές επιπτώσεις του προγράμματος στα προς το ζην, την υγεία ή την πολιτιστική τους κληρονομιά. Άλλοι κοινωνικοί παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν περιλαμβάνουν το ενδεχόμενο συγκρούσεων για τη χρήση γης, τη διαθεσιμότητα πόρων όπως το νερό και τις οικονομικές επιπτώσεις του έργου στην τοπική κοινότητα. Είναι σημαντικό να υπάρχει μια διαφανής και περιεκτική συνεργασία με τους ενδιαφερόμενους φορείς και το κοινό για την οικοδόμηση εμπιστοσύνης και την προώθηση της αίσθησης της ιδιοκτησίας επί του έργου. Τέλος, η επιλογή ενός γεωλογικού περιβάλλοντος για την υπόγεια διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων απαιτεί μια πολυτομεακή προσέγγιση που εξετάζει ένα ευρύ φάσμα τεχνικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραγόντων. Αξιολογώντας προσεκτικά αυτούς τους παράγοντες, είναι δυνατόν να εντοπιστούν χώροι που είναι τεχνικά κατάλληλοι και κοινωνικά αποδεκτοί, και να εξασφαλιστεί η ασφαλής και υπεύθυνη διάθεση των ραδιενεργών αποβλήτων για τις επόμενες γενιές (Sundqvist, 2002).

5. Σχεδιασμός διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων σε δόμους ορυκτού άλατος

5.1 Μέθοδοι εκσκαφής και διάθεσης

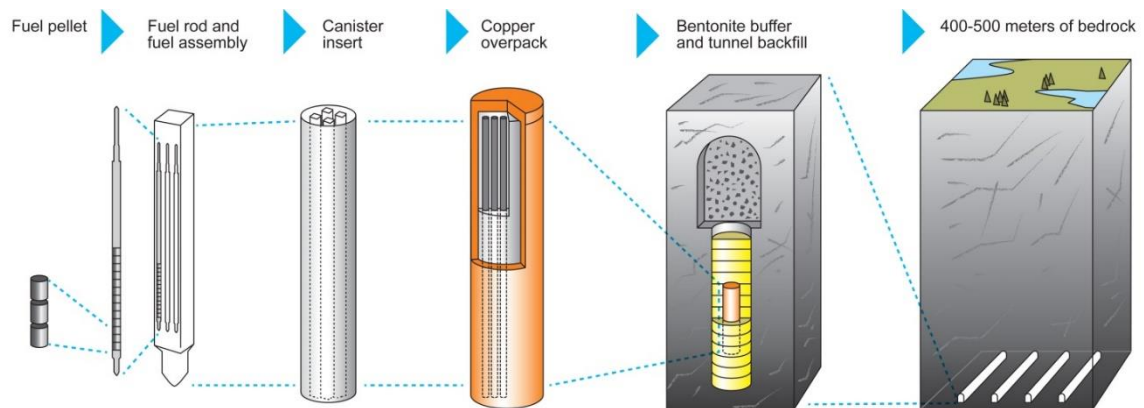
Η μέθοδος εκσκαφής για την εγκατάσταση διάθεσης θα πρέπει να είναι σχεδιασμένη κατά τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται κάθε ζημία στο σχηματισμό πετρωμάτων και να διατηρείται η δομική του ακεραιότητα. Η επιλογή της μεθόδου ανασκαφής θα εξαρτηθεί από μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση των γεωλογικών και μηχανικών παραγόντων, της διαθέσιμης τεχνολογίας και των κανονιστικών απαιτήσεων. Οι μακρές χρονικές περίοδοι κατά τις

οποίες ορισμένα απόβλητα παραμένουν ραδιενεργά έχουν οδηγήσει στην ιδέα της βαθιάς διάθεσης σε υπόγεια αποθετήρια σε σταθερούς γεωλογικούς σχηματισμούς. Η απομόνωση παρέχεται από ένα συνδυασμό μηχανικών και φυσικών φραγμών και καμία υποχρέωση ενεργούς συντήρησης της εγκατάστασης δεν μεταβιβάζεται στις μελλοντικές γενιές. Αυτό συχνά αποκαλείται έννοια πολλών φραγμών (multi-barrier), με τους περιέκτες, το κατασκευασμένο αποθετήριο και τη γεωλογία να παρέχουν φραγμούς για την αποτροπή των ραδιονουκλεϊδίων από την πρόσβαση στους ανθρώπους και το περιβάλλον. Επιπλέον, τα βαθιά υπόγεια ύδατα γενικά στερούνται οξυγόνου, ελαχιστοποιώντας τη δυνατότητα χημικής κινητοποίησης των αποβλήτων. Η βαθιά γεωλογική διάθεση είναι η προτιμώμενη επιλογή για τη διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων στις περισσότερες χώρες, όπως η Αργεντινή, η Αυστραλία, το Βέλγιο, ο Καναδάς, η Τσεχική Δημοκρατία, η Φινλανδία, η Γαλλία, η Ιαπωνία, οι Κάτω Χώρες, η Δημοκρατία της Κορέας, η Ρωσία, η Ισπανία, η Σουηδία, η Ελβετία, το Ηνωμένο Βασίλειο και οι ΗΠΑ. Ως εκ τούτου, υπάρχουν πολλές διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με τις διάφορες έννοιες διάθεσης.

5.1.1 Εγκαταστάσεις εναπόθεσης με εξόρυξη

Η πιο διαδεδομένη πρακτική βαθιάς γεωλογικής διάθεσης είναι αυτή της προκύπτουσας από εξόρυξη αποθήκης αποτελούμενης από σήραγγες ή σπήλαια όπου τοποθετούνται τα συσκευασμένα απόβλητα. Σε ορισμένες περιπτώσεις (π.χ. υγρό πέτρωμα) οι περιέκτες περιβάλλονται στη συνέχεια από ένα υλικό όπως τσιμέντο ή άργιλο (συνήθως μπεντονίτη) για να παρέχουν ένα επιπλέον εμπόδιο (ρυθμιστικό υλικό ή/και επίχωμα). Η επιλογή περιεκτών και ο σχεδιασμός, καθώς και το ρυθμιστικό υλικό / υλικό επίχωσης ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο των αποβλήτων που περιέχονται και τη φύση του διαθέσιμου τύπου βράχου ξενιστή. Η εκσκαφή ενός βαθύς υπόγειου αποθετηρίου χρησιμοποιώντας την κλασική τεχνολογία εξόρυξης περιορίζεται σε προσβάσιμες τοποθεσίες, σε βραχώδεις μονάδες που είναι επαρκώς σταθερές και χωρίς σημαντική ροή υπόγειων υδάτων, και σε βάθη μεταξύ 250m και 1000m. Το περιεχόμενο του αποθετηρίου θα πρέπει να δύναται να ανακτηθεί βραχυπρόθεσμα και αν είναι επιθυμητό, μακροπρόθεσμα. Ο χαλκός που χρησιμοποιείται στο δοχείο τελικής διάθεσης μπορεί να παραμείνει αμετάβλητος μέσα στο βραχώδες υπόστρωμα για εξαιρετικά μεγάλο χρονικό διάστημα, αν οι γεωχημικές συνθήκες είναι κατάλληλες (χαμηλά επίπεδα ροής υπόγειων υδάτων). Τα ευρήματα των αρχαίων εργαλείων χαλκού, πολλών χιλιάδων ετών, αποδεικνύουν επίσης τη μακροπρόθεσμη αντοχή

του χαλκού στη διάβρωση, καθιστώντας τον αξιόπιστο υλικό για το εξωτερικό κέλυφος για μακροπρόθεσμη αποθήκευση ραδιενεργών αποβλήτων.

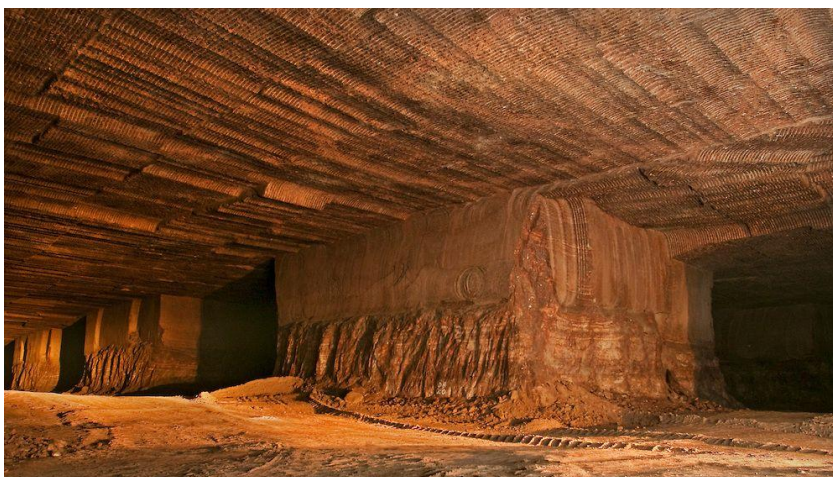


Εικόνα 11. Multi Barrier Disposal Concept (Posiva)

5.1.2 Μέθοδος θαλάμων και στύλων

Η μέθοδος θαλάμων και στύλων είναι μια κοινή μέθοδος ανασκαφής που χρησιμοποιείται στην εξόρυξη και την υπόγεια κατασκευή. Η μέθοδος θαλάμων και στύλων χρησιμοποιείται συχνά σε σχηματισμούς αλατιού, επειδή το αλάτι είναι ένα φυσικό υλικό που έχει καλές ιδιότητες αυτο-επούλωσης. Υπό πίεση, το αλάτι ρέει και επανενώνεται, με αποτέλεσμα ότι τυχόν ρωγμές στο σχηματισμό άλατος θα κλείσουν. Αυτή η ιδιότητα του αλατιού το καθιστά ιδανικό υλικό για την κατασκευή υπόγειων εγκαταστάσεων διάθεσης. Η διαδικασία ανασκαφής περιλαμβάνει εκσκαφή και ανατινάξεις στον σχηματισμό αλατιού με τη χρήση εκρηκτικών. Στη συνέχεια, το αλάτι αφαιρείται με τη χρήση εξοπλισμού εξόρυξης, αφήνοντας πίσω μεγάλους θαλάμους. Το μέγεθος και το σχήμα των θαλάμων μπορούν να προσαρμοστούν για να ταιριάζουν στις ειδικές απαιτήσεις της εγκατάστασης διάθεσης. Μόλις έχουν ανασκαφεί, οι στύλοι του αλατιού αφήνονται για να υποστηρίξουν την οροφή των σπηλαίων. Οι στύλοι συνήθως τοποθετούνται σε ομοιόμορφα κατανεμημένες αποστάσεις για να εξασφαλίσουν τη σταθερότητα της οροφής. Οι περιέκτες τοποθετούνται στη συνέχεια στους θαλάμους και σφραγίζονται με τη χρήση υλικών πλήρωσης, όπως τσιμέντο ή μπεντονίτη. Η μέθοδος του θαλάμων και στύλων έχει πολλά πλεονεκτήματα για την υπόγεια διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων σε σχηματισμούς άλατος. Πρώτον, παρέχει μια σταθερή και ασφαλή εγκατάσταση διάθεσης λόγω της υποστήριξης των στύλων του αλατιού. Αυτό εξασφαλίζει ότι η οροφή των σπηλαίων παραμένει σταθερή και αποτρέπει την κατάρρευση, η οποία θα μπορούσε να συνθλίψει τα δοχεία αποβλήτων και να απελευθερώσει ραδιενεργά υλικά στο περιβάλλον. Δεύτερον, η μέθοδος θαλάμων και

στύλων επιτρέπει την εκσκαφή μεγάλων θαλάμων, παρέχοντας υψηλή χωρητικότητα για τη διάθεση των αποβλήτων. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη μακροπρόθεσμη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων, καθώς τα απόβλητα μπορούν να αποθηκευτούν με ασφάλεια σε υπόγειες εγκαταστάσεις για εκατοντάδες χρόνια. Τέλος, η μέθοδος του θαλάμων και στύλων παρέχει μια μεγάλη επιφάνεια για την τοποθέτηση του εξοπλισμού παρακολούθησης. Αυτό είναι σημαντικό για την ασφάλεια των εγκαταστάσεων διάθεσης και του περιβάλλοντος χώρου. Ο εξοπλισμός παρακολούθησης μπορεί να ανιχνεύσει οποιεσδήποτε αλλαγές στο σχηματισμό αλατιού ή στους περιέκτες, επιτρέποντας την έγκαιρη ανίχνευση πιθανών ζητημάτων. Επιπλέον, μπορεί να απαιτήσει περισσότερες προσπάθειες παρακολούθησης λόγω της μεγαλύτερης προκύπτουσας επιφάνειας. Συνολικά, η μέθοδος θαλάμων και στύλων είναι μια αποδεδειγμένη μέθοδος εκσκαφής για την υπόγεια διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων σε σχηματισμούς άλατος (Μπενάρδος, 2014).

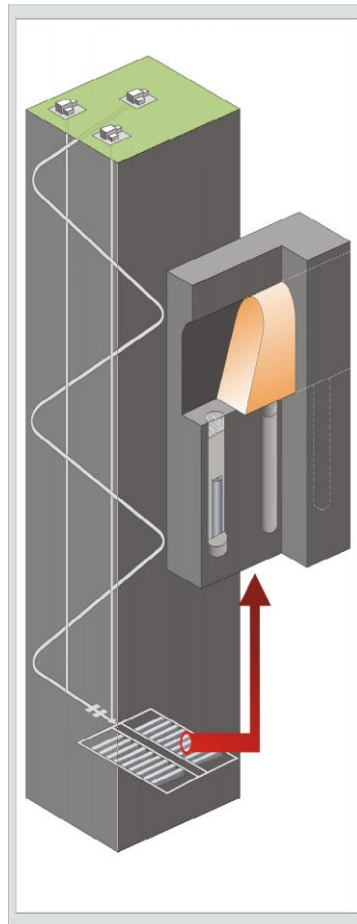


Εικόνα 12. Αλατορυχείο Winsford, UK

5.1.3 Εντός σήραγγας (κάθετη γεώτρηση) με κάνιστρο μεγάλης ή μικρής διάρκειας ζωής

Τα απόβλητα τοποθετούνται σε μικρές σε ύψος (συνήθως 6-8 m), μεσαίας έως μεγάλης διαμέτρου (π.χ. 0,6 έως 1,5 m) γεωτρήσεις στο δάπεδο των σιηράγγων διάθεσης. Τα απόβλητα τοποθετούνται σε μεταλλικό κάνιστρο (ή «υπερσυσκευασία» στην περίπτωση δοχείων HLW). Όπου απαιτείται μακροχρόνιος περιορισμός εντός του δοχείου/υπερσυσκευασίας, χρησιμοποιείται συνήθως ένα ανθεκτικό στη διάβρωση χάλκινο κάνιστρο με χαλύβδινο ένθετο. Εναλλακτικά, ένα χαλύβδινο κάνιστρο βραχείας διάρκειας (κάποιες εκατοντάδες έως μερικές χιλιάδες χρόνια) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλοντα όπου δεν απαιτείται μακροπρόθεσμη ακεραιότητα του δοχείου. Ο δακτύλιος

γύρω από τη συσκευασία των απορριμμάτων συνήθως πληρώνεται με ένα ρυθμιστικό υλικό για την απομόνωση και την προστασία του κάνιστρου, συνήθως πολύ συμπαγή μπεντονίτη, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα υλικά, για παράδειγμα, θρυμματισμένο αλάτι. Η μέθοδος αναπτύχθηκε αρχικά για τη διάθεση αναλωμένου πυρηνικού καυσίμου σε σταθερά κρυσταλλικά πετρώματα στη Σουηδία στη μελέτη KBS στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Οι κατακόρυφες γεωτρήσεις εναπόθεσης αναπτύχθηκαν ως απόκριση στην αβεβαιότητα σχετικά με την έκταση και τις ιδιότητες της EDZ (ζώνη που έχει υποστεί ζημιά και έχει διαταραχθεί από την εκσκαφή) γύρω από τη σήραγγα απόθεσης. Ήταν άγνωστο εάν η EDZ θα μπορούσε να παρέχει μια μακρά, διασυνδεδεμένη, υψηλού πορώδους και διαπερατότητας ζώνη στην οποία η ροή του νερού θα ήταν υψηλή και η οποία θα μπορούσε να παρέχει γρήγορες μεταφορικές οδούς σε υδατοαγώγιμες ζώνες θραύσης, παρακάμπτοντας έτσι μέρος του φράγματος της γεώσφαιρας. Οι γεωτρήσεις προορίζονταν να απομονώσουν κάθε συσκευασία απορριμμάτων και να τα τοποθετήσουν σε λιγότερο διαταραγμένο βράχο πέρα από τη σήραγγα EDZ, έτσι ώστε οι εκλύσεις ραδιονουκλεϊδίων να επιβραδύνονται μέσω αδιατάρακτου βράχου πριν φτάσουν στη σήραγγα EDZ ή σε άλλα μονοπάτια γεώσφαιρας (σημειώστε ωστόσο ότι αυτό δημιουργεί σημαντικές απαιτήσεις σχετικά με την ποιότητα του βράχου σε κάθε θέση γεωτρήσεων). Η χρήση ενός μεταλλικού δοχείου από χαλκό (ή τιτάνιο) για την παροχή μιας πολύ μεγάλης περιόδου συγκράτησης οφείλεται στη συνειδητοποίηση ότι το κλάσμα στιγμιαίας απελευθέρωσης (IRF) ραδιονουκλεϊδίων που δεν συγκρατείται εντός του UO₂ (ή της επένδυσης Zircaloy) του αναλωμένου καυσίμου θα μπορούσε να απελευθερωθεί ως παλμός. Αυτό μπορεί να μην αμβλυνθεί πολύ από τη γεωσφαίρα, λόγω των χημικών ιδιοτήτων αυτών των ραδιονουκλεϊδίων (πολύ υψηλή διαλυτότητα και χαμηλή προσρόφηση) και των υδρογεωλογικών ιδιοτήτων του γεωλογικού περιβάλλοντος. Το IRF θα μπορούσε έτσι να προκαλέσει απαράδεκτα υψηλές εκλύσεις στη βιόσφαιρα, εκτός εάν τα απόβλητα περιέχονταν για αρκετό καιρό ώστε να επιτευχθεί η ραδιενεργή διάσπαση των ραδιονουκλεϊδίων. Επιπλέον, η μακροζωία των δοχείων σημαίνει ότι οι αστοχίες είναι πιθανό να εξαπλωθούν σε μεγάλο χρονικό διάστημα και να διανεμηθούν σε όλη την περιοχή αποθήκευσης, με αποτέλεσμα να διασκορπίζονται και να αραιώνονται σε χρόνο και χώρο. Σε γεωλογικά περιβάλλοντα όπου παρέχεται υψηλός βαθμός συγκράτησης από το βράχο-ξενιστή και τη γεώσφαιρά, τα βραχύβια χαλύβδινα δοχεία θεωρούνται επίσης κατάλληλα (Baldwin, 2008).

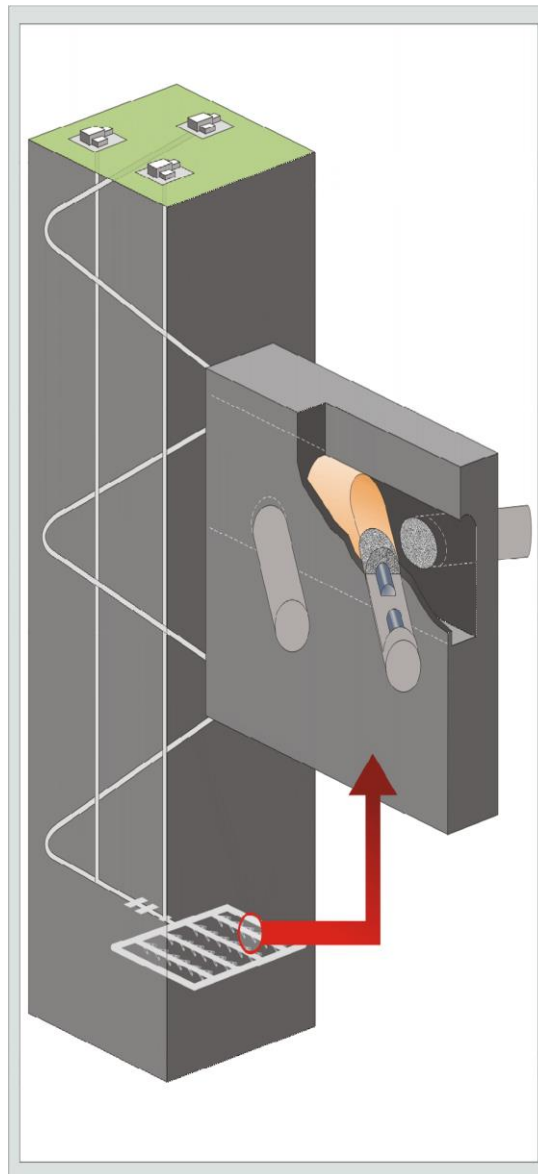


Εικόνα 13. Εντός σήραγγας (κάθετη γεώτρηση) με κάνιστρο μεγάλης ή μικρής διάρκειας ζωής

5.1.4 Εντός σήραγγας (οριζόντια γεώτρηση) με κάνιστρο μεγάλης διάρκειας ή βραχύβιας ζωής

Οι περιέκτες τοποθετούνται σε μικρές, οριζόντιες ή σχεδόν οριζόντιες γεωτρήσεις μεγάλης διαμέτρου (~0,7-1,5 m) που έχουμε ανοίξει στους τοίχους, συνήθως και στις δύο πλευρές, των σηράγγων διάθεσης. Τα απόβλητα τοποθετούνται σε μεταλλικό κάνιστρο (ή «υπερσυσκευασία» στην περίπτωση HLW). Όπου απαιτείται μακροχρόνιος περιορισμός εντός του δοχείου/υπερσυσκευασίας, χρησιμοποιείται ένα ανθεκτικό στη διάβρωση υλικό, για παράδειγμα ένα χάλκινο κάνιστρο με σιδερένιο ένθετο. Εναλλακτικά, ένα χαλύβδινο κάνιστρο βραχείας διάρκειας (κάποιες εκατοντάδες έως μερικές χιλιάδες χρόνια) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλοντα όπου η δίνεται λιγότερη έμφαση στη μακροπρόθεσμη ακεραιότητα του περιέκτη. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια επένδυση για τη στήριξη των γεωτρήσεων και μπορεί να συμπεριληφθεί ένα ρυθμιστικό υλικό (π.χ. μπεντονίτης) για να γεμίσει το χώρο γύρω και μεταξύ των περιεκτών. Η αρχική μέθοδος αναπτύχθηκε από την SCK.CEN (Βέλγιο) και την Andra (Γαλλία) για την διάθεση κυρίως επεξεργασμένου HLW σε αργιλικά πετρώματα-ξενιστές. Μια παρόμοια μέθοδος έχει αναπτυχθεί στην Ολλανδία για την διάθεση στο αλάτι. Η μέθοδος έχει συνήθως ληφθεί υπόψη μόνο για οπές εναπόθεσης που περιέχουν ένα έως μικρό αριθμό περιεκτών, δηλαδή τρύπες μήκους έως και

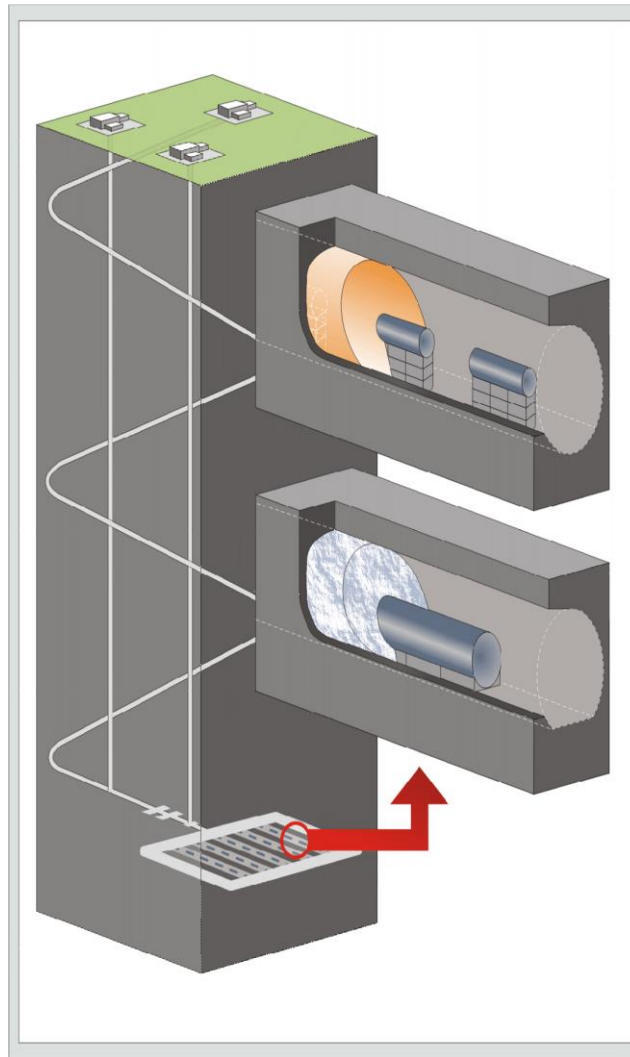
μερικές δεκάδες m, λόγω μηχανικών παραγόντων του βράχου σε ασθενέστερα πετρώματα που περιορίζουν το μήκος της γεώτρησης, εκτός εάν χρησιμοποιείται πολύ σημαντική επένδυση. Επίσης, σε μεγαλύτερες τρύπες, μικρές αλλαγές στη διάμετρο της γεώτρησης είναι πιο πιθανές (τόσο από εκσκαφή όσο και μεταγενέστερη παραμόρφωση) και θα μπορούσαν να διαταράξουν τις εργασίες τοποθέτησης των περιεκτών που είναι ελαφρώς μικρότερες από την οπή και απλώς ωθούνται στη θέση τους. Η Andra σημειώνει ότι η χρήση οριζόντιων γεωτρήσεων, μήκους έως και μερικές δεκάδες m, κάνει καλύτερη χρήση των πλευρικών (και όχι κατακόρυφα) εκτεταμένων αργιλικών σχηματισμών που υπάρχουν στον προτεινόμενο χώρο αποθήκευσης, γεγονός που αντισταθμίζει τις επιπλέον δυσκολίες χειρισμού σε οριζόντιες και όχι κάθετες οπές απόθεσης. Η Andra προτιμά επίσης να χρησιμοποιεί οπές εναπόθεσης με μεταλλική επένδυση χωρίς ρυθμιστικό υλικό, καθώς αυτό παρέχει επαρκή συγκράτηση στους βράχους-ξενιστές, ενώ μειώνει το μέγεθος της οπής, τη χρήση σκυροδέματος και τον όγκο της αργίλου που διαταράσσεται από την εκσκαφή. Η χρήση μιας σημαντικής επένδυσης γεώτρησης επιτρέπει επίσης την ανάκτηση των απορριμμάτων για σημαντικό χρονικό διάστημα μετά την τοποθέτηση, κάτι που αποτελεί απαίτηση του προγράμματος διάθεσης της Andra. (Baldwin, 2008).



Εικόνα 14. Εντός σήραγγας (οριζόντια γεώτρηση) με κάνιστρο μεγάλης διάρκειας ή βραχύβιας ζωής

5.1.5 Εντός σήραγγας (αξονική) με κάνιστρο βραχύβιας ζωής και ρυθμιστικό υλικό

Τα απόβλητα, εναποτίθενται σε χαλύβδινα υπερκοντέινερ, που παρέχουν πλήρη περιορισμό για μερικές εκατοντάδες ή χιλιάδες χρόνια, τα οποία τοποθετούνται αξονικά κατά μήκος των σηράγγων διάθεσης που περιβάλλονται από ένα παχύ στρώμα μπεντονίτη που γεμίζει πλήρως τη σήραγγα χωρίς περαιτέρω επίχωμα. Οι περιέκτες αποβλήτων διαχωρίζονται επίσης με τμήματα απομόνωσης. Οι σήραγγες διάθεσης κλείνουν αμέσως μετά την ολοκλήρωση της τοποθέτησης των αποβλήτων με πολύ σημαντικές σφραγίσεις για να αντιστέκονται στην πίεση διόγκωσης του μπεντονίτη. Η μέθοδος αναπτύχθηκε από τον Nagra για την διάθεση HLW για το Project Gewähr 1985, για τη επίδειξη της σκοπιμότητας διάθεσης HLW στην Ελβετία, σε κρυσταλλικούς σχηματισμούς στη Βόρεια Ελβετία και επίσης από την Ondraf/Niras στο SAFIR 2 για διάθεση στον άργιλο Boom στο Βέλγιο. Στην Ελβετία, με βάση την εκτεταμένη εμπειρία με τις εκσκαφές σήραγγας, αναμενόταν ότι η EDZ θα ήταν μικρή εάν η τεχνολογία TBM μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την εκσκαφή των σηράγγων διάθεσης κυκλικής διατομής σε κρυσταλλικό βράχο. Οι περιέκτες αποβλήτων θα μπορούσαν να απομονωθούν καλά κατά μήκος του άξονα της σήραγγας με τη χρήση παχύρρευστου μπεντονίτη, αποφεύγοντας την επίδραση της EDZ της σήραγγας με αυτόν τον τρόπο, αντί με τη χρήση κάθετων γεωτρήσεων. Η αξονική εναπόθεση σε κυκλικές σήραγγες θεωρήθηκε επίσης μια αποτελεσματική μέθοδος διάθεσης καθώς ο όγκος εκσκαφής ανά συσκευασία απορριμμάτων ελαχιστοποιείται λόγω της σχετικά μικρής διαμέτρου της σήραγγας και δεν απαιτούνται μεμονωμένες γεωτρήσεις διάθεσης. Ομοίως, στον άργιλο Boom, οι ιδιότητες του βράχου ξενιστή υποδηλώνουν ότι η EDZ που αναπτύσσεται γύρω από τις σήραγγες διάθεσης κατά τη διάρκεια της εκσκαφής θα έκλεινε λόγω ερπυσμού μετά τη σφράγιση της σήραγγας και δεν θα παρέμενε σημαντικό ζήτημα για μακροπρόθεσμη ασφάλεια. Η μέθοδος έχει επίσης υιοθετηθεί από τη Nagra για τη συνδιάθεση αναλωμένου καυσίμου/HLW σε άργιλο Opalinus στη Βόρεια Ελβετία. Η σχετικά μεγάλη διάμετρος της σήραγγας (3,7 m σε ελβετικά κρυσταλλικά πετρώματα, 2,5 m σε άργιλο Opalinus, 2 m σε άργιλο Boom) επιτρέπει ένα παχύ ρυθμιστικό μπεντονίτη γύρω από τις συσκευασίες απορριμμάτων (έως 1 m σε διάμετρο). Όπως προβλέπεται για το κρυσταλλικό βράχο ξενιστή, το ρυθμιστικό υλικό έχει έναν αρχικό ρόλο να προστατεύει το δοχείο αποβλήτων/υπερσυσκευασία, αλλά, δεδομένου ότι αυτό παρέχει περιορισμό μόνο για περίπου 1.000 χρόνια, ο κύριος μακροπρόθεσμος ρόλος ήταν ως εμπόδιο στην απελευθέρωση των ραδιονουκλεϊδίων στη γεώσφαιρα. Στον άργιλο Boom ένας χαλύβδινος σωλήνας στο κέντρο του ρυθμιστικού υλικού για τη διευκόλυνση της τοποθέτησης των αποβλήτων. Αυτή η μέθοδος έχει εγκαταλειφθεί από το βελγικό πρόγραμμα επειδή υπήρχαν ανησυχίες σχετικά με τη διάβρωση του κάνιστρου και επίσης σε σχέση με την πρακτική εφαρμογή, ιδίως όσον αφορά τη θερμική διαστολή του κεντρικού χαλύβδινου σωλήνα. Αυτή η μέθοδος εξετάζεται επίσης από την DBE, Γερμανία, για την διάθεση αναλωμένου καυσίμου σε σχηματισμό θόλου αλατιού στο Gorleben, στην περίπτωση αυτή το θρυμματισμένο αλάτι θεωρείται ως το επίχωμα γύρω από τους περιέκτες (Baldwin, 2008).

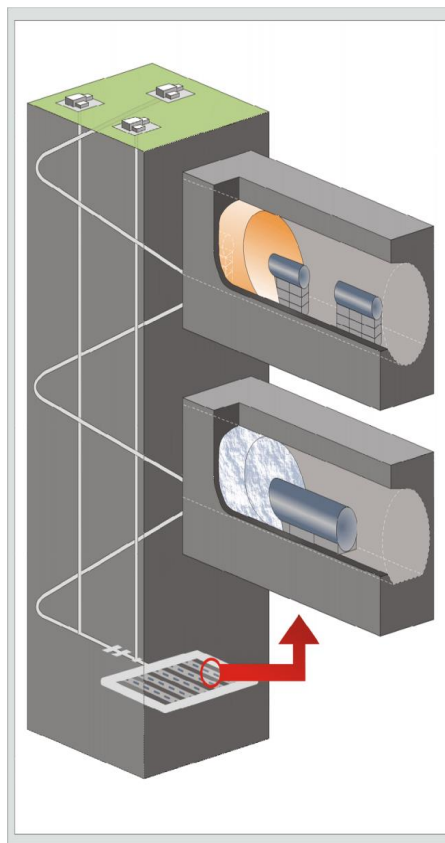


Εικόνα 15. Εντός σήραγγας (αξονική) με κάνιστρο βραχύβιας ζωής και ρυθμιστικό υλικό

5.1.6 Εντός σήραγγας (αξονική) με κάνιστρο μακράς διάρκειας ζωής και ρυθμιστικό υλικό

Τα απόβλητα, ενθυλακωμένα σε ένα μεταλλικό περιέκτη από χαλκό (ή τιτάνιο), το οποίο παρέχει μεγάλη περίοδο πλήρους συγκράτησης, τοποθετούνται αξονικά κατά μήκος των σηράγγων διάθεσης που περιβάλλονται από ένα παχύ στρώμα μπεντονίτη που γεμίζει πλήρως τη σήραγγα, χωρίς περαιτέρω επίχωση. Οι περιέκτες αποβλήτων διαχωρίζονται επίσης με τμήματα απομόνωσης. Οι σήραγγες διάθεσης κλείνουν αμέσως μετά την ολοκλήρωση της τοποθέτησης των απορριμμάτων με σημαντικές σφραγίσεις για να αντέχουν στην πίεση διόγκωσης του μπεντονίτη. Η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα κάνιστρο μακράς διάρκειας από χαλκό ή τιτάνιο, με σιδερένιο ένθετο για μηχανική αντοχή, στη θέση της βραχύβιας υπερσυσκευασίας χάλυβα. Η μέθοδος έχει αναπτυχθεί από την Ontario Power Generation (OPG) στον Καναδά, για τη διάθεση αναλωμένου καυσίμου στα κρυσταλλικά πετρώματα της Canadian Shield. Η χρήση των κάνιστρων μακράς διάρκειας προσδίδει πλεονεκτήματα σε σχέση με τα χάλυβδινα σε σχέση με το κλάσμα στιγμιαίας αποδέσμευσης (IRF) του αναλωμένου καυσίμου, καθώς ο μεγαλύτερος χρόνος συγκράτησης επιτρέπει

σημαντική αποσύνθεση ορισμένων νουκλεϊδίων IRF που σχετίζονται με την ασφάλεια, ως εξάπλωση αστοχιών περιέκτη, και επομένως απελευθερώσεις, για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο σχεδιασμός του OPG διαφέρει επίσης στο ότι υπάρχουν δύο περιέκτες αποβλήτων αναλωμένου καυσίμου δίπλα-δίπλα σε κάθε θέση διάθεσης για την αντιμετώπιση της πολύ ισχυρής ανισοτροπίας τάσης που βρίσκεται σε τμήματα της Canadian Shield, η οποία απαιτεί την εκσκαφή σήραγγων ωοειδούς διατομής για τη σταθερότητα του. Αυτός ο σχεδιασμός αντικαθιστά ένα παλαιότερο καναδικό σχέδιο (AECL) που χρησιμοποιεί κοντές κατακόρυφες γεωτρήσεις στο δάπεδο του χώρου διάθεσης, καθώς η ανισοτροπία τάσης δημιουργούσε προβλήματα με τη σταθερότητα της γεώτρησης. Στο σχέδιο της OPG, το ρυθμιστικό διάλυμα έχει πολλά συστατικά μέρη, χρησιμοποιώντας μίγματα μπεντονίτη και μπεντονίτη/άμμου με διαφορετικές αρχικές πυκνότητες. Ο μπεντονίτης υψηλής πυκνότητας τοποθετείται ως ενιαία μονάδα, που περιβάλλει και τους δύο περιέκτες. Αυτό απλοποιεί και επιταχύνει τη λειτουργία αποφεύγοντας τη χρήση πολλών μπλοκ σύνθετου σχήματος, καθώς παρέχει πρόσθετη θωράκιση κατά τη λειτουργία τοποθέτησης (Baldwin, 2008).

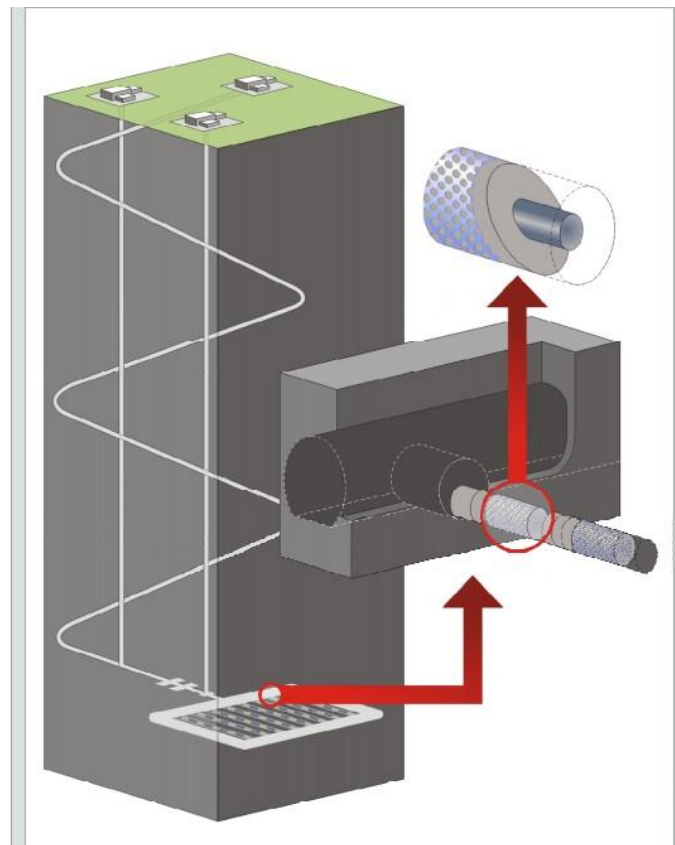


Εικόνα 16. Εντός σήραγγας (αξονική) με κάνιστρο μακράς διάρκειας ζωής και ρυθμιστικό υλικό

5.1.7 Εντός σήραγγας (αξονική) με υπερκοντέινερ (μικρός δακτύλιος)

Τα απόβλητα τοποθετούνται αξονικά σε κυκλικές σήραγγες με τη μορφή ενός υπερκοντέινερ στο οποίο τα απόβλητα, τα υπερκοντέινερ προσυναρμολογούνται σε μια επιφανειακή εγκατάσταση σε ένα κλειστό, διάτρητο κέλυφος από χάλυβα. Η σήραγγα

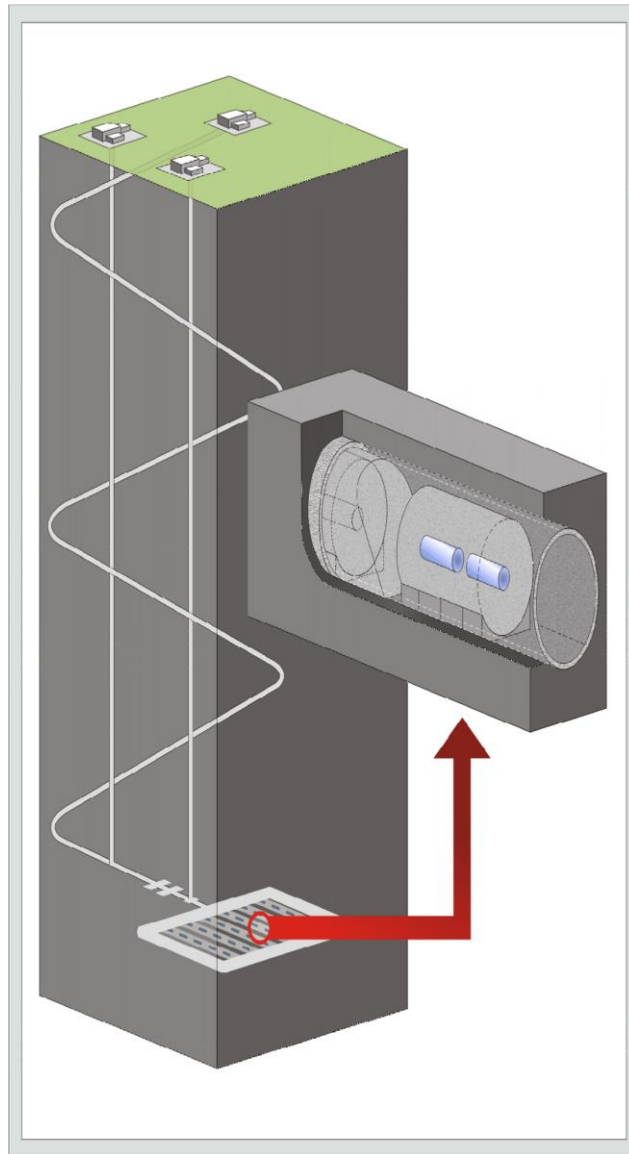
είναι όσο το δυνατόν μικρότερη για να ελαχιστοποιηθεί ο κενός χώρος γύρω από το υπερκοντέινερ, ο οποίος πρέπει να γεμίσει με διόγκωση του ρυθμιστικού διαλύματος καθώς δεν χρησιμοποιείται πρόσθετο υλικό επίχωσης. Μπεντονίτες χρησιμοποιούνται για την απομόνωση ενός ή περισσότερων υπερκοντέινερ. Η SKB (Σουηδία) και η Posiva (Φινλανδία) αποφάσισαν να αξιολογήσουν μια οριζόντια έκδοση του KBS-3 Concept, γνωστή ως KBS-3H, για να αποφύγουν πιθανά προβλήματα με το θρυμματισμό γύρω από τις γεωτρήσεις κάθετης εναπόθεσης. Επιπλέον, η αξονική τοποθέτηση των συσκευασιών απορριμμάτων κατέστησε δυνατή την αξιοποίηση ενός μειωμένου EDZ γύρω από τη σήραγγα διάθεσης χρησιμοποιώντας μια σήραγγα μικρής διαμέτρου, εκσκαφής TBM. Ωστόσο, η τοποθέτηση του ρυθμιστικού διαλύματος μπεντονίτη με τη σε συνθήκες υψηλής υγρασίας ήταν προβληματική λόγω της πρόωρης διόγκωσης του κατι το οποίο προκάλεσε ρωγμές και αποσάθρωση. Τα υπερκοντέινερ τοποθετούνται σε ένα πολύ μικρό (λίγα εκατοστά) αποτελεσματικό διάκενο για την ανύψωση και τη μεταφορά του υπερκοντέινερ στη θέση του. Ο μπεντονίτης στο υπερκοντέινερ θα διογκωθεί και θα εξωθηθεί από το περίβλημα μόλις αρχίσει ο κορεσμός. Ωστόσο, καθώς η ποσότητα του μπεντονίτη επαρκεί μόνο για την πλήρωση του δακτυλίου των 5 cm στην απαιτούμενη πυκνότητα, είναι σημαντικό να μην εκτοπίζεται. Έτσι, κάθε υπερκοντέινερ απομονώνεται στη σήραγγα με ένα τμήμα μόνο από μπεντονίτη (μπλοκ διαχωρισμού). Τα μπλοκ διαχωρισμού χρησιμεύουν επίσης για να διαχωρίζονται οι περιέκτες για να διασφαλιστεί ότι δεν θα ξεπεραστούν τα θερμικά όρια στον μπεντονίτη (Baldwin, 2008).



Εικόνα 17. Εντός σήραγγας (αξονική) με υπερκοντέινερ (μικρός δακτύλιος)

5.1.8 Εντός σήραγγας (αξονική) με υπερκοντέινερ (ρυθμιστικό υλικό από σκυρόδεμα)

Τα απόβλητα τοποθετούνται αξονικά σε κυκλικές σήραγγες, πιθανώς επενδεδυμένες για στήριξη, με τη μορφή ενός υπερκοντέινερ στο οποίο υπερκοντέινερ και το ρυθμιστικό υλικό προσυναρμολογούνται σε μια επιφανειακή εγκατάσταση σε ένα κλειστό χαλύβδινο κέλυφος. Το ρυθμιστικό υλικό είναι σκυρόδεμα με βάση το τσιμέντο Portland (OPC). Η διάμετρος της σήραγγας μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από το υπερκοντέινερ. Όπου χρησιμοποιείται ένας μεγάλος δακτύλιος, χρησιμοποιείται πρόσθετη επίχωση με βάση το τσιμέντο για την πλήρωση γύρω και μεταξύ των υπερκοντέινερ. Οι σήραγγες μπορεί να έχουν μήκος μερικές εκατοντάδες μέτρα για να επωφεληθούν από έναν πλευρικά εκτεταμένο σχηματισμό. Η ιδέα αναπτύχθηκε από την Ondraf/Niras για τον άργιλο Boom (Βέλγιο) για την αντιμετώπιση πιθανών προβλημάτων που εντοπίστηκαν με την προηγούμενη μέθοδο SAFIR 2 στην οποία οι περιέκτες των HLW σε λεπτές ατσάλινες υπερσυσκευασίες σύρθηκαν στη θέση τους κατά μήκος ενός χαλύβδινου σωλήνα τοποθετημένου αξονικά σε μια σήραγγα διάθεσης γεμάτη μπετονίτη. Η σχεδίαση SAFIR 2 αντικαταστάθηκε. Ειδικότερα, θεωρήθηκε πιθανό ότι ορισμένοι τύποι διάβρωσης ενδέχεται να απειλήσουν την ακεραιότητα της υπερκοντέινερ κατά τη διάρκεια της θερμικής φάσης. Υπήρχαν επίσης ερωτήματα σχετικά με την πρακτική εφαρμογή, ιδιαίτερα σχετικά με τη θερμική διαστολή του κεντρικού χαλύβδινου σωλήνα. Η διαστολή, σε συνδυασμό με την πίεση διόγκωσης που ασκείται από το ρυθμιστικό υλικό, θα προκαλούσε μεγάλη πίεση στον χάλυβα, οδηγώντας πιθανώς σε πλαστική παραμόρφωση. Οι υπολογισμοί του πεδίου εφαρμογής έδειξαν ότι το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος σωλήνα θα ήταν μικρότερο από 20 m. Άλλες αβεβαιότητες που σχετίζονται με τη δυσκολία μεταφοράς και τοποθέτησης μιας μη θωρακισμένης υπερσυσκευασίας και τη διασφάλιση ποιότητας των μηχανικών φραγμών. Με τη χρήση ενός υπερκοντέινερ τα απόβλητα θωρακίζονται σε όλη τη διάρκεια των διαδικασιών τοποθέτησης, οι οποίες απλοποιούνται (αν και το υπερκοντέινερ είναι μεγαλύτερο και βαρύτερο στο χειρισμό) και δεν υπάρχουν επιζήμιες αλληλεπιδράσεις μεταξύ του ρυθμιστή, της επίχωσης και των επενδύσεων της σήραγγας από σκυρόδεμα. Το σκυροδέμα με βάση το OPC έχει σχεδιαστεί για να παρέχει αλκαλικές συνθήκες παθητικοποίησης γύρω από το υπερκοντέινερ χάλυβα, ενισχύοντας τη μακροζωία μειώνοντας τη διάβρωση. Μετά την αποτυχία του υπερκοντέινερ, θα συνεχίσει να παρέχει ένα ευνοϊκό χημικό περιβάλλον καθώς και ένα φράγμα διάχυσης/μεταφοράς. (Baldwin, 2008).

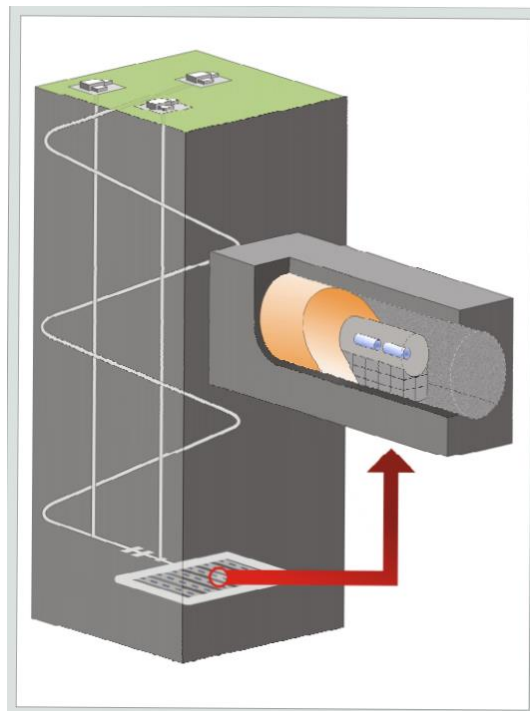


Εικόνα 18. Εντός σήραγγας (αξονική) με υπερκοντέινερ (ρυθμιστικό υλικό από σκυρόδεμα)

5.1.9 Εντός σήραγγας (αξονική) με υπερκοντέινερ (μεγάλος δακτύλιος)

Τα υπερκοντέινερ, που περιλαμβάνουν απόβλητα και συμπιεσμένο ρυθμιστικό μπεντονίτη συναρμολογημένα σε ένα στιβαρό κέλυφος από χάλυβα, τοποθετούνται οριζόντια κατά μήκος των σηράγγων διάθεσης, αλλά όχι απαραίτητα στο κέντρο της σήραγγας. Οι σήραγγες είναι μεγαλύτερες από τη διάμετρο του υπερκοντέινερ κατά ~1 m ή περισσότερο για να επιτρέπουν την ευκολότερη τοποθέτηση και ανάκτηση εάν απαιτείται. Ανάλογα με την παραγωγή θερμότητας των αποβλήτων, τα υπερκοντέινερ μπορούν να τοποθετηθούν από άκρη σε άκρη ή να χωριστούν κατά μήκος των σηράγγων, που μπορεί να έχουν μήκος μερικές εκατοντάδες μέτρα. Ο δακτύλιος γύρω από το υπερκοντέινερ και τυχόν κενά μεταξύ τους είναι γεμάτα με ένα μη συμπαγές επίχωμα, όπως ένα μείγμα θρυμματισμένου βράχου και μπεντονίτη. Δυσκολίες αντιμετωπίστηκαν με τη χρήση μπεντονίτη κατά τη διάρκεια του πειράματος FEBEX στο Grimsel Test Site (GTS) στην Ελβετία, που αφορούσε την

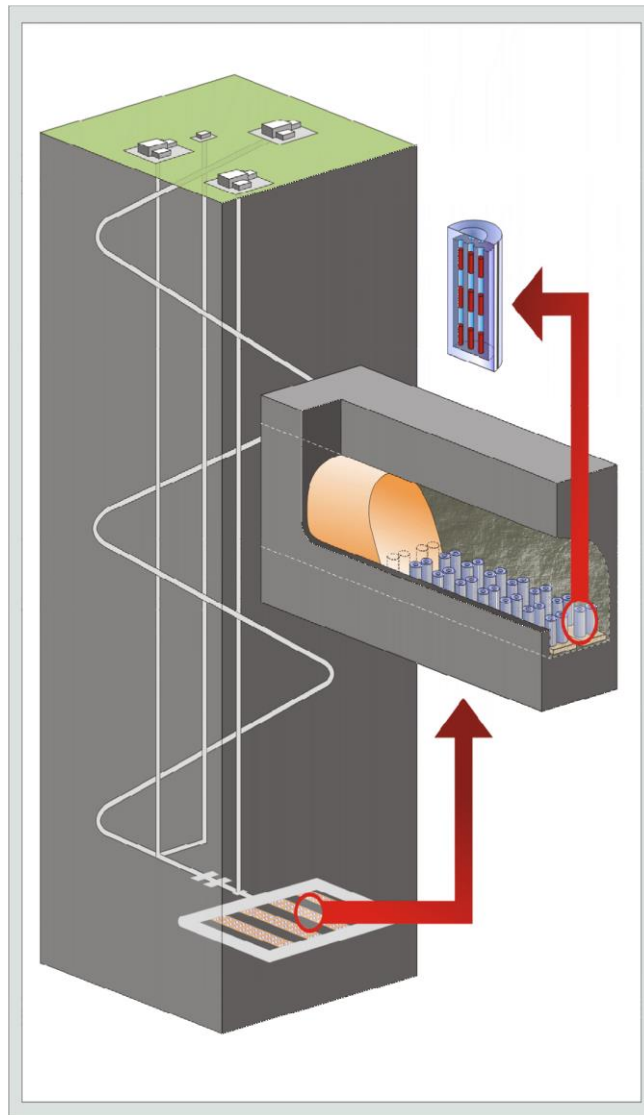
κατασκευή ενός τμήματος μπεντονίτη με αξονικά τοποθετημένους περιέκτες αποβλήτων σε μια ειδικά εκ σκαμμένη σήραγγα. Η κατασκευή του ρυθμιστικού υλικού μπεντονίτη με τη μορφή προσχηματισμένων συμπιεσμένων τεμαχίων μπεντονίτη, όπως περιγράφεται για τις μελέτες του έργου Gewähr / Kristallin-I, σε συνθήκες υψηλής υγρασίας ήταν προβληματική λόγω της πρόωρης διόγκωσης του μπεντονίτη που προκάλεσε ρωγμές και αποσάθρωση των προσχηματισμένων τεμαχίων. Ως αποτέλεσμα, μια τροποποιημένη μέθοδος συμπεριλαμβανομένης μιας προκατασκευασμένης μονάδας θεωρήθηκε για μια μελέτη εναλλακτικών μεθόδων διάθεσης για HLW από την NUMO (Ιαπωνία), αναγνωρίζοντας ότι οι υποψήφιοι χώροι αποθήκευσης μπορεί να είναι πολύ λιγότερο ξηροί. Ωστόσο, αποδείχτηκε ότι είναι καλύτερη η κατασκευή μεγαλύτερου δακτύλιου γύρω από το υπερκοντέινερ, έτσι ώστε, σε περίπτωση λειτουργικού συμβάντος, η ανάκτηση ή η αντιστροφή της διαδικασίας τοποθέτησης να είναι σχετικά απλή. Οι ιδιότητες της επίχωσης είναι απροσδιόριστες και έχουν υπάρξει διάφορες προτάσεις, για παράδειγμα, ότι θα πρέπει να είναι 100% μπεντονίτης, αν και λιγότερο πυκνό από το ρυθμιστικό υλικό, αλλά να επεκτείνει το φράγμα διάχυσης ή υλικό υψηλότερης διαπερατότητας για να λειτουργεί ως υδραυλικός κλωβός γύρω από το υπερκοντέινερ και να μειώσει τις πιθανές επιπτώσεις της τοπικής εισροής νερού (αυτό μπορεί στη συνέχεια να απαιτήσει επίσης ενδιάμεσα τμήματα φραγμού σήραγγας). Η χρήση του πλήρως σφραγισμένου υπερκοντέινερ σημαίνει ότι η μέθοδος είναι ευέλικτη όσον αφορά την εφαρμογή σε μια σειρά πετρωμάτων ξενιστών, καθώς μια επένδυση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως προσωρινό υδραυλικό φράγμα (φάση λειτουργίας) σε υγρό, σπασμένο βράχο ή για στήριξη σε ασθενέστερα πετρώματα. Κατά τη χρήση μιας επένδυσης, η επίχωση αναμένεται να ρυθμίσει τυχόν χημικές αλληλεπιδράσεις (π.χ. από σκυρόδεμα) για να αποτρέψει την αλλοίωση του μπεντονίτη μόλις διαβρωθεί το κέλυφος που χειρίζεται το υπερκοντέινερ. Καθώς το υπερκοντέινερ κατασκευάζεται υπό ελεγχόμενες συνθήκες (σε θερμή κυψέλη), η πυκνότητα του μπεντονίτη θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερη από ό,τι συνήθως θεωρείται (π.χ. μεγαλύτερη από 2,0 τόνους/m³), παρέχοντας υψηλή πίεση διόγκωσης στον κορεσμό για να μειώσει τυχόν μικρά μη γεμάτα κενά στην επίχωση (Baldwin, 2008).



Εικόνα 19 Εντός σήραγγας (αξονική) με υπερκοντέινερ (μεγάλος δακτύλιος)

5.1.10 Στοές με χαλύβδινα MPC (επίχωση με μπεντονίτη)

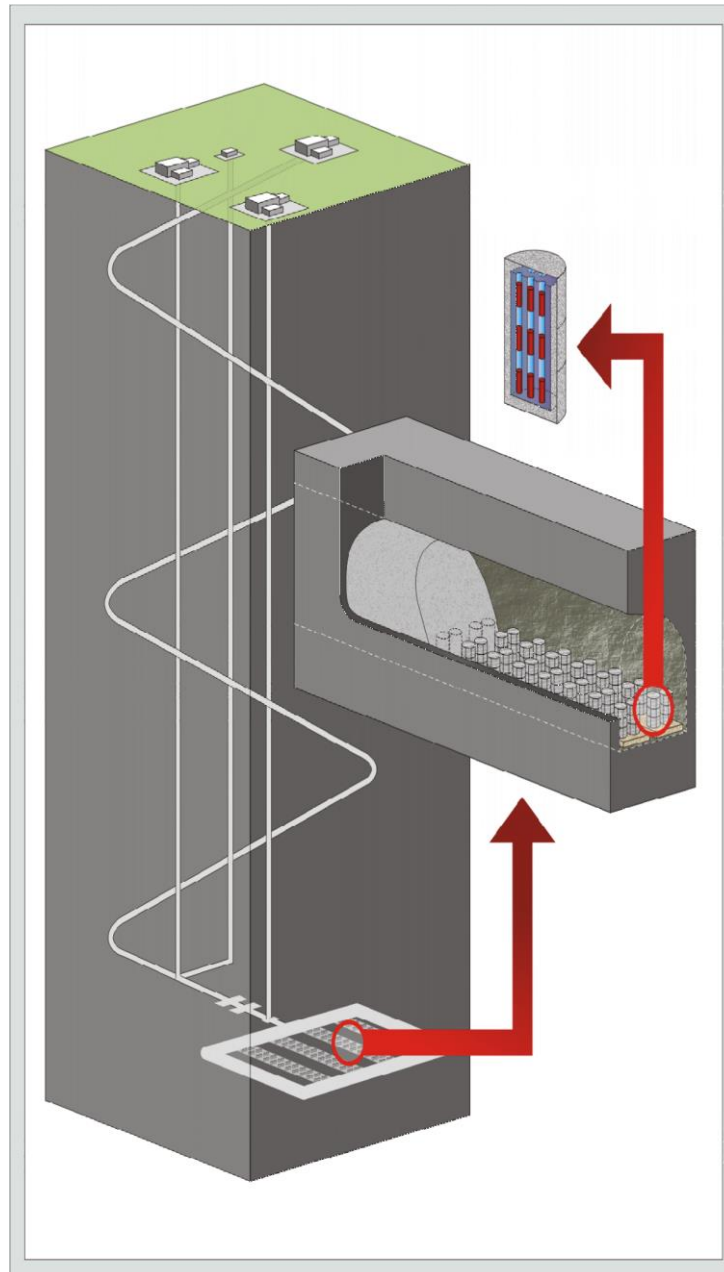
Μεγάλοι, χαλύβδινοι περιέκτες μεταφοράς/αποθήκευσης/διάθεσης πολλαπλών χρήσεων (MPC), τα οποία μπορούν να χωρέσουν έως και 20 φιάλες HLW ή πολλαπλές φιάλες καυσίμου, τοποθετούνται όρθια σε μεγάλες αεριζόμενες στοές για μια περίοδο έως και 300 χρόνια για να επιτραπεί η ψύξη και η επιθεώρηση. Η περίοδος πριν από την επίχωση θα ποικίλλει από λιγότερο από 100 χρόνια για παλιά HLW (παραγωγή θερμότητας 400 W ανά φιάλη HLW ή λιγότερο) έως περισσότερα από 200 χρόνια για SF ή MPC που περιέχουν 20 φιάλες HLW (>1000 W ανά φιάλη HLW). Μετά την ανοιχτή περίοδο, τα υλικά επίχωσης μπεντονίτη τοποθετούνται γύρω από τα δοχεία, σφραγίζονται οι στοές και επιχωματώνονται οι σήραγγες πρόσβασης για το τελικό κλείσιμο του αποθηκευτικού χώρου (Baldwin, 2008).



Εικόνα 20. Στοές με χαλύβδινα MPC (επίχωση με μπεντονίτη)

5.1.11 Στοές με χαλύβδινα MPC ή σκυρόδεμα/DUCRETE CDC (επιχώσεις τσιμέντου)

Μεγάλοι, χαλύβδινοι περιέκτες μεταφοράς/αποθήκευσης/διάθεσης πολλαπλών χρήσεων (MPC) ή βαρέλια διάθεσης σκυροδέματος (CDC), τα οποία μπορούν να χωρέσουν έως και 20 περίπου φιάλες HLW ή πολλαπλές συστοιχίες καυσίμου, τοποθετούνται όρθια σε μεγάλες αεριζόμενες στοές για περίοδο έως και 300 χρόνια για να επιτραπεί η ψύξη και η επιθεώρηση. Η περίοδος πριν από την επίχωση θα εξαρτηθεί από τον τύπο, την ποσότητα και την ηλικία των αποβλήτων στα MPC, αλλά μπορεί να ποικίλλει από λιγότερο από 100 χρόνια για παλιά HLW (παραγωγή θερμότητας 400 W ανά φιάλη HLW ή λιγότερο) έως περισσότερα από 200 χρόνια για SF ή MPC που περιέχουν 20 φιάλες HLW (>1000 W ανά φιάλη HLW). Μετά την ανοιχτή περίοδο, η επίχωση με βάση το τσιμέντο τοποθετείται γύρω από τα δοχεία, γίνεται σφράγιση της στοάς και γεμίζονται οι σήραγγες πρόσβασης για το τελικό κλείσιμο του αποθηκευτικού χώρου. Αυτή η μέθοδος διάθεσης θεωρείται εφικτή εδώ και πολλά χρόνια, αλλά δεν έχει αναπτυχθεί με καμία λεπτομέρεια μέχρι πρόσφατα. Η αρχική ιδέα προϋπέθετε ότι το υλικό επίχωσης θα βασιζόταν σε μπετονίτη. Ωστόσο, αναγνωρίστηκε ότι η τοποθέτηση επίχωσης με βάση μπετονίτη θα ήταν χρονοβόρα, καθώς η αναμενόμενη μακροπρόθεσμη απόδοση ασφάλειας εξαρτάται από τις ιδιότητες φραγμού και, επομένως, από την ομοιογένεια και την πυκνότητα του τοποθετημένου υλικού. Κατά συνέπεια, για χρήση όταν ήταν επιθυμητό το γρήγορο κλείσιμο, εναλλακτικές λύσεις με βάση το τσιμέντο έχουν εξεταστεί ως πιθανές, αν και δεν έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες για να εξεταστούν οι επιπτώσεις για τη μακροπρόθεσμη ασφάλεια. Μια παραλλαγή αυτής της ιδέας είναι η χρήση βαρελιών διάθεσης σκυροδέματος (CDC), που ενδεχομένως ενσωματώνουν απεμπλουτισμένο ουράνιο. Το σκυρόδεμα που περιέχει DU ("DUCRETE") εκπληρώνει τον διπλό ρόλο της παροχής πρόσθετης θωράκισης από την ακτινοβολία σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα (ή ενός μικρότερου, λεπτότερου τοιχώματος CDC) και της διάθεσης του και μπορεί να επηρεάσει τη διαλυτότητα του SF, αν και αυτό εξαρτάται από τη μορφή του DU στο σκυρόδεμα). Η μέθοδος είναι ευέλικτη όσον αφορά την εφαρμογή σε μια σειρά πετρωμάτων ξενιστών, καθώς οι επενδύσεις στις στοές θα χρησιμοποιηθούν για λόγους λειτουργικής ασφάλειας (Baldwin, 2008).

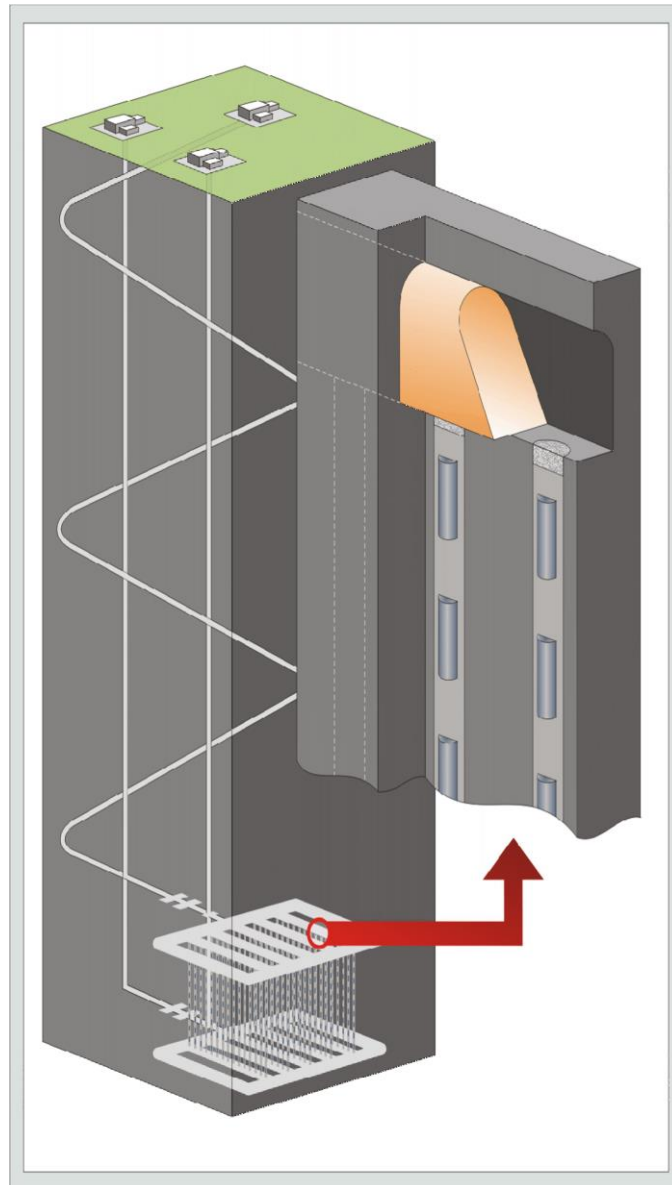


Εικόνα 21. Στοές με χαλύβδινα MPC ή σκυρόδεμα/DUCRETE CDC (επιχώσεις τσιμέντου)

5.1.12 Εξορύξεις μέσω βαθιών γεωτρήσεων

Τα συσκευασμένα απόβλητα τοποθετούνται σε στοίβες σε κατακόρυφες γεωτρήσεις μεγάλου μήκους (~200 m ή μεγαλύτερες), οι οποίες διανοίγονται από το υπέδαφος είτε απευθείας από μια σήραγγα διάθεσης είτε μεταξύ μίας ανώτερης λειτουργικής στοάς και μίας κατώτερης, η οποία χρησιμοποιείται μόνο για την εκσκαφή των γεωτρήσεων και επιχωματώνεται και σφραγίζεται πριν αρχίσει η τοποθέτηση. Στην τελευταία περίπτωση, η υπερυψωμένη όρυξη επιτρέπει την εκσκαφή γεωτρήσεων μεγάλης διαμέτρου (1,5-2 m) σε μήκος αρκετών εκατοντάδων μέτρων. Οι περιέκτες αποβλήτων μπορεί να είναι

προκατασκευασμένες μονάδες EBS ("υπερκοντέινερ") που περιέχουν απόβλητα, επικάλυψη και ρυθμιστικό υλικό σε ένα κέλυφος ή απόβλητα σε υπερκοντέινερ/περιέκτη γύρω από τον οποίο μπορεί να τοποθετηθεί ρυθμιστικό υλικό. Η μέθοδος προέκυψε σε μελέτες εναλλακτικών σχεδίων αποθήκευσης τόσο για σκληρό βράχο όσο και για άλας. Η AECL (Καναδάς) και η NUMO (Ιαπωνία) θεώρησαν και οι δύο την διάθεση σε μετρίως βαθιές γεωτήσεις χωρίς συμβατικές εργασίες επιφανειακής εκσκαφής ως πιθανή επιλογή για σκληρά πετρώματα. Η γερμανική μέθοδος για την διάθεση σε θόλους αλατιού θεωρούσε ένα πλέγμα γεωτρήσεων βάθους 300 m και στη συνέχεια αναπτύχθηκε λεπτομερώς μέχρι το 1999 ως μία από τις δύο επιλογές σχεδιασμού για το αποθετήριο Gorleben. Η χρήση της κατακόρυφης έκτασης ενός βράχου υποδοχής και (από την ιαπωνική σκοπιά) του μικρού αποτυπώματος αποθήκης με ταυτόχρονη μείωση των λειτουργιών της επιφάνειας, σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους βαθιών γεωτρήσεων - αν και, ακόμη και στη μελέτη AECL, οι γεωτρήσεις είχαν μήκος μόνο μερικές εκατοντάδες μέτρα, όχι χιλιόμετρα. Η αρχική μελέτη AECL κατέληξε στο συμπέρασμα ότι, παρόλο που η μέθοδος ήταν καταρχήν εφικτή, υπήρχαν μεγάλες αβεβαιότητες όσον αφορά την τοποθέτηση του αποθηκευτικού χώρου γύρω από τις συσκευασίες απορριμμάτων. Ως αποτέλεσμα, οι μελέτες NUMO εξέτασαν τη χρήση υπερδοχείων για την απλοποίηση της τοποθέτησης του EBS. Το DBE Technology Concept για αλάτι (Gorleben) παραμένει μια προτιμώμενη επιλογή και διαφέρει σημαντικά από τα Hard Rock Concepts καθώς δεν περιλαμβάνει ούτε buffer ούτε overpack. Η μέθοδος είναι ευέλικτη όσον αφορά την διάθεση τόσο του αναλωμένου καυσίμου όσο και του HLW. Είναι επίσης ευέλικτο όσον αφορά την εφαρμογή σε μια σειρά πετρωμάτων υποδοχής, αν και, σε ασθενέστερα πετρώματα, οι περιορισμοί στο μέγεθος των ανοιγμάτων στο βάθος μπορεί να περιορίσουν το πρακτικό βάθος για το κατώτερο σπήλαιο και επομένως το μήκος της γεώτρησης. Η σχετικά στενή συσκευασία των αποβλήτων υποδηλώνει ότι η θερμική μεταφορά εντός της γεώτρησης κατά τη διάρκεια μιας πιθανώς εκτεταμένης περιόδου θα μπορούσε να είναι ένα πρόβλημα. Οι επιπτώσεις στην τοπική ροή των υπόγειων υδάτων και στη γεωχημεία δεν έχουν ακόμη διερευνηθεί. (Baldwin, 2008).

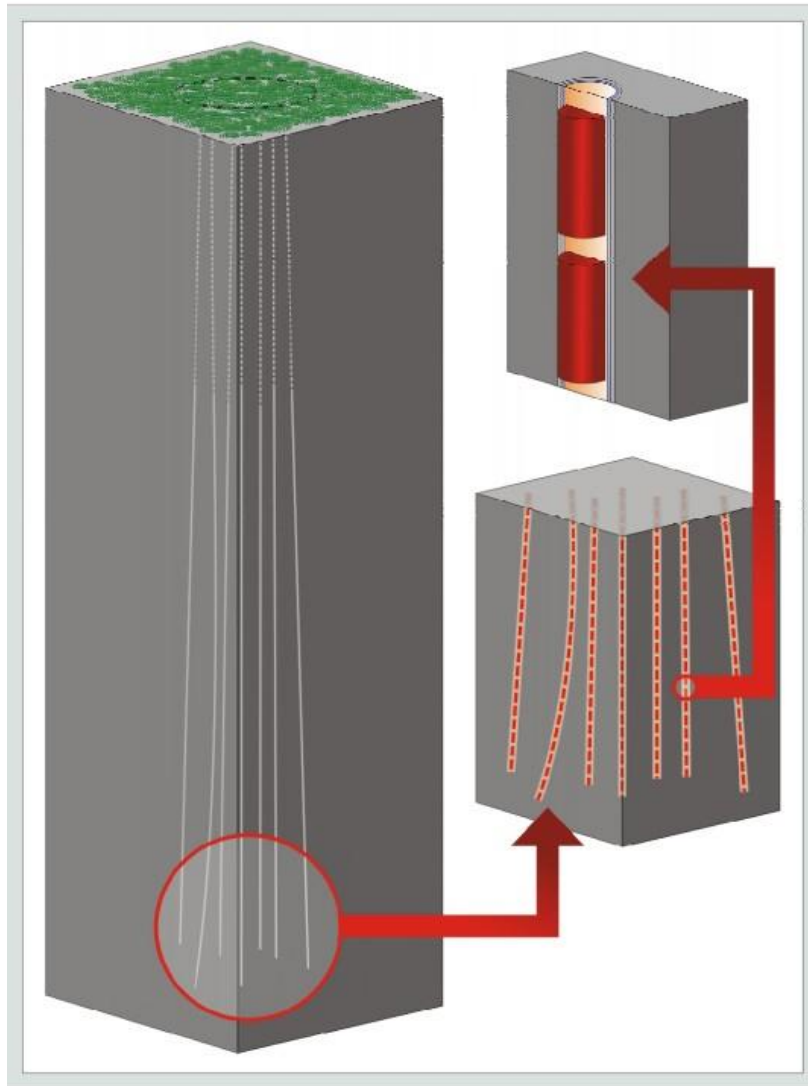


Εικόνα 22. Εξορύξεις μέσω βαθιών γεωτρήσεων

5.1.13 Πολύ βαθιές γεωτρήσεις

Απλοί περιέκτες αποβλήτων χωρίς υπερκοντέινερ τοποθετούνται στην κατώτερη περιοχή μιας γεώτρησης που έχει διανοιχθεί από την επιφάνεια σε βάθος περίπου 3 έως 5 km. Η περιοχή αυτή είναι γνωστή ως ζώνη διάθεσης (1-2km από τον πυθμένα). Η γεώτρηση είναι πλήρως υπενδεδυμένη με μεταλλικό περίβλημα σε όλο το βάθος της και θα πρέπει να έχει επαρκή διάμετρο ώστε να αφήνει έναν αρκετά μεγάλο δακτύλιο προς εξασφάλιση εύκολης τοποθέτησης. Εξετάζονται διάφορες επιλογές για την επίχωση της ζώνης διάθεσης της γεώτρησης. Το μακρύ, άνω τμήμα της γεώτρησης είναι σφραγισμένο. Εάν απαιτείται, το ανώτερο τμήμα κάθε γεώτρησης θα μπορούσε να καταστραφεί, για να διασφαλιστεί ότι τα απόβλητα είναι πρακτικά μη ανακτήσιμα. Κάθε γεώτρηση διανοίγεται είτε μεμονωμένα και κατακόρυφα είτε ως μέρος μιας συστοιχίας από μια κομβική τοποθεσία περιορισμένης επιφάνειας, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία κατευθυνόμενης γεώτρησης για την απόκλιση

των κατώτερων τμημάτων κατά μερικές μοίρες ώστε να εξασφαλίζεται ότι οι ζώνες διάθεσης σε κάθε γεώτρηση απέχουν μεταξύ τους μερικές δεκάδες μέτρα ή και περισσότερο. Αυτή η μέθοδος χρονολογείται από τις πρώτες μέρες των μελετών γεωλογικής διάθεσης. Πολλές παραλλαγές έχουν εξεταστεί, για βάθη έως και 10 km, συμπεριλαμβανομένων μεθόδων που περιλαμβάνουν τη χρήση της θερμότητας από SF ή HLW για την τήξη του βράχου σε μεγάλο βάθος και τη σφράγιση των αποβλήτων. Ωστόσο, η μεγαλύτερη προσοχή έχει δοθεί στην διάθεση ψυχόμενων αποβλήτων. Η χρήση μεγάλου βάθους γεωτρήσεων για την παροχή πολύ υψηλών επιπέδων απομόνωσης θεωρείται ως ένα γεωλογικά απομακρυσμένο και σταθερό περιβάλλον. Παρόλο που υπάρχουν αρκετές πολύ βαθιές επιστημονικές γεωτρήσεις (βαθύτερα πάνω από 12 km) σε όλο τον κόσμο που δείχνουν ότι η ικανότητα διάτρησης υφίσταται αυτή καθαυτή, δεν έχουν υπάρξει πρακτικές δοκιμές για διάθεση αποβλήτων, ούτε λεπτομερείς μελέτες διαχείρισης και ασφάλειας λειτουργίας μετά το κλείσιμο, ενώ δεν έχει αναπτυχθεί ολοκληρωμένη μέθοδος διάθεσης. Η ιδέα έχει προταθεί για SF, HLW και σχάσιμα υλικά, όπως διαχωρισμένο Pu. Ενδέχεται να υπάρχουν λειτουργικά προβλήματα με την διάθεση SF (λόγω του κλάσματος άμεσης αποδέσμευσης του SF) που καθιστούν αυτήν τη μέθοδο ελάχιστα κατάλληλη για αυτό το υλικό. Η μέθοδος φαίνεται πιο κατάλληλη για σχετικά μικρούς όγκους HLW και ιδιαίτερα κατάλληλη για σχάσιμα υλικά. Το βασικό ζήτημα αυτής της μεθόδου είναι η έλλειψη μέχρι σήμερα οποιουδήποτε λεπτομερούς σχεδιασμού ή μελέτης αξιολόγησης απόδοσης. Η ιδέα είναι ευέλικτη όσον αφορά την εφαρμογή σε μια σειρά πετρωμάτων, καθώς το βασικό ζήτημα είναι το υδρογεωλογικό περιβάλλον σε βάθος, ιδιαίτερα η έλλειψη ενεργού κίνησης των υπόγειων υδάτων, παρά οι ιδιότητες των συγκεκριμένων πετρωμάτων σε αυτό το βάθος (Baldwin, 2008).



Εικόνα 22. Πολύ βαθιές γεωτρήσεις

5.1.14 Μέθοδος εξόρυξης με διάλυμα

Σε αυτήν τη μέθοδο, μία τρύπα διατρυπάται στον σχηματισμό αλατιού, και ένα διάλυμα, όπως γλυκό νερό ή άλμη, εγχέεται στο στρώμα αλατιού. Το διάλυμα διαλύει το αλάτι, δημιουργώντας μια κοιλότητα, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διάθεση των αποβλήτων. Μόλις τα υγρά αποβλήτα τοποθετηθούν στην κοιλότητα, το πηγάδι σφραγίζεται με υλικά πλήρωσης για να αποτραπεί η απελευθέρωση ραδιενεργών υλικών.

5.2 Σχεδιασμός περιέκτη αποβλήτων

Οι περιέκτες αποβλήτων που χρησιμοποιούνται για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων θα πρέπει να είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να αντέχουν στις υψηλές θερμοκρασίες και τη

διάβρωση που δημιουργούνται από τη διάσπαση των αποβλήτων. Οι περιέκτες πρέπει επίσης να είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να αποτρέπουν τυχόν διαρροές ραδιενεργών υλικών. Ένας από τους συνήθεις σχεδιασμούς περιέκτη απορριμάτων είναι το βαρέλι από ανθρακούχο χάλυβα. Το βαρέλι χάλυβα είναι επικαλυμμένο με ένα εποξικό ή άλλο υλικό για να παρέχει πρόσθετη προστασία από τη διάβρωση. Το βαρέλι έχει επίσης σχεδιαστεί για να αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες και πίεση που παράγονται από τη διάσπαση των αποβλήτων. Ένας άλλος σχεδιασμός του περιέκτη είναι το κατασκευασμένο σύστημα φραγμού (EBS). Το EBS αποτελείται από πολλαπλά στρώματα υλικών όπως άργιλο, μπετονίτη, σκυρόδεμα και χάλυβα. Τα στρώματα είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να παρέχουν ένα εμπόδιο κατά της μετανάστευσης νερού ή αερίου και να αποτρέπουν τυχόν διαρροές ραδιενεργών υλικών. Ο σχεδιασμός των περιεκτών αποβλήτων λαμβάνει υπόψη διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των αποβλήτων, της αναμενόμενης διάρκειας ζωής του περιέκτη και των δυνητικών κινδύνων που σχετίζονται με τα απόβλητα. Συνήθως, οι περιέκτες είναι κατασκευασμένοι από υλικά που είναι ανθεκτικά στη διάβρωση, τη ζημιά από την ακτινοβολία και τη μηχανική καταπόνηση. Για παράδειγμα, τα δοχεία μπορούν να είναι κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα, τιτάνιο ή χαλκό, ανάλογα με τα ειδικά χαρακτηριστικά των αποβλήτων και τις απαιτήσεις σχεδιασμού. Οι περιέκτες μπορεί επίσης να έχουν πρόσθετα χαρακτηριστικά για να ενισχύσουν την ασφάλεια και τις επιδόσεις τους. Για παράδειγμα, οι περιέκτες μπορεί να έχουν διπλή κατασκευή, με ένα εξωτερικό κέλυφος που παρέχει ένα πρόσθετο στρώμα προστασίας και συγκράτησης. Οι περιέκτες μπορούν επίσης να διαθέτουν συστήματα εξαερισμού για την πρόληψη της συσσώρευσης πίεσης ή αερίου, καθώς και συστήματα παρακολούθησης για την ανίχνευση τυχόν διαρροών στο δοχείο. Εκτός από τον σχεδιασμό των δοχείων αποβλήτων, ο τρόπος με τον οποίο οι περιέκτες τοποθετούνται στις εγκαταστάσεις διάθεσης είναι επίσης κρίσιμος. Τα δοχεία πρέπει να τοποθετούνται προσεκτικά και να ασφαρίζονται για την πρόληψη της μετακίνησης ή της ζημίας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας τοποθέτησης και καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης. Η διαδικασία τοποθέτησης μπορεί επίσης να περιλαμβάνει τη χρήση ρυθμιστικών υλικών, όπως ο μπετονίτης, που μπορεί να βοηθήσει στην απορρόφηση τυχόν υπερβολικής υγρασίας και να παρέχει πρόσθετη θωράκιση για τα απόβλητα. Συνολικά, ο σχεδιασμός των δοχείων αποβλήτων είναι μια βασική πτυχή της υπόγειας διάθεσης των ραδιενεργών αποβλήτων. Οι περιέκτες πρέπει να είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να περιέχουν με ασφάλεια και προστασία τα ραδιενεργά απόβλητα για μεγάλο χρονικό διάστημα, προστατεύοντας τόσο την ανθρώπινη υγεία όσο και το περιβάλλον. Ο σχεδιασμός των περιεκτών θα

εξαρτηθεί από μια σειρά παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων των ειδικών χαρακτηριστικών των αποβλήτων και των απαιτήσεων σχεδιασμού, και θα πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά ως μέρος του συνολικού σχεδιασμού της εγκατάστασης διάθεσης (Arnold, 2011).

5.3 Ρυθμιστικά υλικά

Τα ρυθμιστικά υλικά διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ασφαλή διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων σε σχηματισμούς άλατος. Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται για να περιβάλλουν και για να προστατεύουν τα δοχεία αποβλήτων, παρέχοντας ένα πρόσθετο στρώμα θωράκισης και διασφαλίζοντας ότι τα απόβλητα παραμένουν ασφαλή για χιλιάδες χρόνια. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα ρυθμιστικά υλικά για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων είναι ο μπεντονίτης και το τσιμέντο. Ο μπεντονίτης είναι ένα αργιλώδες ορυκτό που είναι γνωστό για τις μοναδικές ιδιότητες διόγκωσης του. Όταν ενυδατώνεται, ο μπεντονίτης διαστέλλεται και σχηματίζει ένα πυκνό, αδιαπέραστο φράγμα που μπορεί να σφραγίσει αποτελεσματικά τα δοχεία αποβλήτων και να αποτρέψει τη μετανάστευση ραδιενεργών υλικών. Ο μπεντονίτης συνήθως τοποθετείται γύρω από τα δοχεία αποβλήτων με τη μορφή συμπαγών όγκων ή σφαιριδίων. Οι όγκοι ή τα σφαιρίδια τοποθετούνται στις σήραγγες εκσκαφής διάθεσης γύρω από τους περιέκτες αποβλήτων και στη συνέχεια συμπίεζονται για να σχηματίσουν ένα πυκνό, ομοιογενές στρώμα. Η πυκνότητα του μπεντονίτη ελέγχεται προσεκτικά για να εξασφαλιστεί ότι σχηματίζει ένα συνεχές και αποτελεσματικό φράγμα γύρω από τα δοχεία αποβλήτων. Εκτός από την παροχή ενός αδιαπέραστου φράγματος, ο μπεντονίτης έχει επίσης και άλλες ιδιότητες που τον καθιστούν ένα αποτελεσματικό ρυθμιστικό υλικό για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων. Για παράδειγμα, ο μπεντονίτης έχει χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα, που σημαίνει ότι αντιστέκεται στη ροή του νερού και βοηθά να διατηρηθούν ξηρά τα δοχεία αποβλήτων. Αυτό είναι σημαντικό επειδή το νερό μπορεί να διαβρώσει τα δοχεία αποβλήτων και να θέσει σε κίνδυνο την ακεραιότητά τους. Ο μπεντονίτης έχει επίσης καλή θερμική αγωγιμότητα, η οποία βοηθά στη διασπορά της θερμότητας που παράγεται από τη ραδιενεργό διάσπαση των αποβλήτων. Αυτό είναι σημαντικό γιατί αν τα απόβλητα γίνουν πολύ ζεστά, μπορούν να βλάψουν τα δοχεία αποβλήτων και να απελευθερώσουν ραδιενεργά υλικά στο περιβάλλον. Συνολικά, η χρήση ρυθμιστικών υλικών όπως ο μπεντονίτης είναι μια βασική πτυχή της ασφαλούς διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων σε σχηματισμούς άλατος πετρωμάτων. Τα υλικά αυτά βοηθούν στην παροχή ενός επιπλέον στρώματος προστασίας και διασφαλίζουν ότι οι κάδοι

απορριμμάτων παραμένουν ασφαλείς για χιλιάδες χρόνια. Η χρήση του μπεντονίτη έχει δοκιμαστεί εκτενώς και έχει αποδειχθεί ότι είναι ένα αποτελεσματικό και αξιόπιστο ρυθμιστικό υλικό για την διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων (Limited, 2005).

5.4 Επίχωση και σφράγιση

Η επίχωση και η σφράγιση είναι κρίσιμα βήματα στο σχεδιασμό της υπόγειας διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων σε σχηματισμούς άλατος πετρωμάτων. Αυτά τα βήματα έχουν σχεδιαστεί για να εξασφαλίσουν ότι τα απόβλητα παραμένουν ασφαλή και απομονωμένα από το περιβάλλον για χιλιάδες χρόνια. Αφού τα δοχεία αποβλήτων τοποθετηθούν στις σήραγγες διάθεσης, ο περιβάλλον χώρος γεμίζεται με ένα προσεκτικά επιλεγμένο υλικό. Το υλικό επίχωσης εξυπηρετεί διάφορους σκοπούς, όπως η παροχή μηχανικής υποστήριξης στα τοιχώματα της σήραγγας, η μείωση της ροής του νερού στη σήραγγα και η παροχή ενός πρόσθετου φραγμού για την πρόληψη της απελευθέρωσης ραδιενεργών υλικών από τα δοχεία αποβλήτων. Το υλικό επίχωσης επιλέγεται προσεκτικά με βάση τις φυσικές και χημικές του ιδιότητες. Το υλικό πρέπει να είναι σταθερό, ανθεκτικό και ανθεκτικό στη διάβρωση. Τυπικά, αποτελείται από ένα μείγμα από θρυμματισμένο πέτρωμα ή χαλίκι και μπεντονίτη. Ο μπεντονίτης χρησιμεύει ως στεγανοποιητικό μέσο, παρέχοντας ένα αδιαπέραστο φράγμα γύρω από τα δοχεία αποβλήτων για την πρόληψη της μετανάστευσης ραδιενεργών υλικών. Μετά την τοποθέτηση του υλικού πλήρωσης, το τελικό βήμα είναι η σφράγιση των σιράγγων διάθεσης. Η στεγανοποίηση γίνεται συνήθως χρησιμοποιώντας μια ποικιλία υλικών, όπως σκυρόδεμα, τσιμεντοκονίαμα ή ένα συνδυασμό και των δύο. Το υλικό στεγανοποίησης επιλέγεται προσεκτικά για να παρέχει ένα ανθεκτικό, αδιαπέραστο φράγμα που θα παραμείνει αποτελεσματικό για χιλιάδες χρόνια. Η διαδικασία στεγανοποίησης γίνεται συνήθως σε πολλαπλά στάδια, με κάθε στάδιο προσεκτικά σχεδιασμένο για να εξασφαλίσει ότι η σφράγιση είναι αποτελεσματική και ανθεκτική. Για παράδειγμα, το πρώτο στάδιο μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση τσιμεντοκονιάματος για να σφραγίσει τυχόν κενά ή ρωγμές στο υλικό πλήρωσης. Το δεύτερο στάδιο μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση σκυροδέματος για τη δημιουργία μιας ανθεκτικής και σταθερής σφραγίδας γύρω από τις σήραγγες διάθεσης. Συνολικά, η επίχωση και η σφράγιση των σιράγγων διάθεσης αποτελούν βασικά βήματα στο σχεδιασμό της υπόγειας διάθεσης των ραδιενεργών αποβλήτων σε σχηματισμούς άλατος πετρωμάτων. Τα μέτρα αυτά βοηθούν να εξασφαλιστεί ότι οι περιέκτες αποβλήτων παραμένουν ασφαλείς και απομονωμένοι από το περιβάλλον για χιλιάδες χρόνια. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για επίχωση και σφράγιση

επιλέγονται προσεκτικά με βάση τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες και η διαδικασία σφράγισης γίνεται σε πολλαπλά στάδια για να διασφαλιστεί ότι η σφράγιση είναι αποτελεσματική και ανθεκτική. Το υλικό πλήρωσης που χρησιμοποιείται για την εγκατάσταση διάθεσης θα πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά ώστε να αποτρέπεται κάθε πιθανή μετανάστευση νερού ή αερίου στις περιοχές εκκένωσης. Τα βύσματα που χρησιμοποιούνται για τη σφράγιση πρέπει να είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να παρέχουν ένα φράγμα μεταξύ των δοχείων αποβλήτων και της επιφάνειας. Ένα από τα συνήθως χρησιμοποιούμενα υλικά είναι το αλατούχο θρυμματισμένο πέτρωμα. Το αλατούχο θρυμματισμένο πέτρωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γεμίσει τις περιοχές ανασκαφής γύρω από τα δοχεία απορριμμάτων, παρέχοντας πρόσθετη υποστήριξη και σταθερότητα στην εγκατάσταση διάθεσης. Ο μπετονίτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει πιθανά κενά ή κενά στους χώρους εκσκαφής γύρω από τα δοχεία απορριμμάτων, παρέχοντας πρόσθετη προστασία από τη μετανάστευση νερού ή αερίου (Lee, 2023).

5.5 Παρακολούθηση και εποπτεία

Η παρακολούθηση και η επιτήρηση αποτελούν κρίσιμες πτυχές του σχεδιασμού της υπόγειας διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων σε σχηματισμούς άλατος. Η μακροπρόθεσμη ασφάλεια της εγκατάστασης διάθεσης εξαρτάται από την ικανότητα παρακολούθησης και ανίχνευσης τυχόν πιθανών διαρροών ή άλλων προβλημάτων. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της εγκατάστασης διάθεσης, συμπεριλαμβανομένων τεχνικών τηλεπισκόπησης, γεωφυσικών μετρήσεων και παρακολούθησης των υπόγειων υδάτων. Τεχνικές τηλεπισκόπησης, όπως η δορυφορική απεικόνιση και η αεροφωτογράφιση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση οποιωνδήποτε αλλαγών στην επιφάνεια ή καθίζησης που μπορεί να δείχνουν προβλήματα με την εγκατάσταση διάθεσης. Γεωφυσικές μετρήσεις, όπως σεισμικές έρευνες και μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση τυχόν υπογείων αλλαγών που μπορεί να υποδεικνύουν προβλήματα με τα δοχεία απορριμμάτων ή τα γύρω βράχια. Η παρακολούθηση των υπόγειων υδάτων είναι ίσως η πιο σημαντική μέθοδος παρακολούθησης της εγκατάστασης διάθεσης. Τα υπόγεια ύδατα μπορούν να χρησιμεύσουν ως μέσο μεταφοράς ραδιενεργών υλικών, επομένως η παρακολούθηση των υπόγειων υδάτων γύρω από την εγκατάσταση διάθεσης είναι απαραίτητη για τον εντοπισμό τυχόν διαρροών. Γύρω από την εγκατάσταση διάθεσης έχουν εγκατασταθεί φρεάτια παρακολούθησης και δείγματα υπόγειων υδάτων συλλέγονται και αναλύονται για

ραδιενεργούς ρύπους. Εκτός από την παρακολούθηση της ίδιας της εγκατάστασης διάθεσης, είναι επίσης σημαντικό να παρακολουθείται το περιβάλλον. Αυτό περιλαμβάνει παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα και των υδάτων στην περιοχή, καθώς επίσης της τοπικής χλωρίδας και πανίδας. Αυτή η παρακολούθηση μπορεί να ανιχνεύσει τυχόν πιθανές επιπτώσεις της εγκατάστασης διάθεσης στο περιβάλλον. Η επιτήρηση περιλαμβάνει τακτικές επιθεωρήσεις και συντήρηση της εγκατάστασης διάθεσης. Αυτό περιλαμβάνει τακτικές επιθεωρήσεις των δοχείων απορριμμάτων, των υλικών πλήρωσης και των υλικών σφράγισης. Τυχόν πιθανά προβλήματα ή ελαττώματα εντοπίζονται και αντιμετωπίζονται το συντομότερο δυνατό για την πρόληψη τυχόν διαρροών ή άλλων ζητημάτων. Συνολικά, η παρακολούθηση και η επιτήρηση είναι κρίσιμες πτυχές του σχεδιασμού της υπόγειας διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων σε σχηματισμούς άλατος πετρωμάτων. Οι μέθοδοι αυτές συμβάλλουν στη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης ασφάλειας της εγκατάστασης διάθεσης και στον εντοπισμό δυνητικών προβλημάτων πριν από την πρόκληση βλαβών στο περιβάλλον ή τη δημόσια υγεία. Η χρήση πολλαπλών μεθόδων παρακολούθησης, συμπεριλαμβανομένης της τηλεπισκόπησης, των γεωφυσικών μετρήσεων και της παρακολούθησης των υπόγειων υδάτων, παρέχει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την παρακολούθηση και την επιτήρηση. Οι τακτικές επιθεωρήσεις και η συντήρηση βοηθούν επίσης να διασφαλιστεί ότι η εγκατάσταση διάθεσης παραμένει ασφαλής και αποτελεσματική για χιλιάδες χρόνια (Hugi, 2001).

5.6 Συμμόρφωση με κανονισμούς

Η κανονιστική συμμόρφωση αποτελεί κρίσιμο στοιχείο του σχεδιασμού της υπόγειας διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων σε σχηματισμούς άλατος πετρωμάτων. Υπάρχουν πολυάριθμοι εθνικοί και διεθνείς κανονισμοί που πρέπει να ακολουθούνται για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια και η αποτελεσματικότητα της εγκατάστασης διάθεσης. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η Ρυθμιστική Επιτροπή Πυρηνικής Ενέργειας (NRC) ρυθμίζει τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων υψηλού επιπέδου, συμπεριλαμβανομένου του σχεδιασμού και της κατασκευής εγκαταστάσεων διάθεσης. Το NRC έχει θεσπίσει ένα ολοκληρωμένο σύνολο κανονισμών, το οποίο καλύπτει όλες τις πτυχές της εγκατάστασης διάθεσης, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής χώρων, το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία και το κλείσιμο. Ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (ΙΑΕΑ) διαδραματίζει επίσης ρόλο στη ρύθμιση της διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων. Ο ΔΟΑΕ έχει θεσπίσει ένα σύνολο προτύπων ασφάλειας, γνωστά ως Διεθνή Βασικά Πρότυπα Ασφάλειας για την

Προστασία από τις Ιονίζουσες Ακτινοβολίες και για την Ασφάλεια των Πηγών Ακτινοβολίας. Ένα άλλο κανονιστικό πλαίσιο είναι το ρυθμιστικό πλαίσιο της Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA) των ΗΠΑ για την διάθεση των ραδιενεργών αποβλήτων. Το ρυθμιστικό πλαίσιο της EPA προβλέπει την προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος από τους πιθανούς κινδύνους των ραδιενεργών αποβλήτων. Τα πρότυπα αυτά παρέχουν καθοδήγηση για όλες τις πτυχές της εγκατάστασης διάθεσης, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής του χώρου, το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία και το κλείσιμο. Εκτός από τους εθνικούς και διεθνείς κανονισμούς, μπορεί επίσης να υπάρχουν κρατικοί και τοπικοί κανονισμοί που πρέπει να τηρούνται. Οι κανονισμοί αυτοί μπορεί να περιλαμβάνουν κανονισμούς για τη χωροταξία και τη χρήση γης, περιβαλλοντικούς κανονισμούς και άλλες απαιτήσεις. Η συμμόρφωση με τις κανονιστικές απαιτήσεις περιλαμβάνει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για το σχεδιασμό και την κατασκευή της εγκατάστασης διάθεσης. Αυτό περιλαμβάνει τη διεξαγωγή εκτεταμένων μελετών και αξιολογήσεων για τον προσδιορισμό της καταλληλότητας του χώρου, τον σχεδιασμό της εγκατάστασης ώστε να πληροί όλους τους ισχύοντες κανονισμούς και πρότυπα και τη διασφάλιση ότι όλες οι κατασκευαστικές και επιχειρησιακές δραστηριότητες συμμορφώνονται με τις κανονιστικές απαιτήσεις. Αυτό περιλαμβάνει επιθεωρήσεις από ρυθμιστικούς φορείς, καθώς και αυτοαξιολογήσεις και επιθεωρήσεις από τον φορέα διαχείρισης της μονάδας. Συνοπτικά, η ρυθμιστική συμμόρφωση αποτελεί βασική πτυχή του σχεδιασμού της υπόγειας διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων σε σχηματισμούς άλατος πετρωμάτων. Η συμμόρφωση με τους εθνικούς και διεθνείς κανονισμούς, καθώς και με τις κρατικές και τοπικές απαιτήσεις, είναι απαραίτητη για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια και η αποτελεσματικότητα της εγκατάστασης διάθεσης. Απαιτείται ολοκληρωμένη προσέγγιση για το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία και το κλείσιμο, καθώς και συνεχής παρακολούθηση και επιθεωρήσεις, προκειμένου να διατηρηθεί η κανονιστική συμμόρφωση και να εξασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη ασφάλεια της εγκατάστασης διάθεσης.

6.Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην ανάλυση των δυνατοτήτων τελικής διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων σε γεωλογικούς σχηματισμούς μεγάλου βάθους, με ιδιαίτερη έμφαση στους σχηματισμούς άλατος. Οι σχηματισμοί ορυκτών αλάτων αποτελούν μια βιώσιμη επιλογή για την τελική διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων. Οι ευνοϊκές τους ιδιότητες, σε συνδυασμό με την εκτεταμένη έρευνα και τις τεχνολογικές εξελίξεις, προσφέρουν μια πολλά υποσχόμενη λύση για μακροπρόθεσμη απομόνωση και συγκράτηση επικίνδυνων υλικών.

Μέσα από εξέταση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, των δεδομένων και των ερευνητικών ευρημάτων, έχουν προκύψει αρκετές βασικές γνώσεις και συμπεράσματα. Πιο συγκεκριμένα δίνονται τα ακόλουθα:

- Οι σχηματισμοί ορυκτών αλάτων παρουσιάζουν πολλά ελπιδοφόρα χαρακτηριστικά για την τελική διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων λόγω της στεγανότητάς τους, των ιδιοτήτων αυτοσφράγισης και της μακροπρόθεσμης σταθερότητάς τους. Οι σχηματισμοί αυτοί έχουν μελετηθεί εκτενώς και αξιοποιηθεί για διάφορους βιομηχανικούς σκοπούς, όπως η αποθήκευση υδρογονανθράκων, αποδεικνύοντας την ενδεχόμενη καταλληλότητά τους για μακροπρόθεσμη απομόνωση ραδιενεργών αποβλήτων.
- Η ανάλυση διαφόρων μελετών και πειραματικών ερευνών σχετικά με τις εγκαταστάσεις εναπόθεσης σε σχηματισμούς άλατος έχουν αποδείξει ότι έχουν ευνοϊκές επιδόσεις όσον αφορά τη συγκράτηση και την ακεραιότητα των φραγμάτων. Οι χαμηλοί ρυθμοί διάχυσης των ραδιονουκλεϊδίων στους σχηματισμούς άλατος, σε συνδυασμό με την ικανότητα του περιβάλλοντος βράχου να επιβραδύνει τη μετανάστευση τους, συμβάλλουν στη βελτίωση της ασφάλειας και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
- Οι γεωλογικές, γεωχημικές και γεωμηχανικές ιδιότητες των σχηματισμών άλατος έχουν ερευνηθεί εκτενώς, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για τη συμπεριφορά τους υπό μακροχρόνιες συνθήκες αποθήκευσης. Οι μελέτες αυτές έχουν βοηθήσει στην ανάπτυξη εξελιγμένων μοντέλων και προσομοιώσεων για την πρόβλεψη των επιδόσεων και της σταθερότητας αυτών των αποθηκών, υποστηρίζοντας περαιτέρω τη σκοπιμότητα της βαθιάς γεωλογικής διάθεσης σε σχηματισμούς άλατος.

Ωστόσο, παρά τα πολυάριθμα πλεονεκτήματα, είναι ζωτικής σημασίας να αναγνωριστούν πιθανές προκλήσεις και αβεβαιότητες που σχετίζονται με τη διάθεση ραδιενεργών

αποβλήτων σε σχηματισμούς αλατιού. Σε αυτά περιλαμβάνονται η ανάγκη διασφάλισης της μακροπρόθεσμης ακεραιότητας των δοχείων αποβλήτων, η πιθανότητα διείσδυσης στα υπόγεια ύδατα και επακόλουθης κινητοποίησης ραδιονουκλεϊδίων και η πιθανότητα ρωγμάτωσης εντός του σχηματισμού άλατος. Οι παράγοντες αυτοί απαιτούν προσεκτική μελέτη και συνεχή έρευνα για τον αποτελεσματικό μετριασμό των κινδύνων. Η συνέχιση της διεπιστημονικής έρευνας, οι αυστηρές αξιολογήσεις ασφάλειας και η συμμετοχή των ενδιαφερόμενων μερών θα είναι ουσιαστικής σημασίας για την εξασφάλιση της επιτυχούς εφαρμογής των βαθιών γεωλογικών αποθετηρίων στους σχηματισμούς άλατος.

7.Βιβλιογραφία

Arnold Bill W., Patrick V. Brady, Stephen J. Bauer, Courtney Herrick, Stephen Pye, and John Finger "Reference design and operations for deep borehole disposal of high-level radioactive waste [Βιβλίο]. - Albuquerque, NM : SAND2011-6749, Sandia National Laboratories, 2011.

Ash Patricia The influence of radiation on fertility in man [Άρθρο] // The British journal of radiology. - [s.l.] : The British Institute of Radiology, 1980. - 628 : Τόμ. 53.

Baldwin T., N. Chapman, and F. Neall Geological disposal options for high-level waste and spent fuel [Έκθεση]. - [s.l.] : Report for the UK Nuclear Decommissioning Authority, 2008.

BEIR.V Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation [Βιβλίο]. - Washington (DC) : National Academies Press (US), 1990.

Borojević Šostarić Sibila, and Franz Neubauer Principle rock types for radioactive waste repositories [Άρθρο] // Rudarsko-geološko-naftni zbornik 24, no. 1. - 2012. - σσ. 11-18.

Bourg Ian C. Sealing shales versus brittle shales: a sharp threshold in the material properties and energy technology uses of fine-grained sedimentary rocks. [Άρθρο] // Environmental Science & Technology Letters 2, no. 10. - 2015. - σσ. 255-259.

Bréchnignac François Addressing ecological effects of radiation on populations and ecosystems to improve protection of the environment against radiation: Agreed statements

from a Consensus Symposium. [Άρθρο] // Journal of environmental radioactivity . - 2016. - σσ. 21-29..

Brookins Douglas G. Geochemical aspects of radioactive waste disposa [Βιβλίο]. - [s.l.] : Springer Science & Business Media, 2012.

Chapman Neil, and Alan Hooper The disposal of radioactive wastes underground [Άρθρο] // Proceedings of the Geologists' Association 123.1. - 2012. - σσ. 46-63.

Daniel David Edwin, ed. Geotechnical practice for waste disposal [Βιβλίο]. - [s.l.] : Springer Science & Business Media, 2012.

Dellamano José Claudio, and Gian-Maria AA Sord Optimization of radioactive waste storage [Άρθρο] // Health Physics 92, no. 2. - 2007. - σσ. 27-36.

Donnelly Elizabeth H., Jeffrey B. Nemhauser, James M. Smith, Ziad N. Kazzi, Eduardo B. Farfan, Arthur S. Chang, and Syed F. Naeem Acute radiation syndrome: assessment and management [Άρθρο] // Southern medical journal. - 2010. - 203. - Τόμ. 6.

EPA Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle [Έκθεση]. - [s.l.] : United States Environmental Protection Agency, 2014.

Geras'kin Stanislav A. Ecological effects of exposure to enhanced levels of ionizing radiation [Άρθρο] // Journal of environmental radioactivity. - 2016. - σσ. 347-357.

Giusti L A review of waste management practices and their impact on human health [Άρθρο] // Waste management. - [s.l.] : Elsevier, 2009. - 8 : Τόμ. 28.

Gofman J.W. Radiation and human health [Βιβλίο]. - 1981.

Harrison Roy M Pollution: causes, effects and control [Βιβλίο]. - [s.l.] : Royal society of chemistry, 2001.

Henriksen T Radiation and health [Βιβλίο]. - [s.l.] : CRC Press., 2002.

Hosan Md Iqbal Radioactive waste classification, management and environment [Άρθρο] // Engineering International 5, no. 2. - 2017. - σσ. 53-62.

Hu Qin-Hong, Jian-Qing Weng, and Jin-Sheng Wang. Sources of anthropogenic radionuclides in the environment: a review [Άρθρο] // Journal of environmental radioactivity. - [s.l.] : Elsevier, 2010. - σσ. 426-437.

Hugi Markus, Piet Zuidema, Markus Fritschi, Andreas L. Nold, and Emil Kowalski. Surveillance of a deep geological repository for radioactive waste. [Συνέδριο] // Proceedings of WM 1. - Tucson, AZ : EKRA, 2001.

IAEA GUIDE, DRAFT SAFETY. "Monitoring and surveillance of radioactive waste disposal facilities [Βιβλίο]. - [s.l.] : IAEA, 2013.

IAEA Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management [Εκθεση]. - VIENNA : INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2022.

Kufe DW Pollock RE, Weichselbaum RR, et al., editors. Holland-Frei Cancer Medicine. 6th edition [Βιβλίο]. - [s.l.] : BC Decker, 2003. - Τόμ. 2.

L'Annunziata Michael F Handbook of radioactivity analysis [Βιβλίο]. - [s.l.] : Academic press, 2012.

L'Annunziata Michael F Radioactivity: introduction and history, from the quantum to quarks [Βιβλίο]. - [s.l.] : Elsevier, 2016.

Lee Gi-Jun, Seok Yoon, Taehyun Kim, and Seeun Chang Investigation of the various properties of several candidate additives as buffer materials [Άρθρο] // Nuclear Engineering and Technology 55, no. 3 . - 2023. - σσ. 1191-1198..

Limited United Kingdom Nirex Outline Design for a Reference [Εκθεση]. - [s.l.] : United Kingdom Nirex Limited, 2005.

Limoli C.L., Giedzinski, E., Rola, R., Otsuka, S., Palmer, T.D. and Fike, J.R. Radiation response of neural precursor cells: linking cellular sensitivity to cell cycle checkpoints, apoptosis and oxidative stress [Άρθρο] // Radiation research. - [s.l.] : Radiation Research Society, 2004. - 1 : Τόμ. 161.

Marschall P., S. Horseman, and Thomas Gimmi. Characterisation of gas transport properties of the Opalinus Clay, a potential host rock formation for radioactive waste disposal. [Άρθρο] // Oil & gas science and technology 60, no. 1. - 2005. - σσ. 121-139.

McCartin Timothy, Tadesse, Rebecca, Li, Jinfeng, Umeki, Hiroyuki, Bilbao y Leon, Sama, & Palos, Gabriella Management and disposal of high-level radioactive waste: Global progress and solutions (NEA--7532) [Έκθεση]. - [s.l.] : Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA), 2020.

Mettler F.A Medical effects and risks of exposure to ionising radiation. [Άρθρο] // Journal of Radiological Protection. - [s.l.] : IOP Publishing Ltd, 2012. - 32. - 9 : Τόμ. 1.

Miller William, Russell Alexander, Neil Chapman, John C. McKinley, and J. A. T. Smellie Geological disposal of radioactive wastes and natural analogues. Vol. 2 [Βιβλίο]. - [s.l.] : Elsevier, 2000.

NDA Radioactive Waste in the UK: A summary of the 2010 Inventory [Έκθεση]. - [s.l.] : Nuclear Decommissioning Authority, 2010.

Pusch Roland. Geological storage of highly radioactive waste: current concepts and plans for radioactive waste disposal [Βιβλίο]. - [s.l.] : Springer, 2009.

Rao T. Subba, S. Panigrahi, and P. Velraj. Transport and disposal of radioactive wastes in nuclear industry [Άρθρο] // Microbial biodegradation and bioremediation. - 2022. - σσ. 419-440.

Rempe Norbert T. Permanent underground repositories for radioactive waste [Έκθεση]. - [s.l.] : Elsevier, 2007.

Saling James Radioactive waste management [Βιβλίο]. - [s.l.] : CRC Press, 2001.

Sundqvist Göran The bedrock of opinion: science, technology and society in the siting of high-level nuclear waste. Vol. 32 [Βιβλίο]. - [s.l.] : Springer Science & Business Media, 2002.

Thomauske Bruno R. Realization of the German concept for interim storage of spent nuclear fuel-Current situation and prospects [Συνέδριο] // Waste Management 2003 Symposium. - Tucson, AZ : [s.n.], 2003.

Tsang Chin-Fu, Frederic Bernier, and Christophe Davies. Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and

plastic clays—in the context of radioactive waste disposal. [Άρθρο] // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 42, no. 1. - 2005. - σσ. 109-125.

Tsang Chin-Fu, Ivars Neretnieks, and Yvonne Tsang Hydrologic issues associated with nuclear waste repositories. [Άρθρο] // Water Resources Research 51.9. - 2015. - σσ. 6923-6972.

UNSCEAR Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation [Έκθεση]. - 2010.

Μπενάρδος Α. Μέθοδοι Υπόγειας Εκμετάλλευσης—Ελληνικές Εκμεταλλεύσεις [Βιβλίο]. - Αθήνα : Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ, 2014.