



Ραδιολογικές επιπτώσεις λόγω της
διάθεσης αντιπροσωπευτικού
αποθέματος ραδιενεργών
αποβλήτων σε μικρό η μεσαίο
βάθος

Τομέας: Πυρηνικής Τεχνολογίας

Επιβλέπων: Μητράκος Δημήτριος, Επίκουρος καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2022

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Καλαμαράς Α. Βασίλειος

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή.....	5
1.1	Ελληνική Εισαγωγή.....	5
1.2	English Introduction.....	6
2.	Ραδιενεργά Απόβλητα.....	7
2.1	Ραδιενεργά Απόβλητα.....	7
2.2	Ραδιενεργά Απόβλητα στην Ελλάδα	8
2.3	Τρόποι Διάθεσης Ραδιενεργών Αποβλήτων	9
2.4	Εθνικό πρόγραμμα Διαχείρισης Ραδιενεργών Αποβλήτων	11
2.5	Παραδείγματα Εγκαταστάσεων Διάθεσης Κοντά στην Επιφάνεια	13
2.5.1	Ισπανία - El Cabril	13
2.5.2	Βουλγαρία - Novi Han	14
3.	Εγκατάσταση Διάθεσης Κοντά στην Επιφάνεια	16
3.1	Γενική Ιδέα	16
3.2	Αντιπροσωπευτικό Απόθεμα Ραδιενεργών Αποβλήτων	16
3.3	Όγκος εγκατάστασης.....	18
3.4	Τεχνητά Φράγματα Εγκατάστασης	20
3.4.1	Χαρακτηριστικά φραγμάτων	20
3.4.2	Υλικά - Γεωμετρία Τεχνητής Κάλυψης (Θωράκισης).....	21
3.4.3	Χρονικό Πλαίσιο Θωράκισης	23
3.5	Τοπολογία-Σχεδιασμός	24
3.6	Σενάριο Έκθεσης.....	26
3.6.1	Οδοί Έκθεσης.....	26
3.6.2	Συντελεστής Κατανομής Στερεού - Υγρού (Kd)	28
3.6.3	Συγκεντρώσεις - Χρόνοι Ημιζωής - Kd Ραδιονουκλιδίων	29
3.7	RESRAD-OFFSITE	30
3.7.1	Όρος Πηγής	30
3.7.2	Μοντελοποίηση Περιοχής Πρωτογενούς Ρύπανσης	33
4.	Αποτελέσματα	36
4.1	Βασικό σενάριο.....	36
4.1.1	Συνολική δόση	36
4.1.2	Ra-226.....	38
4.1.3	Ag-108m	40
4.1.4	Υπόλοιπα ραδιονουκλίδια	42
4.2	Ανάλυση Ευαισθησίας σε Παράγοντες	48
4.2.1	Απόσταση πηγαδιού.....	48

4.2.2	Πάχος ακόρεστης ζώνης.....	52
4.3	Διάθεση γεώτρησης για το Ra-226.....	55
4.4	Διάβρωση Ag-108m.....	59
5.	Συμπεράσματα.....	64
6.	Κατάλογος Πινάκων.....	66
7.	Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	67
8.	Κατάλογος Εικόνων	68
9.	Κατάλογος Αναφορών	69

1. Εισαγωγή

1.1 Ελληνική Εισαγωγή

Η ταχύτατη τεχνολογική και επιστημονική ανάπτυξη που παρατηρείται παγκοσμίως, έχει φέρει ως αποτέλεσμα το αυξημένο ενδιαφέρον πολλών χωρών στον κόσμο, για την πυρηνική ενέργεια ως τρόπο ηλεκτροπαραγωγής. Συγχρόνως ο άνθρωπος έρχεται σε επαφή με πολλές πηγές ραδιενέργειας η οποία μπορεί να προκύπτει από διάφορες καθημερινές δραστηριότητες, καθώς τα ραδιενεργά υλικά συναντώνται σε πληθώρα εφαρμογών, (π.χ. εφαρμογές της πυρηνικής ιατρικής, αλεξικέραυνα κ.α.) (ΕΕΑΕ, eea.gr, 2021). Ωστόσο, όταν τα υλικά αυτά δεν είναι πλέον χρήσιμα, μετατρέπονται σε ραδιενεργά απόβλητα, τα οποία χρήζουν ιδιαίτερης μεταχείρισης αφού μπορούν να αποβούν βλαβερά για την υγεία των ζωντανών οργανισμών που έρχονται σε επαφή είτε άμεσα είτε έμμεσα.

Η Ελλάδα ως μία μη πυρηνική χώρα, έχει στην κατοχή της κάποιο όγκο ραδιενεργών αποβλήτων των οποίων η προέλευση είναι κυρίως από συμβατικές εφαρμογές. Κάποια από αυτά τα υλικά μπορούν να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν, ενώ τα υπόλοιπα πρέπει να αποτεθούν οριστικά, έργα τα οποία πρέπει να πραγματοποιηθούν σύμφωνα με του παγκόσμιου οργανισμού ατομικής ενέργειας (ΙΑΕΑ) (ΙΑΕΑ, POLICIES AND STRATEGIES FOR RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT, 2009) αλλά και με βάση τη δημοσιευμένη Ευρωπαϊκή οδηγία (ΟΔΗΓΙΑ 2011/70/ΕΥΡΑΤΟΜ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ, 2011).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάζονται οι ραδιολογικές επιπτώσεις λόγω της διάθεσης αντιπροσωπευτικών ραδιενεργών αποβλήτων στη χώρα, λαμβάνοντας υπόψη τις προβλέψεις του Εθνικού Προγράμματος για τη Διάθεση Ραδιενεργών Αποβλήτων (ΕΕΑΕ, “Εθνικό Πρόγραμμα” για τη διαχείριση αναλωθέντων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων- Σχέδιο δεύτερο, 2020). Εξετάζεται μία ρεαλιστική προσέγγιση ως σενάριο έκθεσης από μία τέτοια εγκατάσταση και εκτιμώνται οι κίνδυνοι που μπορούν να προκύψουν ύστερα από το κλείσιμο αυτής. Για την εκτίμηση της έκθεσης του πληθυσμού, θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα RESRAD-OFFSITE, μέσω του οποίου θα γίνει ανάλυση για την επίδραση κάθε ραδιονουκλιδίου, ενώ θα εξεταστούν και διαφορετικά μοντέλα, ώστε να διαπιστωθεί πλήρως η επίδραση που έχουν οι διάφοροι παράμετροι στον ραδιολογικό αντίκτυπο.

1.2 English Introduction

The rapid technological and scientific development observed worldwide has resulted in growing interest of many countries around the world, for nuclear energy as a way of generating electricity. At the same time human comes into contact with many sources of radioactivity which can occur from various daily activities as radioactive materials are found in a variety of applications (e.g. applications of nuclear medicine, lightning rods etc.). However, when these materials are no longer useful, they become radioactive waste and needs special treatment as they can be harmful to the health of living organisms that come in contact either directly or indirectly.

Greece, as a non-nuclear country, has in its possession a volume of radioactive waste whose origin is mainly from daily applications. Some of these materials can be recycled and reused, while the rest must be disposed of permanently, projects to be carried out in accordance with the International Atomic Energy Agency (IAEA) (IAEA, POLICIES AND STRATEGIES FOR RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT, 2009) but also on the basis of the published European Directive (ΟΔΗΓΙΑ 2011/70/ΕΥΡΑΤΟΜ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ, 2011)

In this dissertation, the radiological effects due to the disposal of representative radioactive waste in the country are examined, taking into account the forecasts of the National Program for Disposal of Radioactive Waste (ΕΕΑΕ, “Εθνικό Πρόγραμμα” για τη διαχείριση αναλωθέντων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων- Σχέδιο δεύτερο, 2020). A realistic approach is considered as an exposure scenario from such an installation and the risks that may arise after its closure are assessed. To estimate the population exposure, the RESRAD-OFFSITE program will be used, through which the effect of each radionuclide will be analyzed, while different models will be examined, in order to fully determine the effect of the various parameters on the radiological impact.

2. Ραδιενεργά Απόβλητα

2.1 Ραδιενεργά Απόβλητα

Τα ραδιενεργά απόβλητα είναι τα εναπομείναντα προϊόντα που προκαλούνται από ανθρώπινες δραστηριότητες με ραδιενεργά υλικά (ΕΕΑΕ, eeae.gr). Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται σε μεγάλο πλήθος διεργασιών, που αφορούν κυρίως τους παρακάτω τομείς:

- Πυρηνική ιατρική (π.χ. ραδιοφάρμακα, ακτινοθεραπεία)
- Βιομηχανία (π.χ. ραδιογράφιση, ποιοτικό έλεγχο προϊόντων)
- Έρευνα και Εκπαίδευση (π.χ. πειράματα βιολογίας)
- Εξειδικευμένες εφαρμογές (π.χ. ραδιοχρονολόγηση)

Τα ραδιονουκλίδια, απομειώνονται με διαφορετικό ρυθμό το καθένα, ανάλογα με τον **χρόνο ημιζωής τους**. Ως χρόνος ημιζωής, ορίζεται ο χρόνος που χρειάζεται ένα νουκλίδιο, ώστε στο πέρασμά του να έχει απομείνει η μισή ποσότητα από αυτή που υπήρχε αρχικά. Ο χρόνος αυτός μπορεί να είναι από πολύ μικρός (π.χ. K_r-81m 13 δευτερόλεπτα) έως και πάρα πολύ μεγάλος (π.χ. U-238 4.5 δισεκατομμύρια έτη) (Garrison, 2007). Τα ραδιενεργά απόβλητα με μικρό χρόνο ημιζωής δεν αποτελούν ιδιαίτερο πρόβλημα, καθώς τα περισσότερα μπορούν να αποδεσμευτούν προς το περιβάλλον ύστερα από την αποθήκευσή τους για το απαραίτητο χρονικό διάστημα. Όσα όμως έχουν μεγάλο χρόνο ημιζωής, δημιουργούν κινδύνους τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα. Η τελική λύση για τη διαχείρισή τους όπως πλέον είναι αποδεκτό σε Ευρωπαϊκό (ΟΔΗΓΙΑ 2011/70/ΕΥΡΑΤΟΜ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ, 2011) και διεθνές (ΙΑΕΑ, POLICIES AND STRATEGIES FOR RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT, 2009) επίπεδο είναι η οριστική διάθεση σε εγκεκριμένη εγκατάσταση, που πληροί τις απαιτήσεις ασφαλείας για επαρκές χρονικό ορίζοντα στο μέλλον.

Με βάση το χρόνο ημιζωής, τα ραδιενεργά απόβλητα χωρίζονται στις εξής κατηγορίες (ΙΑΕΑ, Classification of Radioactive waste, 2009):

1. Πολύ βραχύβια απόβλητα (Very Short Lived Waste, VSLW)
2. Πολύ χαμηλού επιπέδου απόβλητα (Very Low Level Waste, VLLW)
3. Χαμηλού επιπέδου απόβλητα (Low Level Waste, LLW)
4. Μετρίου επιπέδου απόβλητα (Intermediate Level Waste, ILW)
5. Υψηλού επιπέδου απόβλητα (High Level Waste, HLW)

Υπάρχει και μία ακόμα κατηγορία, αυτή των εξαιρούμενων αποβλήτων (exempt waste), τα οποία δεν χρειάζονται διαχείριση, αλλά μπορούν να απελευθερωθούν ως κοινά απόβλητα. Για τον λόγο αυτό, δεν συμπεριλαμβάνονται στις πέντε παραπάνω βασικές κατηγορίες.

2.2 Ραδιενεργά Απόβλητα στην Ελλάδα

Τα ραδιενεργά απόβλητα, σε μια μη πυρηνική χώρα όπως η Ελλάδα, προκύπτουν κυρίως από εγκεκριμένες πρακτικές ιοντιζουσών ακτινοβολιών. Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρέχει η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ, eeae.gr, 2021) ήδη υπάρχουν ή αναμένεται να δημιουργηθούν στο μέλλον:

- **Στερεά και Υγρά Ραδιενεργά Απόβλητα** που προέρχονται από τις προηγούμενες δραστηριότητες και τη λειτουργία του ερευνητικού αντιδραστήρα GRR-1 του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος». Ενδεικτικά, αναφέρονται ρητίνες, ιζήματα, ιστορικά κατάλοιπα, ενεργοποιημένα και ραδιορυσασμένα υλικά τα οποία εκτιμάται ότι είναι VLLW,LLW.
- **Ραδιενεργά Υλικά**, όπως ενδεικτικά ραδιενεργά αλεξικέραυνα, πυραυλιχνευτές, συσκευές με φθορίζοντα υλικά.
- **Ραδιενεργά Υλικά που θα προκύψουν από την αποξήλωση του ερευνητικού αντιδραστήρα** του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» και άλλων εγκαταστάσεων (π.χ. κύκλοτρα για παραγωγή ισοτόπων) τα οποία θα ανήκουν στα VLLW,LLW και σε πιο μικρές ποσότητες ILW.
- **Νοσοκομειακά Ραδιενεργά Απόβλητα** που προέρχονται από νοσηλευτικά ιδρύματα και ιατρικά κέντρα κατά την πραγματοποίηση διαγνωστικών εξετάσεων ή θεραπειών (π.χ. πυρηνικής ιατρικής), καθώς και αναλώσιμα υλικά όπως γάντια, σύριγγες και μάσκες που χρησιμοποιούνται κατά τη χορήγηση ραδιοφαρμάκων. Επειδή τα περισσότερα από αυτά αποτελούν βραχύβια ραδιενεργά απόβλητα (VSLW), συνήθως δεν αποτελούν μεγάλο πρόβλημα, καθώς γίνεται διαχείριση εντός του νοσοκομείου και στη συνέχεια μπορούν να αποδεσμευτούν.
- **Ραδιενεργές πηγές εκτός χρήσης, ορφανές πηγές και ραδιενεργά υλικά**, τα οποία φυλάσσονται προσωρινά στις εγκαταστάσεις των κατόχων τους, συμπεριλαμβανομένης της Εγκατάστασης Διαχείρισης Ραδιενεργών Πηγών και Αποβλήτων του ΙΠΡΕΤΕΑ του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», αλλά η προτιμητέα διαχείριση είναι να ανακυκλωθούν και να ξαναχρησιμοποιηθούν πριν

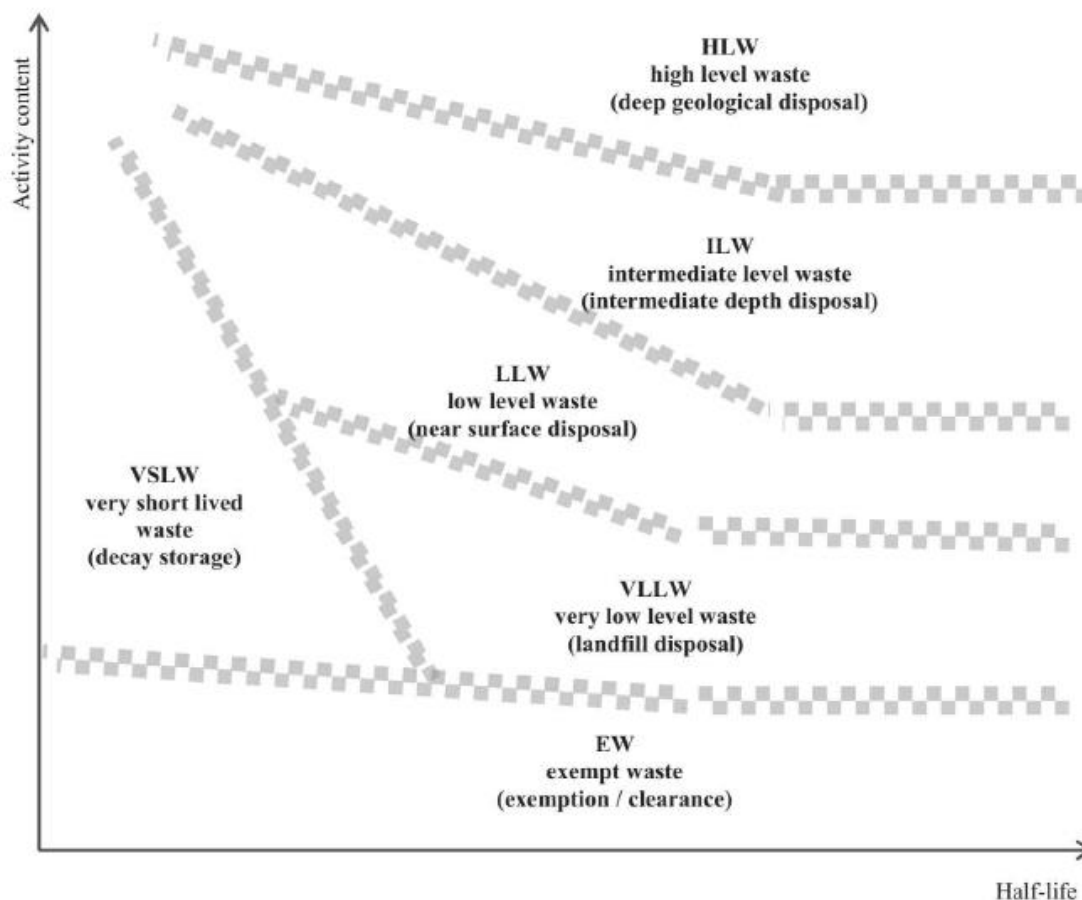
καταλήξουν να θεωρούνται ραδιενεργά απόβλητα, κάτι το οποίο δεν μπορεί να γίνει στην Ελλάδα, λόγω απουσίας κάποια σχετικής μονάδας ανακύκλωσης.

2.3 Τρόποι Διάθεσης Ραδιενεργών Αποβλήτων

Ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκουν τα απόβλητα, υπάρχουν και οι ενδεδειγμένοι τρόποι διαχείρισης αυτών, οι οποίοι είναι οι εξής (WNA, 2021), (IAEA, POLICIES AND STRATEGIES FOR RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT, 2009):

1. **Ειδική Διάθεση σε Χωματερή:** Παρόμοια με μία συμβατική εγκατάσταση υγειονομικής ταφής βιομηχανικών απορριμμάτων. Χρησιμοποιείται για απόβλητα κατηγορίας VLLW τα οποία έχουν χαμηλές συγκεντρώσεις ραδιενεργού υλικού και είναι κυρίως χώμα και μπάζα, που προκύπτουν κατά τον παροπλισμό εγκαταστάσεων.
2. **Διάθεση Κοντά στην Επιφάνεια:** Συνήθως αποτελείται από τάφρους ή θόλους κατασκευασμένα στην επιφάνεια του εδάφους ή σε μερικά δεκάδες μέτρα κάτω από το έδαφος και αφορούν απόβλητα κατηγορίας LLW έως ILW.
3. **Βαθιά Γεωλογική Διάθεση:** Γίνεται σε σταθερούς γεωλογικούς σχηματισμούς σε μεγάλο βάθος που μπορεί να φτάνει τις εκατοντάδες μέτρα. Τα απόβλητα τοποθετούνται τούνελ, όπου πέραν των φυσικών υλικών που τα προστατεύουν (π.χ. πέτρα, χώμα, άργιλος) το σύστημα γεμίζεται συνήθως με τσιμέντο για παραπάνω προστασία. Τέτοιες εγκαταστάσεις μπορούν να περιέχουν μέχρι και υψηλού επιπέδου απόβλητα (HLW), ενώ δεν χρειάζονται καθόλου ενεργητικό έλεγχο και συντήρηση της εγκατάστασης, απαλλάσσοντας τις επόμενες γενιές από αυτό το πρόβλημα.
4. **Διάθεση Γεώτρησης:** Αποτελείται από μία ενιαία, ή πολλαπλές γεωτρήσεις, οι οποίες έχουν βάθος από μερικές δεκάδες έως και εκατοντάδες μέτρα, όπου μέσα σε κυλινδρικούς μεταλλικούς σωλήνες τοποθετούνται τα δοχεία αποθήκευσης των αποβλήτων. Χρησιμοποιούνται για μικρούς όγκους αποβλήτων και συχνά είναι υποστηρικτικοί σε μία άλλη εγκατάσταση, για την απομόνωση συγκεκριμένων πηγών, που χρειάζονται ειδική διαχείριση.

Οι παραπάνω τρόποι διάθεσης παρουσιάζονται με βάση την κατηγορία αποβλήτων που αφορούν στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 1: Τρόποι Διάθεσης με βάση την κατηγορία Ραδιενεργών Αποβλήτων (IAEA, Classification of Radioactive waste, 2009)

Ωστόσο, γίνεται εκτεταμένη έρευνα, ώστε στο μέλλον να βρεθούν ακόμα πιο αποτελεσματικοί τρόποι διαχείρισης, εστιασμένοι πάνω στις διαφορετικές ιδιότητες που μπορεί να παρουσιάζουν τα ραδιενεργά απόβλητα μεταξύ τους. Μερικοί από αυτούς παρουσιάζονται περιληπτικά παρακάτω (WNA, 2021):

1. **Μακροπρόθεσμη Διάθεση πάνω από το έδαφος:** Καθώς η δομή βρίσκεται στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους, γίνεται πιο εύκολη η διαχείριση και η ανθρώπινη επέμβαση σε περίπτωση αστοχίας, ενώ παράλληλα έχει χαμηλότερο κόστος και μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές που δεν έχουν τα γεωλογικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται, για να υπάρχει μία φυσική μορφή προστασίας. Ωστόσο, μία τέτοια εγκατάσταση θα χρειαζόταν επίβλεψη για πολλά χρόνια και αρκετές γενιές. Για τον λόγο αυτό, ο τρόπος αυτός χρησιμοποιείται μόνο για προσωρινή διάθεση, ενώ στη Γαλλία πραγματοποιούνται έρευνες για τη χρήση του τρόπου αυτού.

2. **Τήξη Βράχου:** Η ιδέα είναι ότι τα ραδιενεργά απόβλητα μπορούν, αφού αποκτήσουν μια πιο αραιωμένη μορφή μέσω της τήξης, να ενσωματωθούν σε μεγάλα βραχώδη κομμάτια, τα οποία θα έχουν τα χαρακτηριστικά που απαιτείται, ώστε να μην μπορούν εύκολα να εκπλυθούν και να μεταφερθούν στην επιφάνεια και να μειώνουν την εκλυόμενη θερμότητα των αποβλήτων.

2.4 Εθνικό πρόγραμμα Διαχείρισης Ραδιενεργών Αποβλήτων

Το εθνικό πρόγραμμα για τη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων, περιέχει τέσσερα βασικά στάδια (ΕΕΑΕ, “Εθνικό Πρόγραμμα” για τη διαχείριση αναλωθέντων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων- Σχέδιο δεύτερο, 2020)

A. Ανακύκλωση: Οι κλειστές ραδιενεργές πηγές και τα ραδιενεργά υλικά που μπορούν να ανακυκλωθούν, αποτελούν άμεση προτεραιότητα, ώστε μέσα στα επόμενα πέντε έτη, να έχουν απομακρυνθεί από τη χώρα και να έχουν σταλεί σε εγκεκριμένες εγκαταστάσεις ανακύκλωσης στο εξωτερικό. Με το πέρας αυτής της διαδικασίας, θα διερευνηθούν και άλλες κατηγορίες που θα μπορούσαν να ανακυκλωθούν. Παράλληλα, πρέπει να εξαχθεί το αχρησιμοποίητο και μη ακτινοβολημένο πυρηνικό καύσιμο από τον πυρηνικό αντιδραστήρα του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», ενώ διεξάγεται συμφωνία με πανεπιστήμιο του εξωτερικού, στο οποίο λειτουργεί παρόμοιος πειραματικός αντιδραστήρας, ώστε να γίνει μεταφορά εκεί. Τέλος, διερευνάται λύση για την εξαγωγή ποσότητας ουρανίου που ανήκει στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ) το οποίο έχει απομείνει από την αποξήλωση παλαιάς πειραματικής διάταξης και φυλάσσεται, προσωρινά, σε κατάλληλη εγκατάσταση στο ΕΜΠ υπό καθεστώς πυρηνικών διασφαλίσεων.

B. Εγκατάσταση Προσωρινής Αποθήκευσης και Εγκατάσταση Διάθεσης: Στην Ελλάδα, λειτουργεί εγκατάσταση διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων και πηγών του ΙΠΡΕΤΕΑ του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», στην οποία γίνεται προσωρινή αποθήκευση. Η εγκατάσταση αυτή εξετάζεται να μετατραπεί σε εγκατάσταση Διάθεσης, η οποία θα καλύψει τις ανάγκες απόθεσης όλης της χώρας. Συγχρόνως, διερευνάται η δημιουργία νέας εγκατάστασης διάθεσης, η οποία θα λειτουργεί παράλληλα με την προϋπάρχουσα δομή προσωρινής αποθήκευσης. Και στις δύο περιπτώσεις, θα συνδυαστούν η επιφανειακή εναπόθεση με μηχανικά μέσα (engineered near surface disposal) και η επιφανειακή τάφρος (surface trench disposal).

Ωστόσο, η μετατροπή της ήδη υπάρχουσας εγκατάστασης προσωρινής αποθήκευσης σε μόνιμης διάθεσης, ακόμα μελετάται και υπάρχει η πιθανότητα να μην μπορεί να γίνει η μετατροπή, αν δεν ικανοποιούνται τα πρωτόκολλα ασφαλείας στην περιοχή. Συνεπώς, η εναλλακτική λύση είναι να κατασκευαστεί μια ίδια εγκατάσταση σε μια άλλη (λευκή) περιοχή.

Εξετάζεται, επίσης, η διάθεση γεώτρησης ως πιθανή συμπληρωματική μέθοδος απόθεσης, αν αυτό κριθεί αναγκαίο με βάση την εξέλιξη του προγράμματος ανακύκλωσης των ραδιενεργών πηγών.

Για να πραγματοποιηθούν οι παραπάνω τεχνικές λύσεις απαιτούνται λεπτομερείς αναλύσεις όπως:

- Αξιολόγηση της τοποθεσίας και πλήρης ανάλυση των παραγόντων και των παραμέτρων που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας αυτής όπως γεωλογικά, σεισμολογικά, υδρολογικά και άλλα χαρακτηριστικά τα οποία μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στη μακροπρόθεσμη απόδοση της εγκατάστασης.
- Κατάλληλος σχεδιασμός της εγκατάστασης που περιλαμβάνει διαφορετικά, αξιόπιστα και ανεξάρτητα μεταξύ τους επίπεδα προστασίας και πολλαπλά φράγματα (αρχή της άμυνας σε βάθος – defense in depth), για την αποφυγή διαφυγής ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον.

C. Λειτουργία της Εγκατάστασης μετά την παύση: Στο σχεδιασμό αυτόν περιλαμβάνονται τα μέτρα για τη διασφάλιση των οικονομικών πόρων, τον παθητικό και ενεργητικό έλεγχο της εγκατάστασης και τα μέτρα περιβαλλοντικής εποπτείας. Τα απαιτούμενα μέτρα που θα ληφθούν δεν έχουν οριστικοποιηθεί ακόμα, αλλά θα αποφασιστούν με βάση το ορόσημο B5 για το οποίο έχει οριστεί προθεσμία μέχρι τον 12^ο του 2023 και οι βασικοί άξονες του οποίου είναι οι εξής:

- Στρατηγική περιβαλλοντικής εκτίμησης.
- Μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
- Έκθεση ανάλυσης ασφαλείας.
- Ακριβές σχέδιο χρηματοδότησης και έλεγχος εγκατάστασης και εποπτεία ραδιενέργειας περιβάλλοντος για την περίοδο μετά την παύση της λειτουργίας.

D. Εκτίμηση κόστους και σχέδιο χρηματοδότησης: Ο χρόνος και το κόστος που απαιτείται για τη διαδικασία εξαγωγής και ανακύκλωσης των ραδιενεργών αποβλήτων δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια, καθώς επιδρούν δυναμικοί παράγοντες με μεγάλη αβεβαιότητα, όπως η διαπραγμάτευση των φορέων υποδοχής. Μία πρώτη εκτίμηση έχει γίνει κοντά στις 400.000 ευρώ, το οποίο το αναλαμβάνουν αποκλειστικά οι κάτοχοι των ραδιενεργών πηγών. Στην περίπτωση επέκτασης της ήδη υπάρχουσας εγκατάστασης στο ερευνητικό κέντρο Δημόκριτος, το κόστος υπολογίζεται περίπου σε 1.000.000 ευρώ, ενώ για δημιουργία νέας εγκατάστασης σε «λευκή» περιοχή, το ελάχιστο ποσό που θα δαπανηθεί ανέρχεται σε 2.000.000 ευρώ. Ωστόσο, η ανάλυση έχει γίνει με υψηλούς συντελεστές ασφαλείας, καθώς η αβεβαιότητα είναι αρκετά μεγάλη.

2.5 Παραδείγματα Εγκαταστάσεων Διάθεσης Κοντά στην Επιφάνεια

2.5.1 Ισπανία - El Cabril

Στο Ελ Καμπρίλ της Ισπανίας, υπάρχει πρότυπη εγκατάσταση για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων στο επίπεδο της επιφάνειας. Εκεί, έχουν αποτεθεί ραδιενεργά απόβλητα που ανήκουν σε τρεις κατηγορίες: VLLW, LLW, ILW. Πρακτικά, έχουν κατασκευαστεί δύο εγκαταστάσεις. Στη μία τοποθετήθηκαν τα χαμηλού και μετρίου επιπέδου απόβλητα σε μία περιοχή που αποτελείται από τη βόρεια πλατφόρμα με 16 χώρους απόθεσης και την νότια πλατφόρμα με 12. Σε αυτήν, έχουν διατεθεί 34.927,19 m³ αποβλήτων και έχει καταληφθεί το 79,92% του διαθέσιμου χώρου. Στη δεύτερη, τοποθετούνται τα πολύ χαμηλού επιπέδου απόβλητα σε μία περιοχή που περιέχει μία πλατφόρμα με δύο χώρους απόθεσης, ενώ βρίσκονται υπό κατασκευή δύο ακόμα. Σε αυτήν, έχουν διατεθεί 19.397 m³ αποβλήτων.

Με την ολοκλήρωση της κατασκευής και την πλήρωση του διαθέσιμου χώρου, η εγκατάσταση σχεδιάζεται να παρακολουθείται και να ελέγχεται ενεργά για χρονικό διάστημα 60 χρόνων, ενώ μετά το πέρας αυτών, θα τοποθετηθεί ένα κάλυμμα από αδιάβροχα και απορροφητικά υλικά και θα καλυφθεί με χώμα, ώστε να ενσωματωθεί στο γύρω περιβάλλον. Τέλος υπολογίζεται παθητικός έλεγχος της εγκατάστασης για τα επόμενα 300 χρόνια (enresa, 2022).



Εικόνα 2: Εγκατάσταση Διάθεσης Ραδιενεργών Αποβλήτων El-Cabril

(Ulla Bergström, International perspective on repositories for low level waste, 2011)

2.5.2 Βουλγαρία - Novi Han

Η εγκατάσταση στο Νόβι Χαν της Βουλγαρίας ξεκίνησε τη λειτουργία της το 1964 και κατασκευάστηκε για τις ανάγκες διάθεσης που προέκυψαν από τον πειραματικό αντιδραστήρα IRT-2000 και κάποιες ιατρικές και εκπαιδευτικές εφαρμογές με ραδιενεργά υλικά. Η διάθεση περιλαμβάνει συνολικά επτά μονάδες με συνολικό όγκο 566 m^3 (IAEA, Upgrading of Near Surface Repositories for Radioactive Waste, 2005)

- Ένα τσιμεντένιο θόλο για χαμηλής και μεσαίας κατηγορίας απόβλητα σε στερεά μορφή. Αποτελείται από τρία μέρη συνολικού όγκου 237 m^3 και συγκέντρωσης $8.05 \times 10^{12} \text{ Bq}$.
- Ένα τσιμεντένιο θόλο για βιολογικά απόβλητα συνολικού όγκου 80 m^3 και συγκέντρωσης $1.91 \times 10^{11} \text{ Bq}$.
- Τέσσερις χαλύβδινες δεξαμενές για χαμηλής κατηγορίας απόβλητα σε υγρή μορφή με συνολικό όγκο 48 m^3 .
- Έναν ειδικά διαμορφωμένο θόλο 1 m^3 για χρησιμοποιημένες σφραγισμένες πηγές

- Μία επιφανειακή τάφρο από τσιμέντο που αποτελείται από επτά διαφορετικά τμήματα συνολικού όγκου 200 m^3 που περιλαμβάνει ραδιενεργά απόβλητα συγκέντρωσης $1.28 \times 10^{12} \text{ Bq}$.

Εκτός από το θόλο για χρησιμοποιημένες σφραγισμένες πηγές, ο οποίος είναι γεμάτος, οι υπόλοιπες μονάδες έχουν ελεύθερο χώρο για μεταγενέστερη τοποθέτηση αντίστοιχων ραδιενεργών αποβλήτων.

Το μεγαλύτερο μέρος όλων των μονάδων βρίσκεται υπογείως, καθώς μόνο οι οροφές είναι πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ τα καλύμματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή της εγκατάστασης, αποτελούνται από οπλισμένο σκυρόδεμα με επενδύσεις από ανοξείδωτο χάλυβα, τοίχοι από τούβλα με ασφάλτινη μόνωση και το φυσικό γεωλογικό κάλυμμα από άμμο, χώμα και τον σχιστόλιθο που περιβάλλει τον χώρο διάθεσης.

3. Εγκατάσταση Διάθεσης Κοντά στην Επιφάνεια

3.1 Γενική Ιδέα

Εξετάζεται η διάθεση των ραδιενεργών αποβλήτων σε εγκατάσταση με τεχνητά μέσα κοντά στην επιφάνεια. Όπως αναφέρθηκε, θα θεωρηθεί αντιπροσωπευτικό απόθεμα ΡΑ ενώ θα γίνει σχεδιασμός και θα υπολογιστεί ο συνολικός όγκος που θα χρειαστεί. Οι ραδιολογικές επιπτώσεις, λόγω κυρίως της διαρροής και μεταφοράς στη γεώσφαιρα μέσω του υπόγειου νερού, εκτιμώνται στη συνέχεια με τη βοήθεια του μοντέλου RESRAD-OFFSITE (E. Gnanapragasam, 2020), το οποίο αναπτύχθηκε από το Argonne National Laboratory των ΗΠΑ για λογαριασμό της Επιτροπής Πυρηνικής Ασφάλειας (U.S.NRC) και του Υπουργείου Ενέργειας (DoE) των ΗΠΑ.

3.2 Αντιπροσωπευτικό Απόθεμα Ραδιενεργών Αποβλήτων

Θα χρησιμοποιηθεί μία ήδη υπάρχουσα βάση δεδομένων για τα ραδιονουκλίδια που υπάρχουν στη χώρα, σύμφωνα με τη δημοσιοποίηση της ΕΕΑΕ (ΕΕΑΕ, https://eeae.gr/files/Current_INVENTORY.pdf, 2021) των οποίων η προέλευση, το είδος και ο όγκος παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1: Απόθεμα Ραδιενεργών Αποβλήτων

	Είδος / προέλευση ραδιενεργών αποβλήτων προς διάθεση	Όγκος ΡΑ διάθεσης (m ³)
Ερευνητικό κέντρο Δημόκριτος (NCSR-D)	VLLW	27.24
	LLW	8.48
	ILW	0.93
	Legacy (objects in 100 drums)	20
	Legacy (objects in 50 drums)	10
	Legacy (cemented sludge in 50 drums)	10
	VLLW (Liquid-Sludges)	26.6

	Graphite Waste	5.6
	Contaminated Soil with Pu	0.3
	Contaminated plates with Pu	0.01
	Contaminated objects (maintenance, house-keeping)	1
	Consumer Products (lightning rods)	0.4
	Consumer Products (smoke detectors)	0.2
	Consumer Products (Vehicle Instr., Lamps, depU blocks)	0.5
Εγκαταστάσεις	Contaminated Ash	75
	Objects contaminated with NORM	100
	Consumer Products (lightning rods) #1	1.6
	Consumer Products (lightning rods) #2	0.3
	Consumer Products (Vehicle Instr., Lamps)	1

Ενώ υπάρχουν και κάποιες ραδιενεργές πηγές εκτός χρήσης που χρειάζονται διαχείριση, που χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες και παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (ΕΕΑΕ, https://eeae.gr/files/Current_INVENTORY.pdf, 2021):

Πίνακας 2: Ραδιενεργές πηγές εκτός χρήσης

Ραδιενεργές Πηγές Εκτός Χρήσης	Κατηγορία	Αριθμός Πηγών	
		NCSR-D	Εγκαταστάσεις
	Category1		3
	Category2	1	1
	Category3	56	4
	Category4	15	57
	Category5	312	210

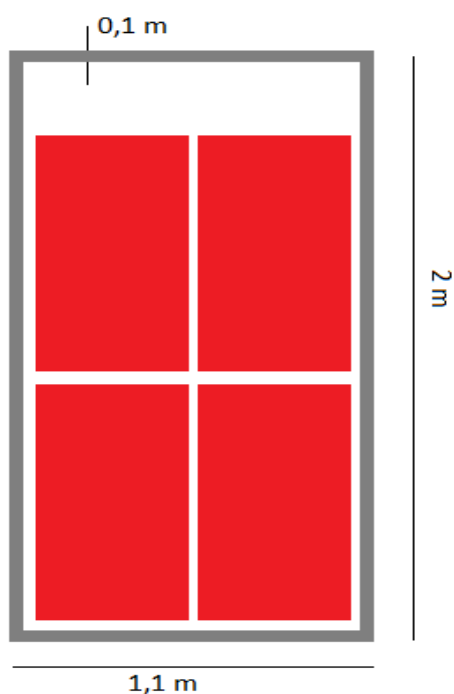
Η σκόνη (contaminated ash) και τα υλικά NORM δεν περιλαμβάνονται στην παρούσα ανάλυση για τη διάθεση στην εγκατάσταση. Προσθέτοντας όλους τους όγκους των ραδιενεργών αποβλήτων, όπως αυτοί προκύπτουν στον πίνακα 1, προσδιορίζουμε τον **Συνολικό Όγκο PA = 114.16 m³**. Ωστόσο, στον όγκο αυτό δεν συμπεριλαμβάνονται οι πηγές του πίνακα 2, ενώ κάποια απόβλητα που θα προκύψουν από την απόθεση υλικών του ερευνητικού αντιδραστήρα GRR-1 και πιο συγκεκριμένα οι ράβδοι ελέγχου (control rods), λόγω της υψηλής ενεργότητας, θα πρέπει να επεξεργαστούν και να χωριστούν σε μικρότερα κομμάτια και στη συνέχεια να διανεμηθούν σε πολλά δοχεία αποθήκευσης. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω γίνεται η παραδοχή ότι για όλα τα απόβλητα, θα χρειαστούν 680 τυπικά μεταλλικά δοχεία των 200 λίτρων.

3.3 Όγκος εγκατάστασης

Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, το απόθεμα θα τοποθετηθεί σε δοχεία αποθήκευσης όγκου 0.2 m³ (200 lt). Τα δοχεία θα στοιβαχτούν σε κιβώτια χωρητικότητας 8 δοχείων το κάθε ένα, τοποθετημένα σε 2 σειρές των τεσσάρων. Οι διαστάσεις των κιβωτίων και των δοχείων αποτυπώνονται στον παρακάτω πίνακα και στα επεξηγηματικά σχήματα που ακολουθούν:

Πίνακας 3: Διαστάσεις κιβωτίων-δοχείων

Πάχος τοιχώματος κιβωτίου (m)	0.1
Μήκος Εσωτερικό (m)	1.1
Πλάτος Εσωτερικό (m)	1.1
Ύψος Εσωτερικό (m)	2
Όγκος Κιβωτίου (Εσωτερικός) (m ³)	2.42
Μήκος Εξωτερικό (m)	1.3
Πλάτος Εξωτερικό (m)	1.3
Ύψος Εξωτερικό (m)	2.2
Όγκος κιβωτίου (Εξωτερικός) (m ³)	3.718



Εικόνα 3: Σχέδιο Κιβωτίων

Επομένως για να χωρέσουν όλα τα δοχεία μέσα στα κιβώτια, θα χρειαστούν 85 κιβώτια. Τα κιβώτια αυτά, θα τοποθετηθούν σε πλατφόρμες σχηματίζοντας πέντε σειρές των 12. Συνεπώς υπολογίζεται η συνολική επιφάνεια που θα χρειαστεί για όλα τα κιβώτια, με πλάτος 7m και μήκος 16m. Κάθε κιβώτιο, για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα του περιεχομένου αλλά και για παραπάνω θωράκιση, θα πληρωθεί με τσιμέντο. Οπότε, υπολογίζεται ότι θα χρειαστούν 2.118 m^3 τσιμέντο ανά κιβώτιο.

Το βάθος ταφής θα είναι στα 10m κάτω από το έδαφος, εκ των οποίων τα πρώτα 5m θα είναι θωράκιση και τα επόμενα 5m θα είναι τα κιβώτια με τα ραδιενεργά απόβλητα. Άρα, ο συνολικός όγκος της εγκατάστασης θα είναι 560 m^3 . Τα παραπάνω αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 4: Διαστάσεις εγκατάστασης

Πλάτος (Εσωτ.) (m)	7
Μήκος (Εσωτ.) (m)	16
Συνολικός όγκος ΡΑ (m ³)	136
Συνολικός Αριθμός δοχείων	678
Συνολικός Αριθμός Κιβωτίων	85
Όγκος αποβλήτων / κιβώτιο (m ³)	1.6
Όγκος πλήρωσης / κιβώτιο (m ³)	2.118
Όγκος κιβωτίων (m ³)	135.6
Όγκος εγκατάστασης (m ³)	560
Μάζα Εγκατάστασης (kg)	1.02E+06

3.4 Τεχνητά Φράγματα Εγκατάστασης

3.4.1 Χαρακτηριστικά φραγμάτων

Η προστασία της εγκατάστασης από τους πολλούς κινδύνους στους οποίους είναι εκτεθειμένη, γίνεται με ένα συνδυασμό υλικών και στρωμάτων θωράκισης, κάθε ένας για διαφορετικό λόγο. Τα κύρια χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιούνται είναι (IAEA, Performance of engineered barrier materials in near surface disposal facilities for radioactive waste , 2001):

1. **Χαμηλή υδραυλική αγωγιμότητα**, ώστε ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς των ραδιονουκλιδίων να είναι η διάχυση.
2. **Ικανότητα αυτοσφραγίσματος**. Αυτό επιτυγχάνεται σε υλικά όπως η άμμος και ο πηλός, τα οποία όταν απορροφούν νερό, διογκώνονται και οι πόροι που μπορεί να προκύπτουν από υλικά με διαφορετικές πυκνότητες σφραγίζονται, χωρίς να αφήνουν το νερό να εισχωρήσει πιο βαθιά.
3. **Αντοχή στο χρόνο**. Τα υλικά πρέπει να έχουν ικανοποιητική απόδοση ύστερα από αρκετά χρόνια, αφού όπως έχει εξηγηθεί προηγουμένως, τα ραδιενεργά απόβλητα ζούνε για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα.

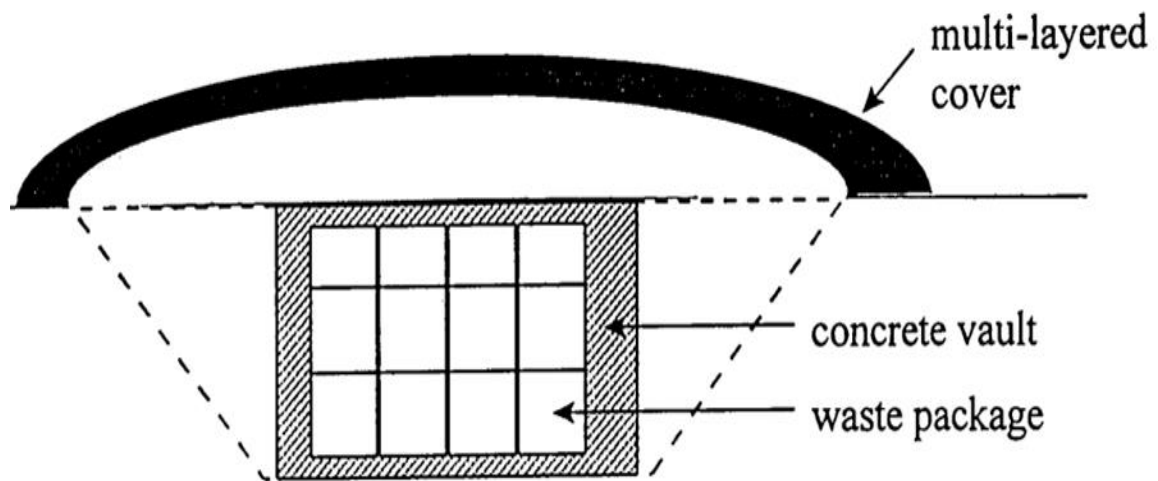
Τα φράγματα βοηθούν, στο διάστημα που έχουν ικανοποιητική απόδοση και πριν τη σημαντική φθορά τους, στην απομόνωση των αποβλήτων από τη βιόσφαιρα. Για απόβλητα, ωστόσο, με μεγάλο χρόνο ημιζωής δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι τα τεχνητά φράγματα μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο μακροπρόθεσμα. Σε αυτές τις

περιπτώσεις η καθυστέρηση της διαρροής και μεταφοράς των αποβλήτων στηρίζεται κυρίως στα χαρακτηριστικά του εδάφους και της γεώσφαιρας γενικά (φυσικά φράγματα).

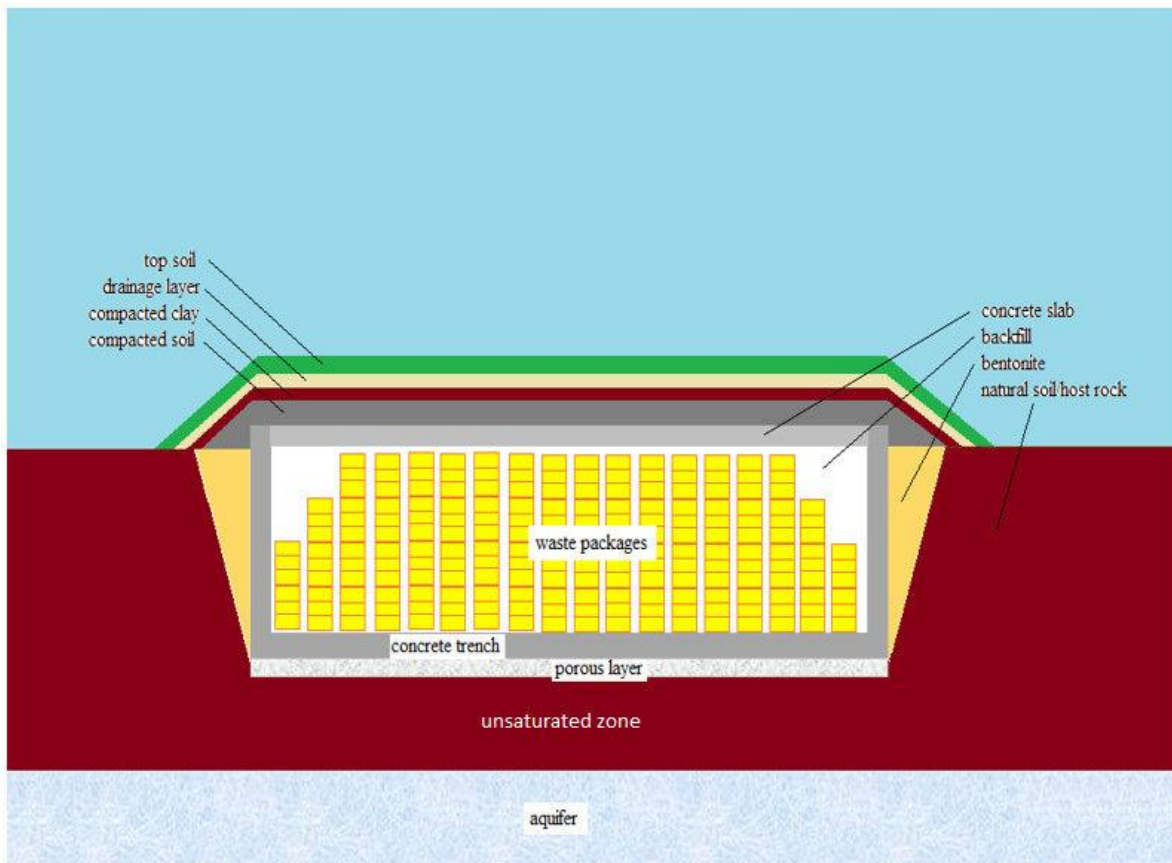
3.4.2 Υλικά - Γεωμετρία Τεχνητής Κάλυψης (Θωράκισης)

Η τεχνητή κάλυψη (σφράγισμα) σε εγκαταστάσεις διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων μπορεί να αποτελείται από στρώματα με διαφορετικά υλικά. Οι βασικότεροι κίνδυνοι, οι οποίοι πρέπει να αποφευχθούν, είναι η εισχώρηση νερού στον χώρο απόθεσης, η εισχώρηση ζώων είτε υπογείως είτε από την επιφάνεια και η μερική ή πλήρης καταστροφή από φυσικά αίτια (π.χ. σεισμός, πλημμύρα, άλλες επιφανειακές διεργασίες όπως διάβρωση). Βασική λειτουργία της κάλυψης είναι επίσης η αποτροπή της εισόδου ατόμων στην εγκατάσταση, όταν στο μέλλον θεωρείται ότι θα χαθεί η μνήμη για την εγκατάσταση.

Αρχικά, το εσωτερικό των κιβωτίων καθώς και τα κενά ανάμεσα σε αυτά γεμίζονται με τσιμέντο, το οποίο επιτυγχάνει την περεταίρω ακινητοποίηση των αποβλήτων, ενώ παράλληλα προστατεύει και από την εισχώρηση του νερού και εμποδίζει τα ραδιονουκλίδια που μετατρέπονται σε αέρια, να διαφύγουν προς την ατμόσφαιρα. Συγχρόνως, θα τοποθετηθεί κι ένα στρώμα τσιμέντου στο κατώτερο μέρος της εγκατάστασης, το οποίο έχει ρόλο κυρίως δομικό. Τα υπόλοιπα 5m μέχρι την επιφάνεια του εδάφους, αποτελούν το κάλυμμα, το οποίο επίσης πληρώνεται με τσιμέντο, ενισχύοντας την ήδη υπάρχουσα θωράκιση, ενώ επιπλέον, προστατεύει από πιθανή εισχώρηση ζώων τα οποία μπορεί σκάβοντας να κατέληγαν μέσα στο χώρο απόθεσης. Στο ύψος του εδάφους, αφού ολοκληρωθεί η τοποθέτηση των δύο άλλων στρωμάτων, θα φτιαχτεί ένα κάλυμμα από χώμα, άμμο και αιωνόβια φυτά, ώστε να εγκλιματιστεί με το περιβάλλον και να εμποδίσει τη δημιουργία φυσικής αλλά ανεξέλεγκτης χλωρίδας, η οποία θα μπορούσε να καταστρέψει την εγκατάσταση (π.χ. ρίζες μεγάλων δέντρων). Η γεωμετρία του είναι κυρτή, ώστε να οδηγεί το νερό να διαφεύγει μακριά από το σημείο ταφής. Παρακάτω, παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικές εικόνες για τα στρώματα θωράκισης, όπως αυτά εφαρμόζονται για την κάλυψη αντίστοιχων εγκαταστάσεων.



Εικόνα 4: Γεωμετρία Θωράκισης (IAEA, Performance of engineered barrier materials in near surface disposal facilities for radioactive waste , 2001)



Εικόνα 5: Σχεδιασμός Εγκατάστασης Διάθεσης Κοντά στην Επιφάνεια (Ulla Bergström, International perspective on repositories for low level waste, 2011)

3.4.3 Χρονικό Πλαίσιο Θωράκισης

Αφού κατασκευαστεί η εγκατάσταση και ξεκινήσει η λειτουργία της, πρέπει να έχει σχεδιαστεί ο τρόπος με τον οποίο θα ελέγχεται ο χώρος. Χωρίζουμε τις περιόδους ζωής της εγκατάστασης σε τρεις κατηγορίες (IAEA, Performance of engineered barrier materials in near surface disposal facilities for radioactive waste , 2001):

- 1. Ενεργή περίοδος ελέγχου:** Η περίοδος αυτή θεωρούμε ότι διαρκεί 30 χρόνια. Κατά τη διάρκεια αυτής, συντηρείται η περίφραξη της εγκατάστασης και υπάρχει άμεση επισκευή που είναι αναγκαία, οπότε εμποδίζονται ζώα και φυτά από την εισχώρηση στην εγκατάσταση. Επίσης, γίνονται οι απαραίτητες ενέργειες για να προληφθεί ή να αντιμετωπιστεί κάποια πιθανή αστοχία που μπορεί να προκύψει από δυναμικές συνθήκες (π.χ. σεισμός). Τα υλικά της θωράκισης έχουν ακόμα ικανοποιητική απόδοση, καθώς δεν έχουν υποβαθμιστεί καθόλου οι ιδιότητές τους, οπότε δεν παρατηρείται διαφυγή ραδιενέργειας εκτός ίσως από κάποιες μικροποσότητες αερίων.
- 2. Παθητική Περίοδος Ελέγχου:** Η περίοδος αυτή έχει διάρκεια 70 ετών. Κατά τη διάρκεια της περιόδου αυτής, ο έλεγχος που γίνεται είναι θεσμικός, ώστε να μην χτιστεί κάποιο οίκημα ή να μην περάσει κάποιος δρόμος στην περιοχή που έγινε η διάθεση, ώστε να μην υπάρξει άμεση έκθεση των εργατών και στη συνέχεια και των ανθρώπων που θα δραστηριοποιούνται εκεί. Οποιαδήποτε βλάβη στη θωράκιση δεν θα επισκευάζεται, ενώ οι ιδιότητες των υλικών θωράκισης θα συνεχίζουν να φθίνουν, αυξάνοντας συνεχώς με το πέρασμα των χρόνων τη ραδιενέργεια που διαφεύγει.
- 3. Περίοδος μη ελέγχου:** Αποτελεί την τελευταία περίοδο ζωής της εγκατάστασης και αφορά όλα τα υπόλοιπα χρόνια που η εγκατάσταση θα εκλύει ποσότητες ραδιενέργειας. Η περιοχή της εγκατάστασης δεν προστατεύεται από ανθρώπινο έλεγχο, ενώ η μνήμη για την ύπαρξη της εγκατάστασης και τους σχετικούς κινδύνους αρχίζει να εξασθενεί. Καθώς τα υλικά της θωράκισης προβλέπεται να υποβαθμιστούν πρέπει να αξιολογηθεί η διαρροή και μεταφορά των ραδιονουκλιδίων στη γεώσφαιρα και να εκτιμηθεί η έκθεση του πληθυσμού, ώστε να μην υπερβαίνονται τα νομοθετικά όρια έκθεσης.

Στην παρούσα μελέτη, εξετάζονται οι κίνδυνοι που μπορεί να προκύψουν μετά την ενεργή περίοδο ελέγχου, καθώς δεν υπάρχει δυνατότητα επέμβασης και βελτίωσης κάποιας πιθανής αστοχίας, ενώ κατά την περίοδο λειτουργίας το νερό θεωρείται ότι δεν θα έχει καταφέρει να εισχωρήσει στην εγκατάσταση. Κατά τη διάρκεια της

δεύτερης περιόδου, θα έχει ξεκινήσει η φθορά των υλικών θωράκισης και θα παρατηρείται εισχώρηση του νερού, ενώ με το πέρασμα των χρόνων θα αυξάνεται σημαντικά μέχρι την είσοδο στην περίοδο μη ελέγχου, πάνω στην οποία θα εμφανιστούν και οι μεγαλύτερες εκροές ραδιενέργειας.

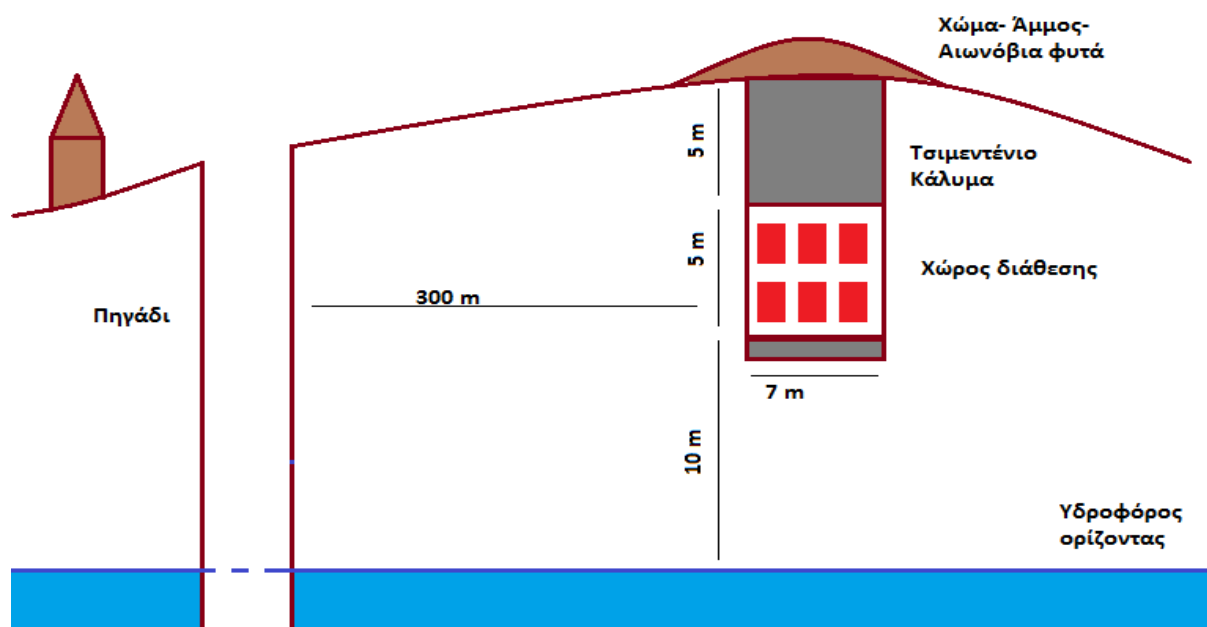
3.5 Τοπολογία-Σχεδιασμός

Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο παίζει ο σχεδιασμός της εγκατάστασης, καθώς και η επιλογή του κατάλληλου σημείου, το οποίο πρέπει να έχει συγκεκριμένα γεωλογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά, που θα εξασφαλίσουν τη μεγαλύτερη δυνατή ασφάλεια. Έχουν θεωρηθεί τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής όπου θα τοποθετηθεί το μοντέλο της εγκατάστασης, με βάση την περιοχή της Αθήνας. Η διάθεση θα γίνει σε μία περιοχή όπου το έδαφος είναι ο χαρακτηριστικός αθηναϊκός σχιστόλιθος. Σε απόσταση 300 m θα βρίσκεται ένα πηγάδι από το οποίο αντλείται νερό για να χρησιμοποιηθεί από τους κατοίκους της περιοχής. Σε βάθος 10 m κάτω από την εγκατάσταση, βρίσκεται ο υδροφόρος ορίζοντας. Μεταξύ του υδροφόρου (κορεσμένη ζώνη) και του βαθύτερου σημείου της εγκατάστασης μεσολαβεί ακόρεστη ζώνη. Τα ραδιονουκλίδια θεωρείται ότι διαρρέουν από τα δοχεία, παραλαμβάνονται από το νερό που κατεισδύει μέσα από αυτά και μεταφέρεται προς βαθύτερα σημεία στην εγκατάσταση. Ακολουθώντας, συνεχίζεται η μεταφορά τους μέσω της ροής του νερού στην ακόρεστη ζώνη μέχρι να καταλήξουν στον υδροφόρο ορίζοντα. Τα ραδιονουκλίδια ταξιδεύουν οριζόντια μέσω της κίνησης του υδροφόρου και καταλήγουν στον πηγάδι. Τα φυσικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα, ενώ το γενικό σχεδιάγραμμα της περιοχής αποτυπώνει τις βασικές διαστάσεις της περιοχής:

Πίνακας 5: Υδρογεωλογικοί παράμετροι- Κορεσμένη/Ακόρεστη Ζώνη

Φυσικοί - Υδρολογικοί παράμετροι	Παράμετρος	Τιμή
	Κατακρήμνιση (precipitation) (m/year)	0.719
	Συντελεστής Απορροής	0.42
	Άρδευση (m/year)	0
	Συντελεστής Εξατμισοδιαπνοής (evapotranspiration)	0.7
	Συντελεστής Κάλυψης και Διαχείρισης	0.04
Ακόρεστη Ζώνη		
	Πάχος (m)	10

	Πυκνότητα (g/m ³)	1.89
	Συνολικό Πορώδες	0.3
	Ενεργό Πορώδες	0.3
	Υδραυλική αγωγιμότητα (m/year)	3000
	Διαμήκης Διασπορά (m)	1
Κορεσμένη Ζώνη		
	Πάχος (m)	10
	Πυκνότητα (g/m ³)	1.89
	Συνολικό Πορώδες	0.3
	Ενεργό Πορώδες	0.3
	Υδραυλική αγωγιμότητα (m/year)	3000
	Διαμήκης Διασπορά για το πηγάδι (m)	30
	Διαμήκης Διασπορά για το επιφανειακό στρώμα νερού (m)	100



Εικόνα 6: Σχεδιάγραμμα Τοποθεσίας της Εγκατάστασης Διάθεσης ΡΑ

3.6 Σενάριο Έκθεσης

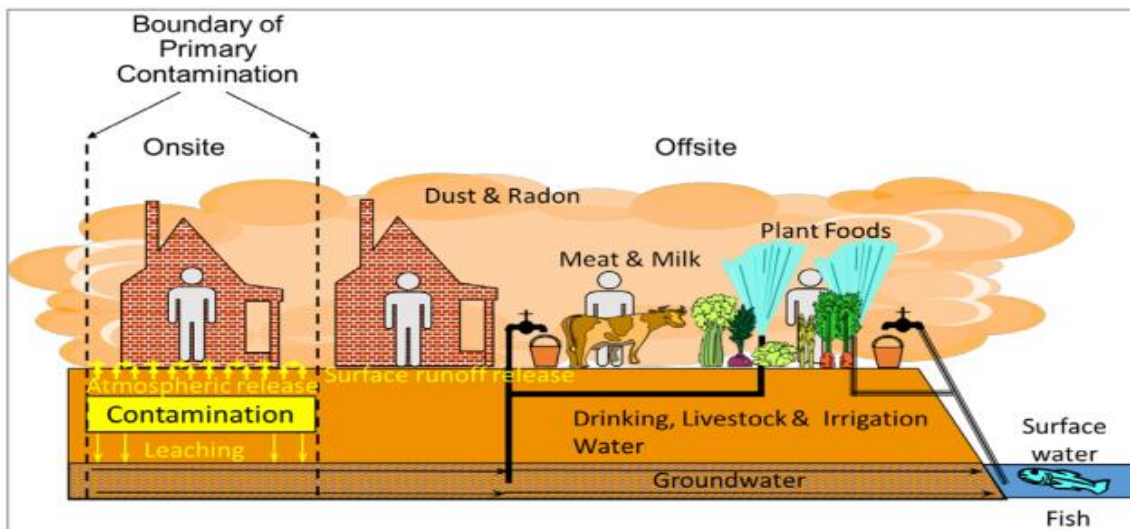
3.6.1 Οδοί Έκθεσης

Οι οδοί μέσα από τις οποίες πραγματοποιείται η έκθεση σε ραδιενέργεια, είναι οι εξής (E. Gnanapragasam, 2020):

- **Ακτινοβολία Γάμμα:** Ραδιονουκλίδια που εκπέμπουν γάμμα ακτινοβολία, μπορεί να είναι διασκορπισμένα στο έδαφος, από το σημείο της διάθεσης. Οπότε, μπορούν να εκτεθούν όσοι εισέρχονται στην περιοχή (εγκατάσταση διάθεσης) με άμεση ακτινοβολήση, ενώ και όσοι βρίσκονται σχετικά μακριά από αυτήν, μπορούν πάλι σε πολύ μικρότερο βαθμό να εκτεθούν άμεσα.
- **Εισπνοή:** Ορισμένα ραδιονουκλίδια μετατρέπονται σε αέρια και διαφεύγουν της θωράκισης, οπότε μολύνουν τον αέρα. Τα δύο βασικότερα ραδιενεργά απόβλητα που μας ενδιαφέρουν είναι το ^3H (τρίτιο) και το ^{14}C . Συνεπώς, με την εισπνοή του αέρα αυτού, υπάρχει άμεση έκθεση σε ραδιενέργεια, ενώ συχνό φαινόμενο αποτελεί η προσκόλληση των ραδιονουκλιδίων σε σωματίδια σκόνης, τα οποία μεταφέρονται στις γύρω κατοικημένες περιοχές και δημιουργούν εστίες δευτερογενούς μόλυνση.
- **Κατανάλωση φυτών:** Οι φυτικές τροφές που καταναλώνουν κυρίως οι άνθρωποι είναι: φυλλώδη και μη φυλλώδη λαχανικά, φρούτα και δημητριακά. Θεωρούνται τρία σενάρια για την κατανάλωση φυτών. Αρχικά, μπορεί να φαγωθούν λαχανικά που προέρχονται από το σημείο της διάθεσης και έχουν μολυνθεί οι ρίζες αρχικά και στη συνέχεια και το φύλλωμα. Δεύτερον, φυτά τα οποία προέρχονται από περιοχές δευτερογενούς μόλυνσης και τρίτον, φυτά που έχουν μολυνθεί έμμεσα, λόγω τη χρήσης μολυσμένου νερού για το πότισμα.
- **Κατάποση Χώματος:** Πολλές φορές μπορεί να γίνει κατανάλωση χώματος με άγνοια του ανθρώπου, όπως όταν δεν καθαρίζονται σωστά τα λαχανικά που μεγαλώνουν στο έδαφος ή από σωματίδια χώματος και σκόνης που μεταφέρονται πολύ εύκολα πάνω σε φαγητά ή σε σκεύη (π.χ. πιρούνια, μπουκάλια κ.λπ.). Όταν, λοιπόν, το χώμα αυτό έχει μολυνθεί από τα ραδιενεργά απόβλητα μπορεί να προκαλέσει μεγάλους κινδύνους στον άνθρωπο που θα το καταναλώσει.
- **Πόσιμο Νερό:** Από το πηγάδι που έχει τοποθετηθεί κοντά στην κατοικημένη περιοχή κατά τον σχεδιασμό της εγκατάστασης, αντλείται νερό το οποίο

καταναλώνεται από τους ανθρώπους. Αυτό το νερό, μπορεί να έχει μολυνθεί, αν τα ραδιονουκλίδια διαφύγουν κάτω από την εγκατάσταση διάθεσης, εισέλθουν στον υδροφόρο ορίζοντα, και στη συνέχεια διαχυθούν μέσα σε αυτόν και καταλήξουν στο νερό που αντλεί το πηγάδι.

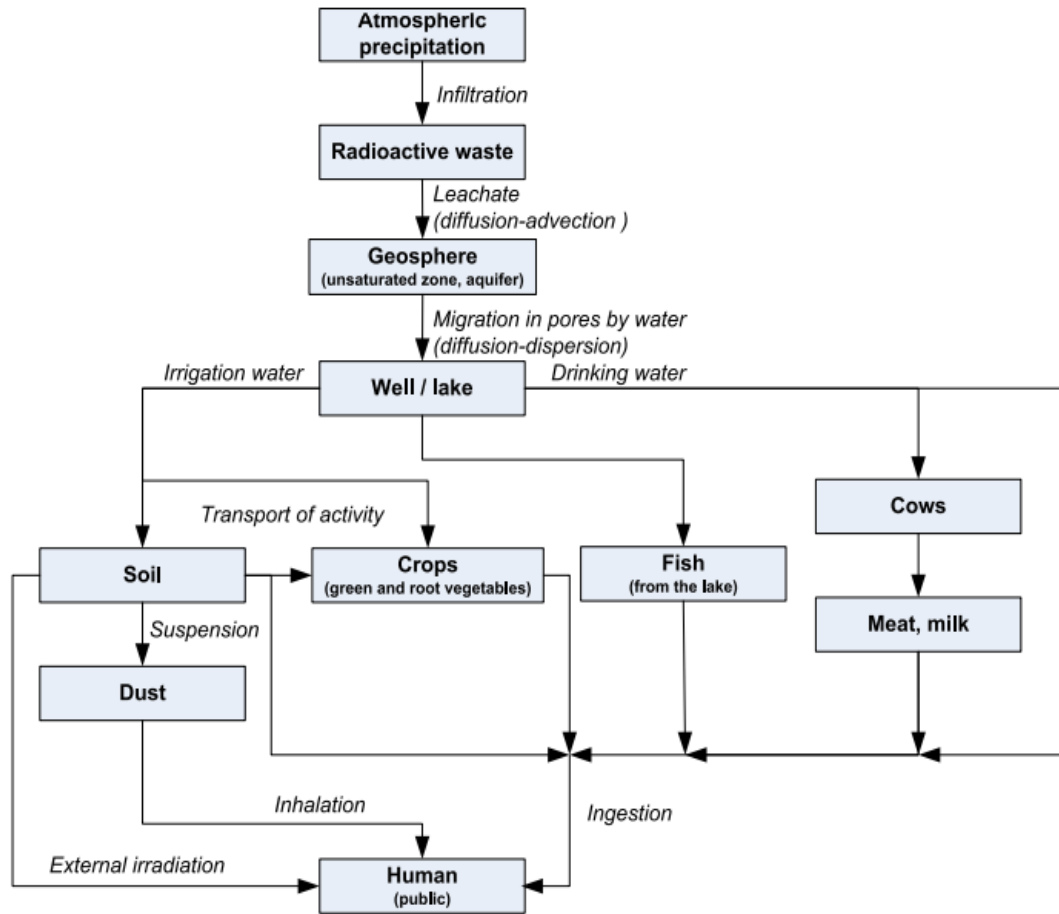
- **Ραδόνιο:** Το ραδόνιο (^{222}Rn) καθώς και τα παράγωγά του (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Po) επειδή βρίσκονται σε αέρια κατάσταση διαφεύγουν πολύ εύκολα προς την επιφάνεια, περνώντας μέσα από μικρές ρωγμές που εμφανίζονται στο έδαφος. Επομένως, είναι πολύ πιθανό να έρθει κάποιος σε άμεση επαφή, εισπνέοντας τον μολυσμένο αέρα.



Εικόνα 7: Περιβαλλοντικοί οδοί και τοποθεσίες έκθεσης (E. Gnanapragasam, 2020)

Από την ανάλυση των διάφορων οδών έκθεσης που παρουσιάστηκε παραπάνω, γίνεται εύκολα αντιληπτή η επίδραση του νερού στη μεταφορά των ραδιονουκλιδίων. Ένα πλήρες σενάριο που περιγράφει τη διαδικασία διαφυγής, ξεκινά από τη βροχή και την εισχώρηση του νερού στην εγκατάσταση λόγω της υποβάθμισης των υλικών της μηχανικής κάλυψης. Στη συνέχεια, εισέρχεται στη γεώσφαιρα μέσα από την ακόρεστη ζώνη και φτάνοντας στον υδροφόρο ορίζοντα διαχέεται μέσα από τους υδάτινους πόρους σε μέρη όπου μαζεύονται νερά, όπως πηγάδια και λίμνες. Από εκεί, μέσω άρδευσης, οδηγούνται προς το χώμα και τα φυτά που έχουν ρίζες μέσα σε αυτό ή διασκορπίζονται στο περιβάλλον με τη μορφή σκόνης και τελικώς καταλήγουν στον άνθρωπο. Εκτός από την άρδευση, από τα πηγάδια και τις λίμνες μπορεί να γίνει και άμεση κατάποση μολυσμένου νερού κυρίως από ζώα (ψάρια, αγελάδες κ.α.) που ζουν στην ευρύτερη περιοχή, τα οποία όμως στη συνέχεια θα καταναλωθούν από το γενικό

πληθυσμό. Αυτή η φυσιολογική πορεία για τη διαρροή των ραδιονουκλιδίων συνοψίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 8: Μοντέλο μεταφοράς ραδιονουκλιδίων και οδών έκθεσης για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια διαφυγής (P. Pořkas, 2019)

3.6.2 Συντελεστής Κατανομής Στερεού - Υγρού (Kd)

Όπως γίνεται κατανοητό και παραπάνω, είναι πολύ σημαντική η φάση της ύλης στην οποία βρίσκεται κάθε ραδιονουκλίδιο, γιατί ανάλογα με αυτήν, ακολουθεί μια διαφορετική δίοδο διάδοσης. Για τον λόγο αυτό, ορίζεται ο συντελεστής κατανομής στερεού - υγρού Kd. Το Kd ορίζεται ως ο λόγος της συγκέντρωσης του ραδιονουκλιδίου που απορροφάται σε μια καθορισμένη στερεά φάση προς τη συγκέντρωση ραδιονουκλιδίου που απορροφάται σε μια καθορισμένη υγρή φάση (John R. Lamarsh, 2019)

$$Kd = \frac{\text{Συγκέντρωση σε στέρεα φάση } \left(\frac{Bq}{g}\right)}{\text{Συγκέντρωση σε υγρή φάση } \left(\frac{Bq}{m^3}\right)}$$

Η τιμή αυτή είναι χαρακτηριστικό κάθε στοιχείου και δεν διαφέρει σε διαφορετικά ισότοπα του ίδιου χημικού στοιχείου. Ωστόσο, διαφέρει ανάλογα με το υλικό μέσα στο οποίο βρίσκονται τα στοιχεία. Για παράδειγμα, στην εγκατάσταση όπως έχει σχεδιαστεί, οι τιμές του συντελεστή είναι διαφορετικές για την περιοχή πρωτογενούς μόλυνσης, όπου το υλικό είναι το τσιμέντο που έχει χρησιμοποιηθεί για την πλήρωση και για το έδαφος της γύρω περιοχής, όπου υπάρχει Αθηναϊκός Σχιστόλιθος.

Όσο μικρότερη είναι η τιμή του συντελεστή αυτού, τόσο πιο γρήγορα, μπορεί να διαφύγει το ραδιονουκλίδιο από τη θωράκιση, καθώς στην υγρή φάση είναι πιο εύκολο να διαπεράσει τη στέρεα θωράκιση μέσα από ρωγμές ή πόρους και να οδηγηθεί προς τον υδροφόρο ορίζοντα.

3.6.3 Συγκεντρώσεις - Χρόνοι Ημιζωής - Kd Ραδιονουκλιδίων

Οι συγκεντρώσεις των ισωτόπων θεωρήθηκαν με βάση τη συνολική ενεργότητα στα ραδιενεργά απόβλητα. Στη συνέχεια διαιρέθηκαν με τη συνολική μάζα της εγκατάστασης και προέκυψαν οι συγκεντρώσεις σε Bq/g. Για τον προσδιορισμό του συντελεστή κατανομής χρησιμοποιήθηκαν τα δημοσιοποιημένα στοιχεία του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (IAEA, 2004) και της βάσης δεδομένων του προγράμματος RESRAD-OFFSITE. Οπότε, προέκυψε ο παρακάτω πίνακας που συγκεντρώνει όλα τα στοιχεία.

Πίνακας 6: Συγκεντρώσεις- Χρόνοι Ημιζωής - Kd Ραδιονουκλιδίων

Ραδιονουκλίδιο	Συγκέντρωση (Bq/g)	T _{1/2} (years)	Kd τσιμέντο (cm ³ /g)	Kd έδαφος (cm ³ /g)
Co60	1.52E-01	5.70E+00	10	1000
Fe55	8.12E-03	2.74E+00	1000	1000
Ni63	7.01E+02	1.01E+02	10	1000
Ni59	1.96E+00	7.60E+04	10	1000
Ag110m	5.66E-24	6.85E-01	1	36
Ag108m	1.36E+03	4.18E+02	1	36

H3	1.25E+02	1.23E+01	0	0
Be10	3.92E-01	1.60E+06	810	240
Eu152	1.40E+00	1.00E+02	825	80
Cs137	1.27E-01	3.02E+01	20	1.8
Eu154	5.65E-03	8.59E+00	825	80
C14	6.83E-01	5.73E+03	0	0
Cl36	9.81E-03	3.00E+05	0.5	0.04
Pb205	9.81E-03	1.73E+07	50	25
Ba133	7.75E-02	1.05E+01	50	50
Ca41	6.87E-03	9.44E+04	50	0.7
Mo93	3.89E-05	4.00E+03	0	0.82
Nb23m	2.35E-06	1.60E+01	0	0
Am241	3.63E+00	4.32E+02	200	50
Ra226	3.84E+00	1.60E+03	70	12
Th232	1.96E-02	1.41E+10	1000	60000
Sr-90	6.08E-03	2.90E+01	1	30

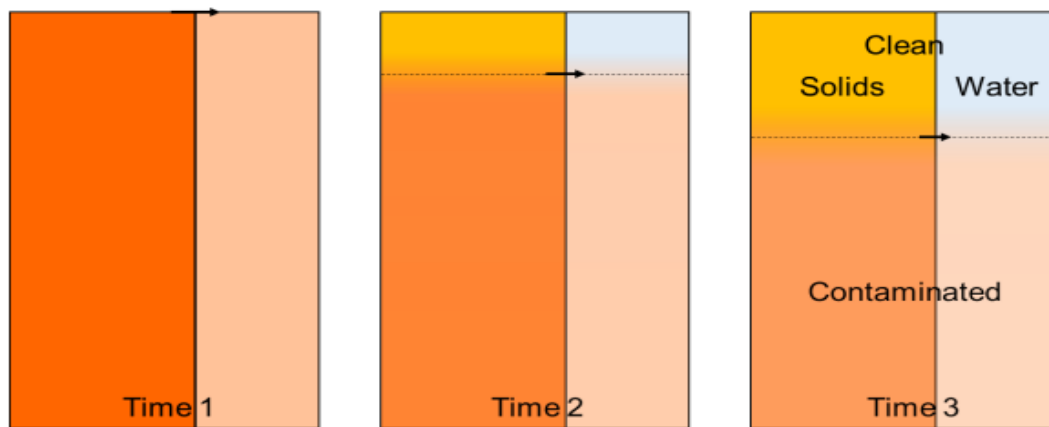
3.7 RESRAD-OFFSITE

Το πρόγραμμα, βάση του οποίου θα γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί, είναι το RESRAD-OFFSITE. Το πρόγραμμα αυτό περιέχει διάφορα μοντέλα για τους μηχανισμούς έκλυσης ραδιενέργειας από τα απόβλητα, για τη μοντελοποίηση της περιοχής πρωτογενούς ρύπανσης καθώς και για τον τρόπο που ρέει το νερό μέσα από αυτήν. Τα μοντέλα αυτά περιγράφονται στις παρακάτω υποενότητες.

3.7.1 Όρος Πηγής

Το RESRAD περιλαμβάνει κωδικοποιημένα τρεις βασικούς τρόπους έκλυσης σύμφωνα με τους οποίους απελευθερώνεται ραδιενέργεια από τα απόβλητα (E. GnanaPragasam, 2020):

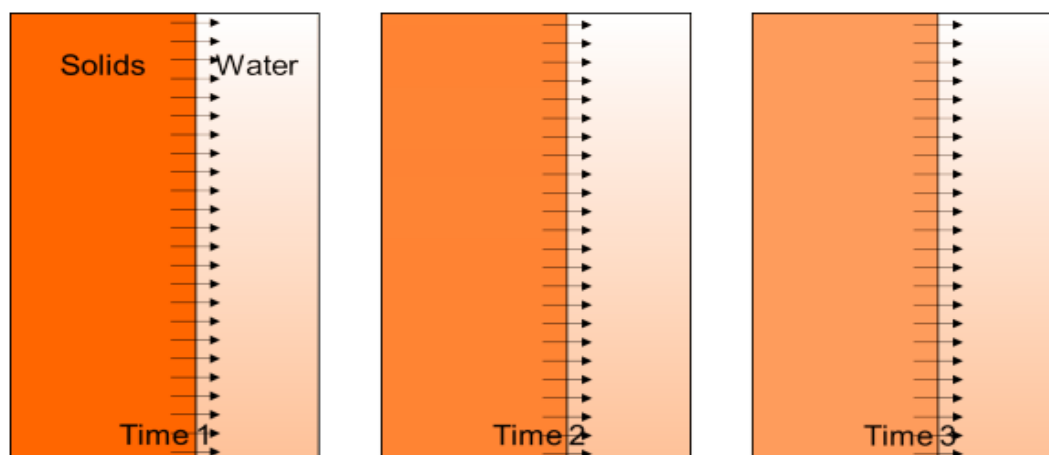
- **Ισορροπία Εκρόφησης (Equilibrium desorption):** Το ραδιονουκλίδιο βρίσκεται σε γραμμική ισορροπία εκρόφησης - προσρόφησης ανάμεσα στη στερεά και την υγρή φάση του εδάφους, διατηρώντας μία σταθερή αναλογία που καθορίζεται από την τιμή του συντελεστή κατανομής. Η ισορροπία θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί ακαριαία και η συγκέντρωση του ραδιονουκλιδίου στο νερό που εισέρχεται στο χώρο πρωτογενούς μόλυνσης, αυξάνεται ταχύτατα, μέχρι τη συγκέντρωση ισορροπίας. Το πρόγραμμα μοντελοποιεί την επαγωγική διασπορά του ραδιονουκλιδίου σε όλο το μήκος του χώρου αυτού και υπολογίζει την αντίστοιχη έκλυση στο κατώτερο άκρο της εγκατάστασης. Παρόλα αυτά, θεωρεί ομοιόμορφη κατανομή σε όλο το μήκος και συνεπώς δεν μπορεί να προσδιορίσει το πραγματικό προφίλ έκλυσης.



Εικόνα 9: Σχηματική παρουσίαση της Ισορροπίας Εκρόφησης

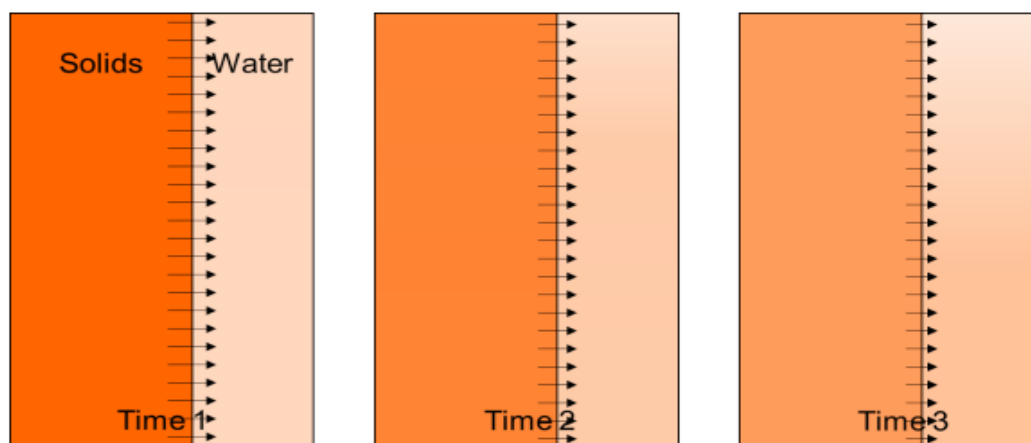
(E. Gnanapragasam, 2020)

- **Ισορροπίας Διάλυσης (Equilibrium solubility):** Το ραδιονουκλίδιο βρίσκεται σε ισορροπία διάλυσης-καθίζησης ανάμεσα στη στερεά και την υγρή φάση. Η ισορροπία χαρακτηρίζεται από μία συνολική συγκέντρωση διαλύτη, η οποία ισχύει για κάθε στοιχείο και όλα του τα ισότοπα είτε ραδιενεργά είτε σταθερά. Ωστόσο, ο κώδικας παραλείπει τα σταθερά ισότοπα και κατανέμει τη συγκέντρωση του διαλύτη μόνο στα ασταθή. Η συγκέντρωση των ισωτόπων στο νερό, αυξάνεται σταδιακά μέχρι τη συγκέντρωση ισορροπίας στο κατώτερο άκρο της περιοχής πρωτογενούς μόλυνσης, οπότε η ισορροπία επιτυγχάνεται αργά. Το πρόγραμμα υποθέτει ότι ο ρυθμός μεταφοράς κάθε νουκλιδίου είναι ομοιόμορφος χωρικά, αλλά φθίνει επίσης ομοιόμορφα, καθώς τα ισότοπα μεταφέρονται ή αλλάζουν ραδιολογικά.



Εικόνα 10: Σχηματική παρουσίαση της Ισοροπίας Διάλυσης
(E. Gnanapragasam, 2020)

- **Ρυθμός Έκλυσης Πρώτης Τάξης (First-Order Rate-Controlled Release):** Η διαδικασία που οδηγεί στη μεταφορά του ραδιονουκλιδίου από τη στερεά στην υγρή φάση μπορεί να είναι είτε με εκρόφηση είτε με διάλυση, αλλά πάντα απέχει σημαντικά από την ισορροπία. Χαρακτηρίζεται, ωστόσο, από έναν ενιαίο ρυθμό μεταφοράς. Το ποσοστό μεταφοράς θεωρείται ότι είναι ανάλογο με το απόθεμα του ραδιονουκλιδίου και της σταθεράς αναλογικότητας, ενώ ο ρυθμός έκλυσης καθορίζεται από τον χρήστη. Ο ρυθμός αυτός θα είναι ομοιόμορφα κατανομημένος σε όλο το μήκος της περιοχής πρωτογενούς μόλυνσης, αλλά θα μεταβάλλεται χρονικά, αφού το απόθεμα κάθε ισότοπου αλλάζει λόγω της μεταφοράς και των ραδιολογικών μεταλλαγών. Ο υπολογισμός της έκλυσης γίνεται από το κατώτερο άκρο.



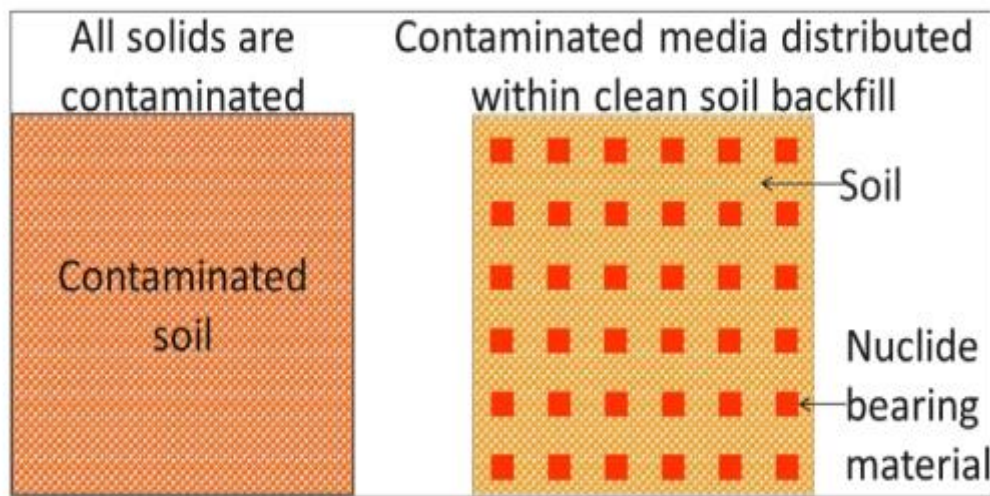
Εικόνα 11: Σχηματική παρουσίαση Ελεγχόμενου Ρυθμού Έκλυσης
(E. Gnanapragasam, 2020)

3.7.2 Μοντελοποίηση Περιοχής Πρωτογενούς Ρύπανσης

Η περιοχή στην οποία θα γίνει η απόθεση των ραδιενεργών αποβλήτων και που θα τοποθετηθούν τα δοχεία αποθήκευσης, όπως περιγράφηκε παραπάνω, αποτελεί την πρωτογενή ρύπανση. Ο κώδικας περιλαμβάνει τρία προσεγγιστικά μοντέλα για την εξέλιξη της μόλυνσης τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω: (E. GnanaPragasam, 2020)

- **Όλα τα στερεά είναι ρυπασμένα:** Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, μετά από κάποια χρονική περίοδο που ορίζει ο χρήστης, οι ιδιότητες όλων των στερεών έχουν πλήρως υποβαθμιστεί και όλη η εγκατάσταση απόθεσης έχει γίνει μία ενιαία αμμώδης μάζα. Συνεπώς στη χρήση αυτού του μοντέλου, χρησιμοποιείται η μάζα όλης της εγκατάστασης για να εκφραστούν οι συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων σε Bq/g. Η έκλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί με οποιοδήποτε από τους τρεις τρόπους που περιγράφονται στην παραπάνω υποενότητα (3.7.1), ενώ κρίσιμοι είναι οι παράγοντες γεωλογικοί και υδρολογικοί, οι οποίοι επιλέγονται από τον χρήστη του προγράμματος. Η μοντελοποίηση αυτή αποτελεί ρεαλιστικό σενάριο, συνήθως μόνο μετά την πάροδο πολλών εκατοντάδων ετών. Ωστόσο, η αξιοποίησή της και για πιο βραχύχρονους υπολογισμούς γίνεται για να λαμβάνεται ως η χειρότερη δυνατή εξέλιξη, δίνοντας έτσι το χειρίστο σενάριο και έχοντας έναν συντελεστή ασφαλείας σε σχέση με την πραγματική εξέλιξη.
- **Το υλικό που περιέχει τα ραδιονουκλίδια είναι εξίσου αγωγίμο με το περιβάλλον έδαφος:** Τα ραδιενεργά απόβλητα βρίσκονται συνήθως μέσα σε δοχεία, ανάλογα και με τη μορφή με την οποία συλλέχθηκαν και θεωρείται ότι το υλικό αυτό που φέρει τα ραδιονουκλίδια είναι ομοιόμορφα κατανομημένο σε όλη την εγκατάσταση. Το υλικό αυτό θεωρείται ότι έχει παρόμοιες φυσικές ιδιότητες με το έδαφος σε σχέση με την κίνηση του νερού. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει για τα ραδιονουκλίδια τα οποία συμπεριφέρονται διαφορετικά ανάλογα το υλικό στο οποίο βρίσκονται και αυτό ποσοτικοποιείται μέσω του συντελεστή κατανομής που πρέπει να οριστεί από τον χρήστη.
- **Διάχυση ως ο κυρίαρχος μηχανισμός μεταφοράς:** Στην περίπτωση αυτή τα ραδιονουκλίδια βρίσκονται αποθηκευμένα και προστατευμένα σε συγκεκριμένες δομές και δεν είναι διασκορπισμένα σε όλη την εγκατάσταση, και συνεπώς η μάζα που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της έκφρασης της συγκέντρωσης σε Bq/g είναι η μάζα που περιέχουν οι δομές στις οποίες τοποθετείται το υλικό που φέρει τα απόβλητα (π.χ. δοχεία αποθήκευσης). Το νερό που διεισδύει θεωρείται ότι ταξιδεύει μέσω του εδάφους και όχι μέσω

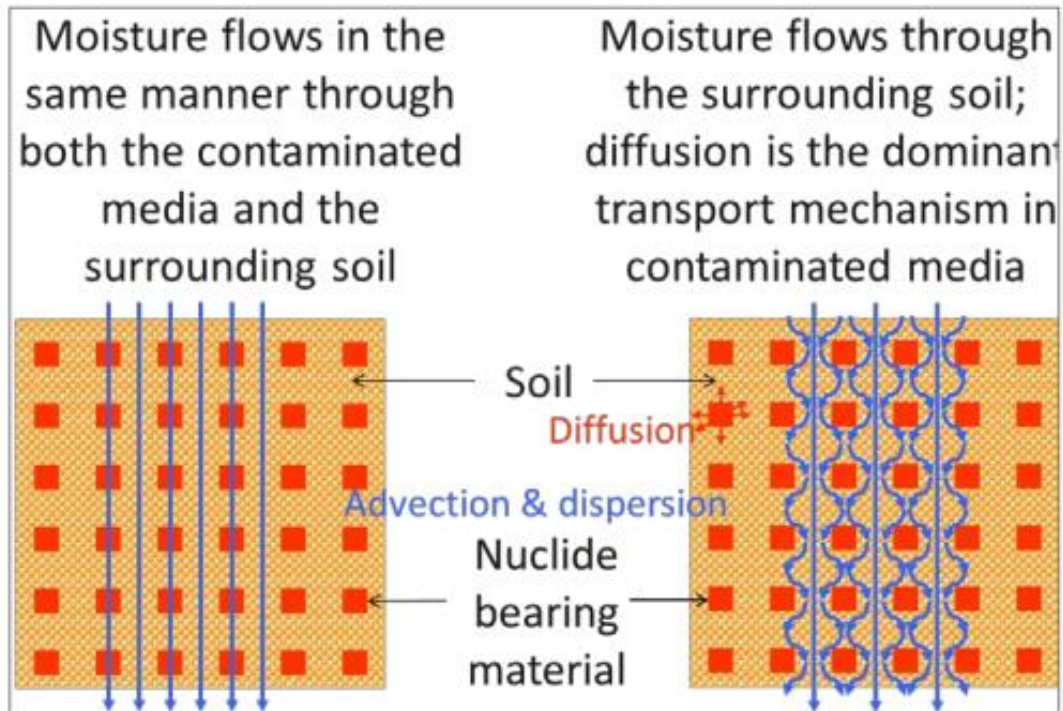
του υλικού που φέρει τα ραδιονουκλίδια, καθώς, λόγω της θωράκισης, το νερό εξαπλώνεται γύρω από το σημείο που βρίσκονται τα απόβλητα. Ωστόσο, κάποιοι από τους πόρους στο υλικό με τα απόβλητα θεωρείται ότι περιέχουν νερό, οπότε η διάχυση γίνεται ο βασικός μηχανισμός έκλυσης. Όπως και στο δεύτερο μοντέλο, έτσι και εδώ πρέπει να οριστούν συντελεστές κατανομής ανάλογα με το υλικό. Παράλληλα, τα ραδιονουκλίδια μπορούν να μετατραπούν από τη στερεά στην υδατινή φάση τους μόνο μέσω της ισορροπίας εκρόφησης (equilibrium desorption). Το μοντέλο αυτό είναι η πιο ρεαλιστική προσέγγιση για τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η διάθεση καθώς θυμίζει σε μεγάλο βαθμό και γεωμετρικά αλλά και φυσικά την εγκατάσταση διάθεσης που θα δημιουργηθεί.



Εικόνα 12: Κατανομή ρύπανσης στην περιοχή πρωτογενούς μόλυνσης

(E. Gnanapragasam, 2020)

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα, στην περίπτωση που θεωρηθεί ότι όλα τα στερεά είναι ρυπασμένα, η περιοχή ταφής αποτελείται από μία ενιαία μάζα με ομοιόμορφη κατανομή ραδιονουκλιδίων μέσα της, καθώς τα δοχεία αποθήκευσης αλλά και τα υλικά θωράκισης όπως το τσιμέντο έχουν υποβαθμιστεί πλήρως και έχουν και τη μορφή αλλά και τις ιδιότητες του χώματος. Αντιθέτως στη δεύτερη περίπτωση το χώμα είναι ακόμα καθαρό και η μόλυνση περιορίζεται στα δοχεία που περιέχουν τα ραδιενεργά απόβλητα. Το μοντέλο αυτό είναι πιο κατάλληλο μόνο τα πρώτα χρόνια λειτουργίας της εγκατάστασης, όπου τα υλικά της μηχανικής κάλυψης έχουν διατηρήσει τις ιδιότητές τους και δεν αφήνουν το νερό να εισχωρήσει στην εγκατάσταση.



Εικόνα 13: Ροή νερού μέσα από την περιοχή πρωτογενούς ρύπανσης

(E. Gnanapragasam, 2020)

Στην αριστερή εικόνα παρουσιάζεται σχηματικά η ροή του νερού όταν το υλικό που περιέχει τα ραδιονουκλίδια είναι εξίσου αγώγιμο με το περιβάλλον έδαφος, όπου το νερό διαπερνά όλα τα στερεά προς τον πάτο της εγκατάστασης, θεωρητικά και μέσα από τα δοχεία αποθήκευσης, απ' όπου συλλέγει ραδιονουκλίδια με το πέρασμά του, τα οποία μεταφέρονται όπως η ροή. Αντίθετα, στη δεξιά εικόνα, όπου η διάχυση αποτελεί τον κύριο μηχανισμό μεταφοράς, το νερό καθώς ρέει μέσα από την εγκατάσταση κατευθύνεται περιμετρικά των δοχείων που περιέχουν τα ραδιενεργά απόβλητα, μεταφέροντας μικρότερη ποσότητα ραδιονουκλιδίων σε σχέση με τα άλλα μοντέλα, μιάς και τα νουκλίδια εισέρχονται στη ροή μέσω διάχυσης, συνήθως από κάποιες μικρές ρωγμές ή πόρους, που δημιουργούνται στα ασάλινα δοχεία με το πέρασμα των χρόνων.

4. Αποτελέσματα

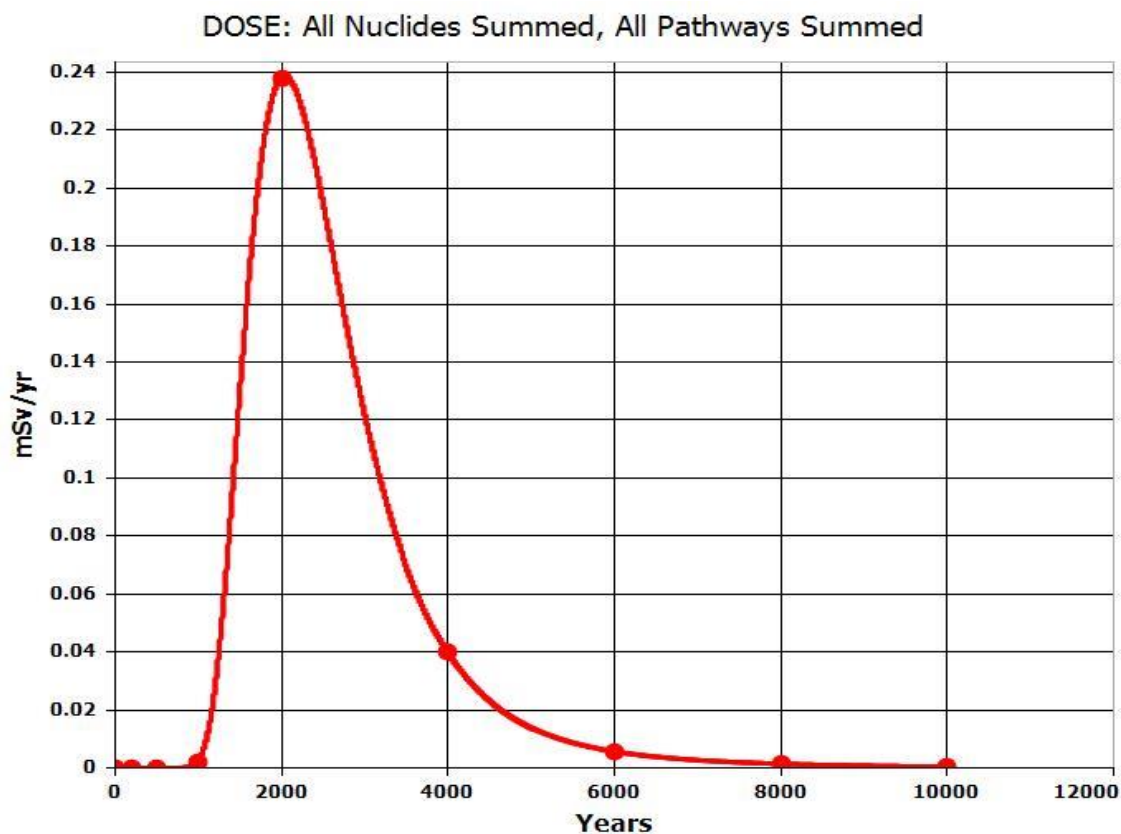
Τα δεδομένα τα οποία συλλέχθηκαν, όπως εξηγήθηκε στην προηγούμενη ενότητα καθώς και ο σχεδιασμός της εγκατάστασης, εισάχθηκαν στο πρόγραμμα RESRAD-OFFSITE, μέσω του οποίου γίναν οι υπολογισμοί για τα διάφορα σενάρια. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν σε αυτό το κεφάλαιο.

4.1 Βασικό σενάριο

4.1.1 Συνολική δόση

Στο πρώτο σενάριο, το οποίο εξετάστηκε, θεωρήθηκε ότι ύστερα από 100 χρόνια, υπάρχει ακαριαία υποβάθμιση των ιδιοτήτων των υλικών της μηχανικής κάλυψης σύμφωνα με το μοντέλο που εξηγήθηκε παραπάνω (3.7.2), και ο κύριος μηχανισμός έκλυσης είναι η ισορροπία εκρόφησης (equilibrium desorption). Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις οδούς έκθεσης που παρουσιάστηκαν παραπάνω, εκτιμήθηκε υπολογιστικά η χρονική εξέλιξη της έκθεσης αντιπροσωπευτικού ατόμου. Το άτομο υπενθυμίζεται ότι κατοικεί σε απόσταση 300 μέτρων από την εγκατάσταση και χρησιμοποιεί πηγάδι, στο ίδιο σημείο, το οποίο τροφοδοτείται από τον υδροφόρο που περνά κάτω από την εγκατάσταση. Η συνολική έκθεση παρουσιάζεται στο σχήμα:

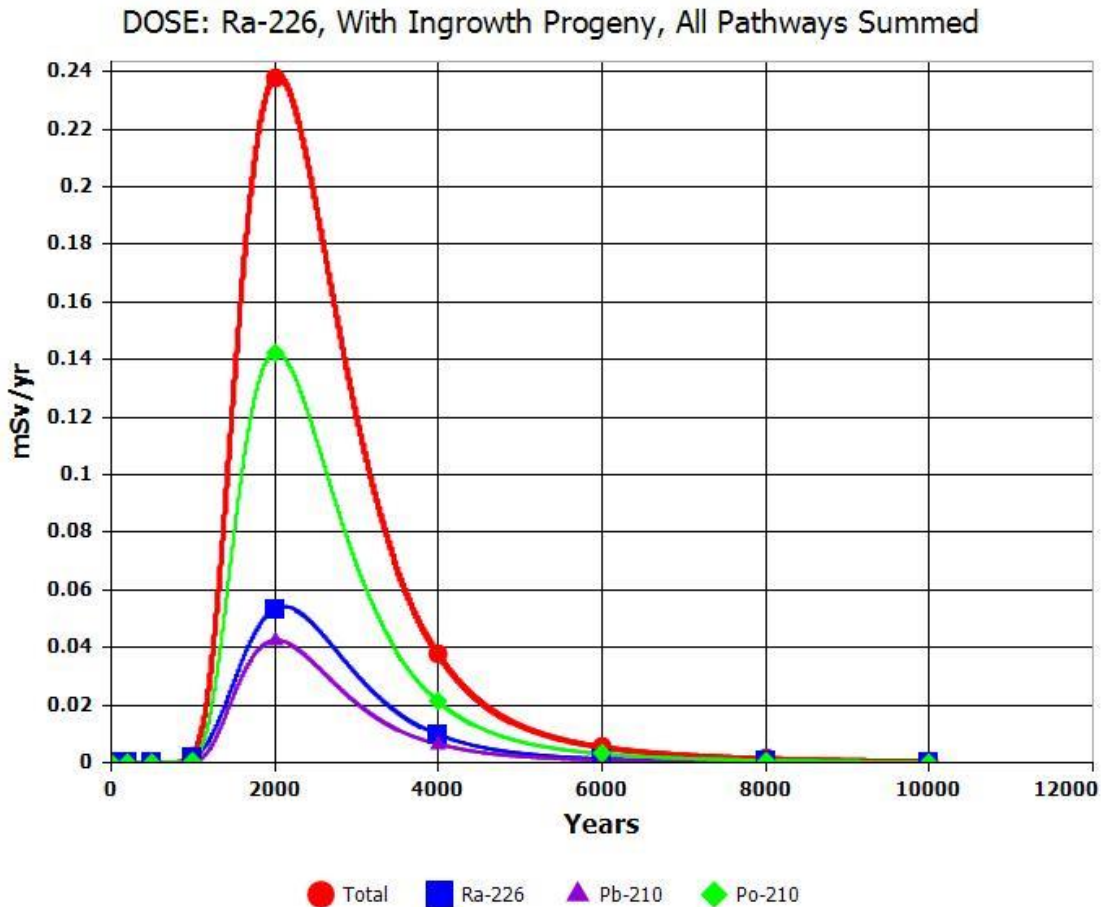
:



Σχήμα 1: Συνολική ετήσια δόση, ως συνάρτηση του χρόνου

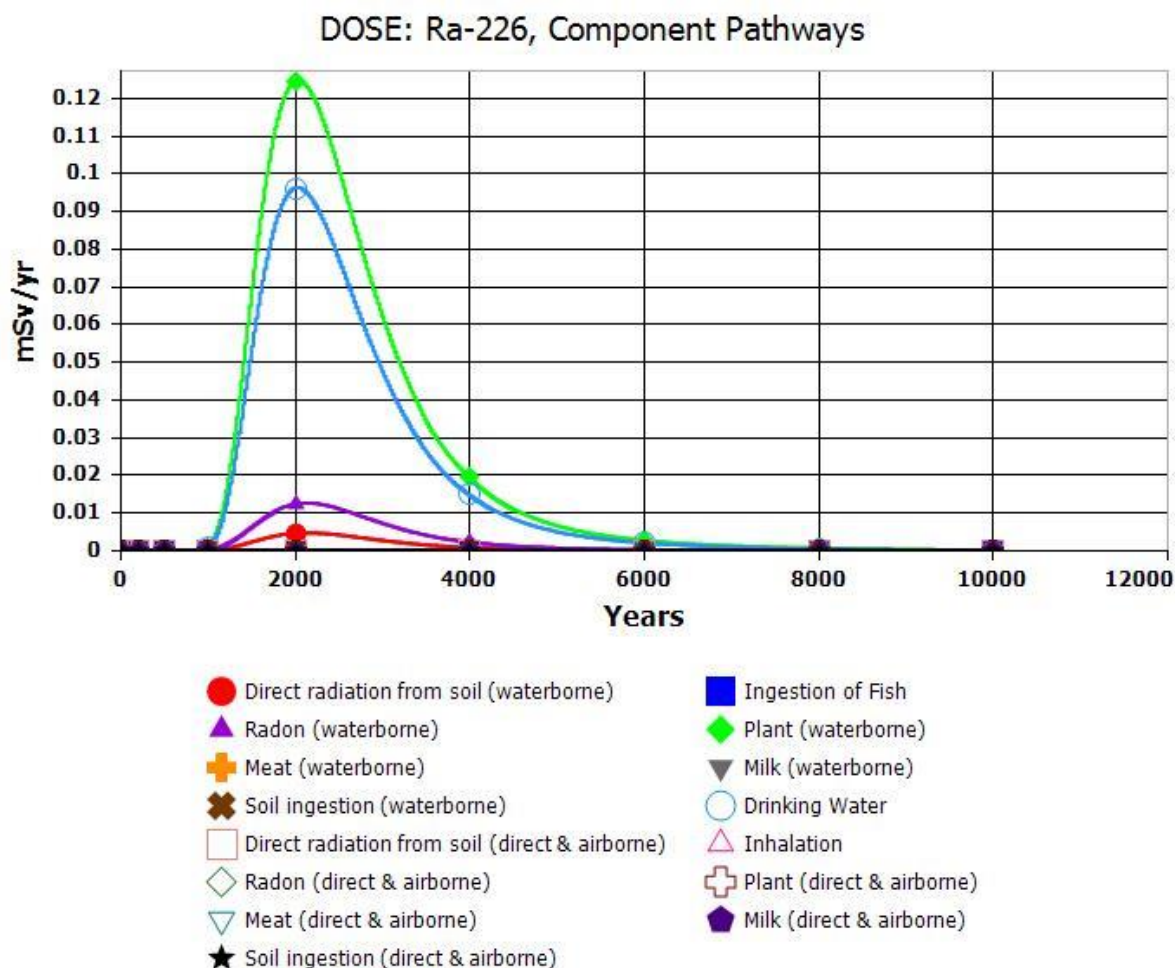
Όπως ήταν αναμενόμενο, τα πρώτα χρόνια δεν υπάρχει έκλυση ραδιενέργειας, καθώς οι ιδιότητες των υλικών της εγκατάστασης δεν έχουν προλάβει να υποβαθμιστούν. Στη συνέχεια ξεκινάει η απελευθέρωση και η μέγιστη δόση παρατηρείται ύστερα από 2.000 χρόνια. Αυτό συμβαίνει λόγω των μεγάλων χρόνων ημιζωής που έχουν τα περισσότερα ραδιονουκλίδια και συγκεκριμένα του ραδίου και του άργυρου που αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό. Η μέγιστη δόση των 0.24 mSv /έτος είναι λίγο μικρότερη από το επίπεδο των 0.3 mSv/γ που τυπικά συστήνεται παγκοσμίως (ΙΑΕΑ, 2004)για τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων. Αξίζει να αναλυθεί κάθε ραδιονουκλίδιο ξεχωριστά, για να παρατηρηθούν αυτά που προκαλούν το μεγαλύτερο πρόβλημα.

4.1.2 Ra-226



Σχήμα 2: Συνολική δόση Ra-226 και παραγώγων

Το ^{210}Pb και το ^{210}Po παράγονται κατά τη διάσπαση του ραδίου. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, το ράδιο και τα παράγωγά του αποτελούν το βασικότερο πρόβλημα, καθώς είναι υπεύθυνα σχεδόν για όλη τη δόση που εκλύεται συνολικά. Ένα σημαντικό πρόβλημα αποτελεί η εμφάνιση της μέγιστης δόσης σε χρονικό ορίζοντα 2.000 χρόνων όπου προφανώς δεν μπορεί να υπάρξει κανένας έλεγχος και η ζώνη στην οποία τοποθετείται η εγκατάσταση θα έχει ομογενοποιηθεί πλήρως με τον περιβάλλοντα χώρο, ενώ αμφίβολο θεωρείται αν θα υπάρχει γνώση της ύπαρξης του χώρου ταφής στην κοινωνία.

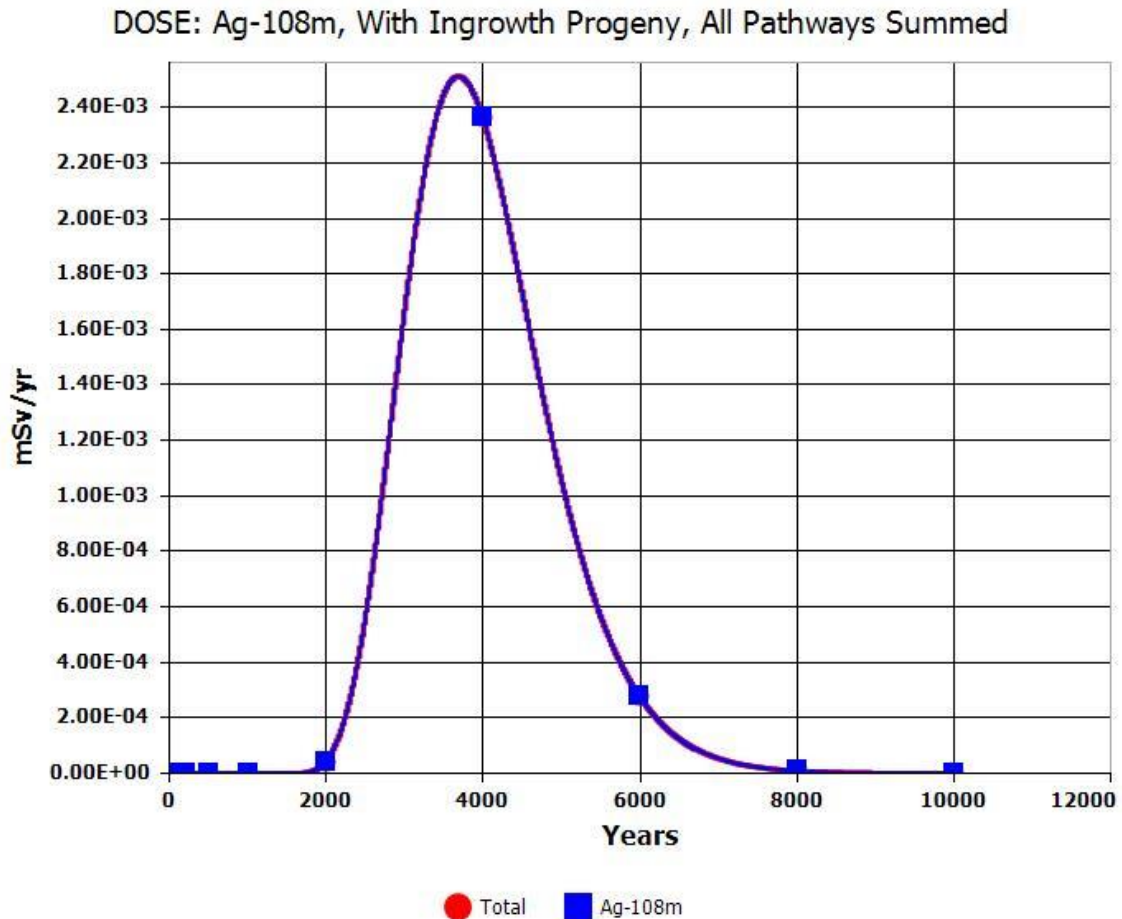


Σχήμα 3: Οδοί έκθεσης Ra-226

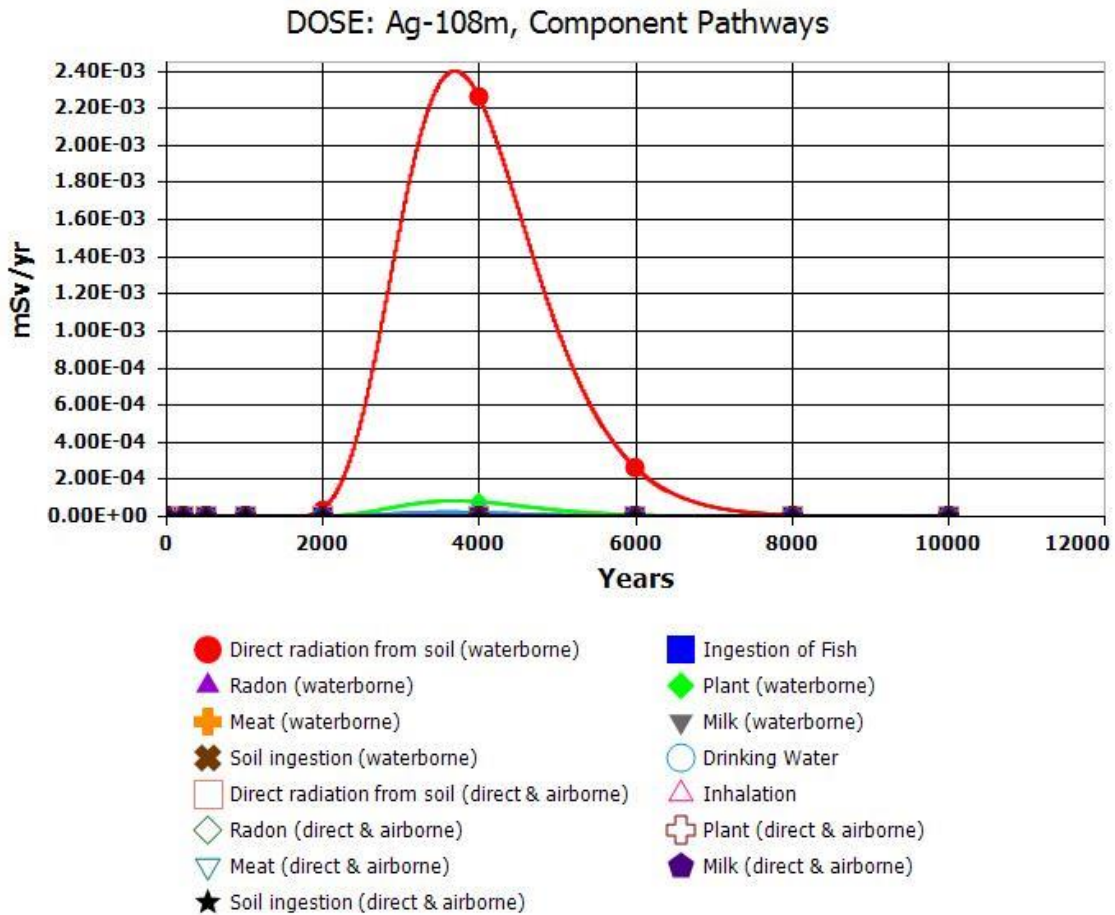
Τα φυτά που έχουν μολυνθεί μέσω του νερού που καταναλώνουν ,αποτελούν τη βασική δίοδο μέσω της οποίας γίνεται η έκθεση, ενώ σημαντικό είναι και το ποσοστό που διαδίδεται μέσω του πόσιμου νερού. Λιγότερο σημαντική είναι η έκθεση από το ραδόνιο και απευθείας από το χώμα. Το νερό ως βασική οδός μεταφοράς του ραδίου εξηγείται από τη χαμηλή τιμή του συντελεστή κατανομής στερεού-υγρού (K_d), ο οποίος υποδεικνύει την εύκολη σχετικά μεταφορά του ραδίου σε υγρή φάση και συνεπώς τη διαφυγή αυτού από την εγκατάσταση και την επαφή του με το νερό στους πόρους του υδροφόρου ορίζοντα και από εκεί στους ζωντανούς οργανισμούς της περιοχής.

4.1.3 Ag-108m

Το δεύτερο πιο σημαντικό ραδιονουκλίδιο είναι ο ^{108m}Ag , ο οποίος είναι και το υλικό κατασκευής των ράβδων ελέγχου και ανήκει στην κατηγορία των ενεργοποιημένων μετάλλων.



Σχήμα 4: Συνολική Δόση Ag-108m

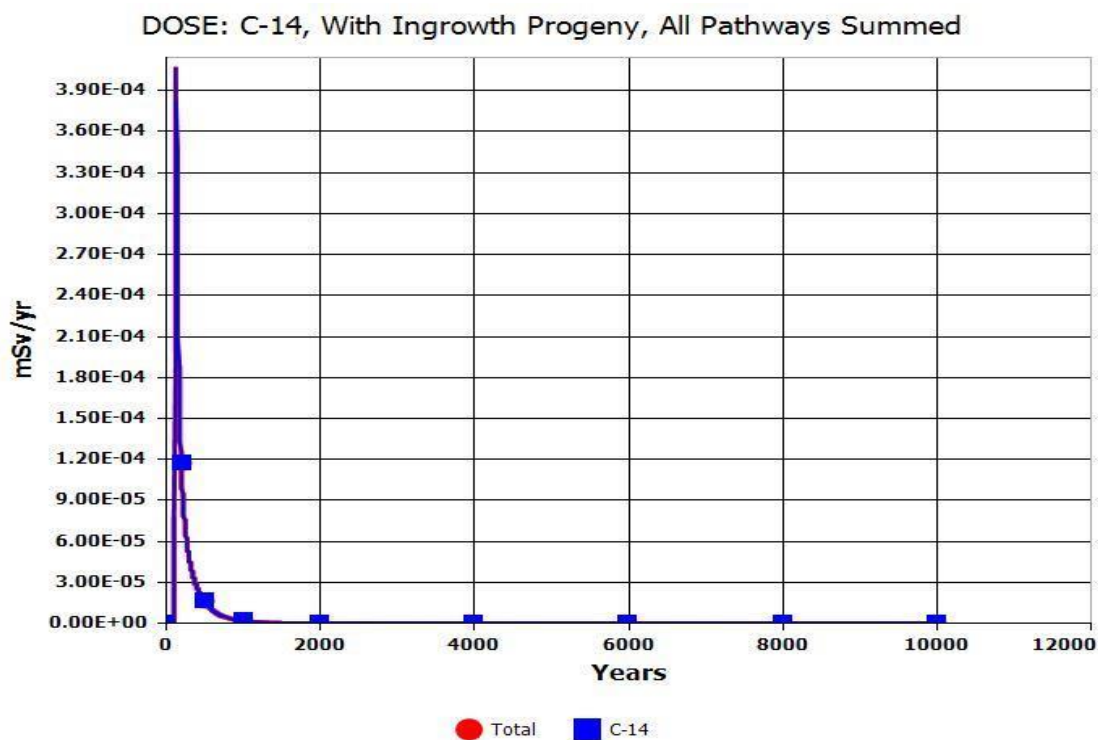


Σχήμα 5: Οδοί έκθεσης Ag-108m

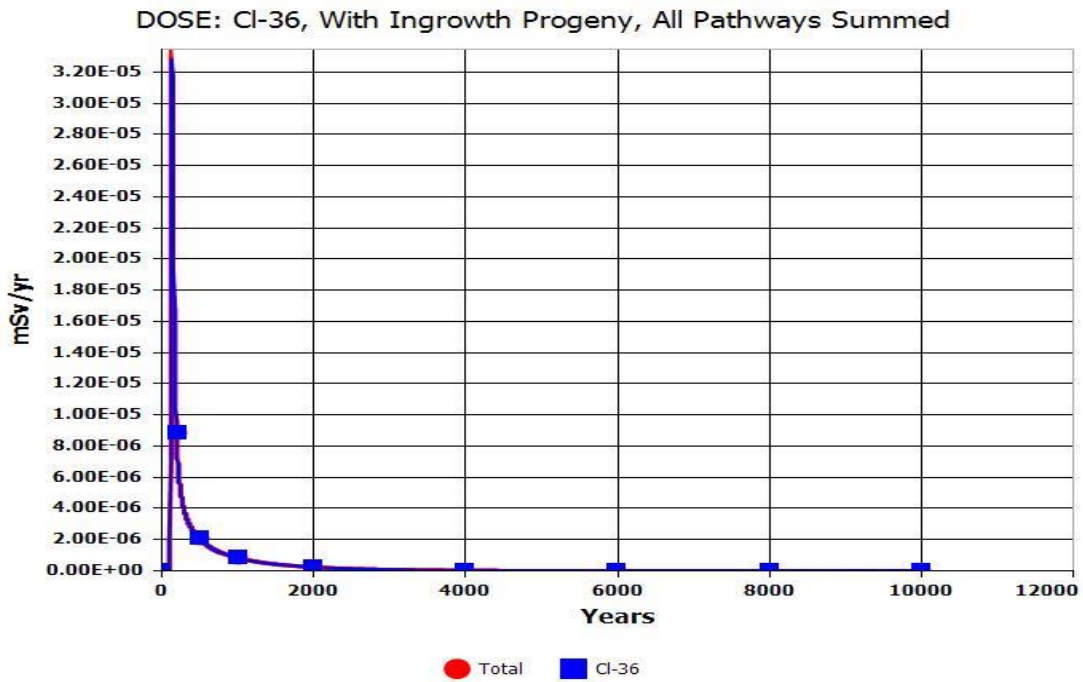
Στα δύο παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται ότι ο άργυρος, εμφανίζει τη μέγιστη δόση λίγο πριν τα 4.000 χρόνια, η οποία είναι 0.0024 mSv/έτος. Η δόση αυτή, ωστόσο, είναι πολύ μικρή. Ο Ag-108m αν και έχει σημαντικά μεγαλύτερη αρχική ενεργότητα (βλ. Πίνακα 6), παρουσιάζει πολύ χαμηλότερη δόση σε σχέση με το ράδιο. Αυτό οφείλεται στον μεγαλύτερο συντελεστή κατανομής στο έδαφος, ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα την πιο αργή μεταφορά του αργύρου, η οποία όπως φαίνεται από το Σχήμα 4 εξελίσσεται σε περίοδο μερικών χιλιάδων χρόνων. Αυτό σε συνδυασμό με τον μικρότερο χρόνο ημιζωής (περίπου 400 χρόνια) προκαλεί σημαντική απομείωση της ενεργότητας του αργύρου και τελικά πολύ μικρότερη δόση.. Η άμεση ακτινοβόληση μέσω του εδάφους, το οποίο κρατάει το μολυσμένο νερό μέσα του, αποτελεί την κύρια οδό, με τις άλλες να είναι σχεδόν αμελητέες.

4.1.4 Υπόλοιπα ραδιονουκλίδια

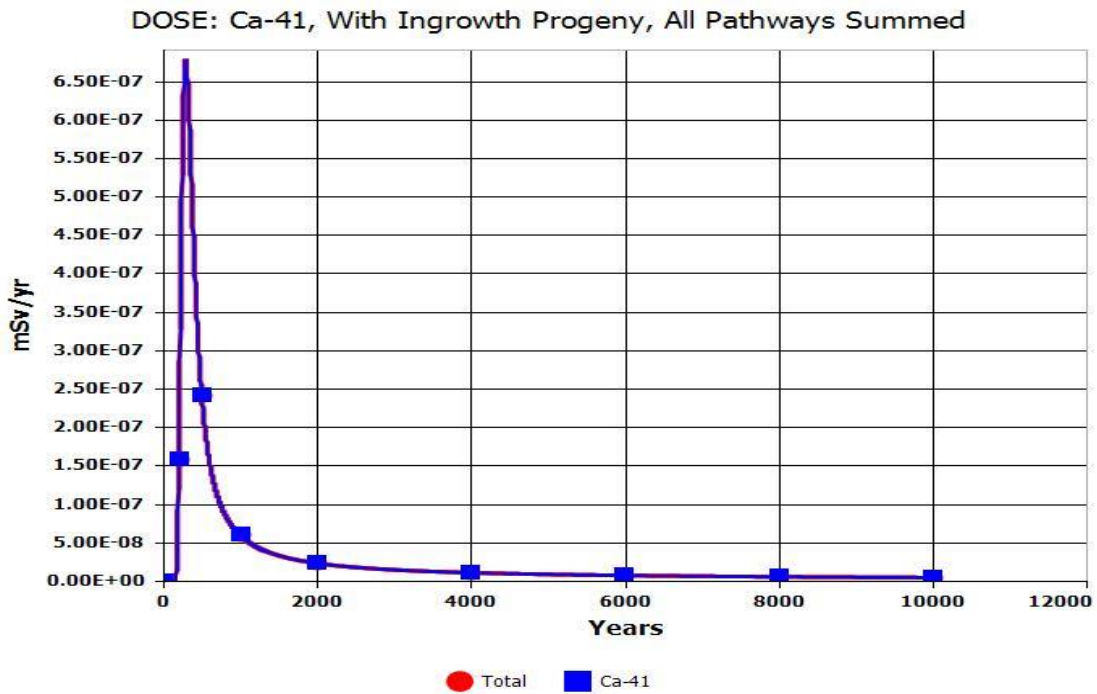
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα των υπόλοιπων ραδιονουκλιδίων, τα περισσότερα από τα οποία, ωστόσο, προκαλούν πολύ μικρή δόση.



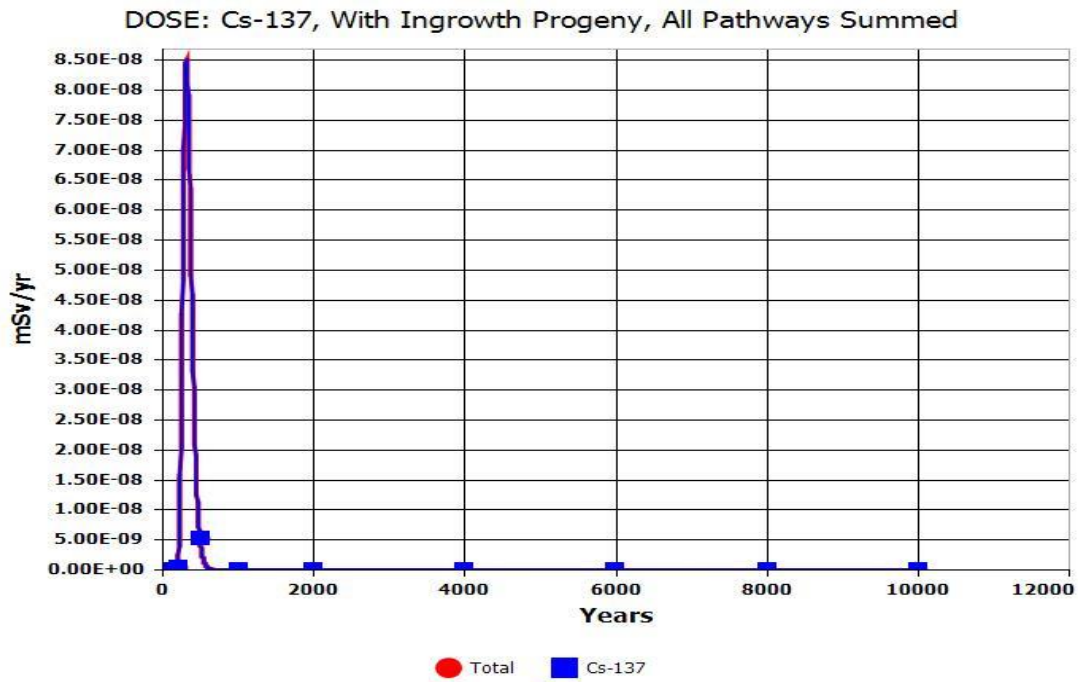
Σχήμα 6: Δόση C-14



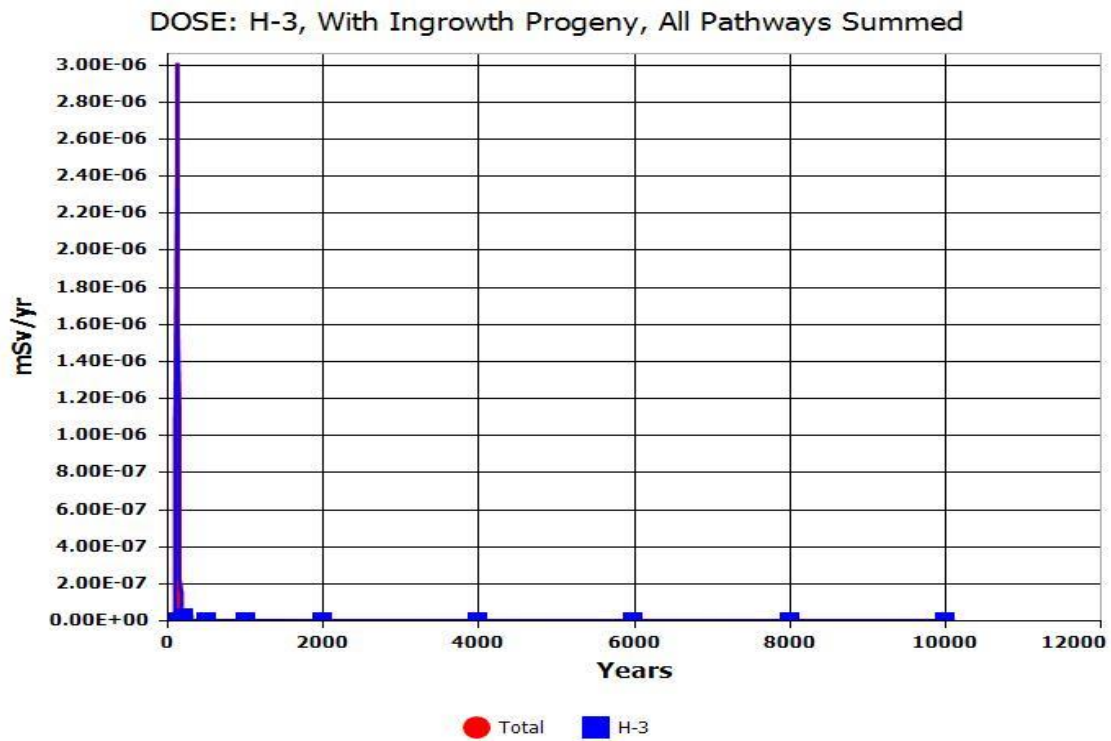
Σχήμα 7: Δόση Cl-36



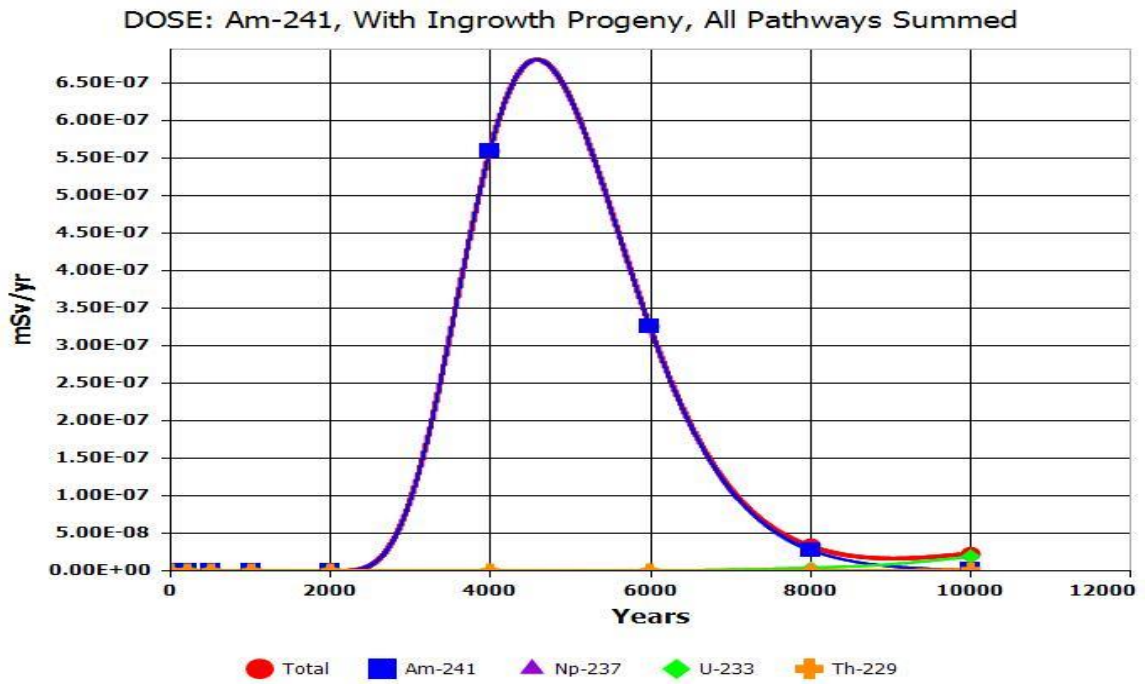
Σχήμα 8: Δόση Ca-41



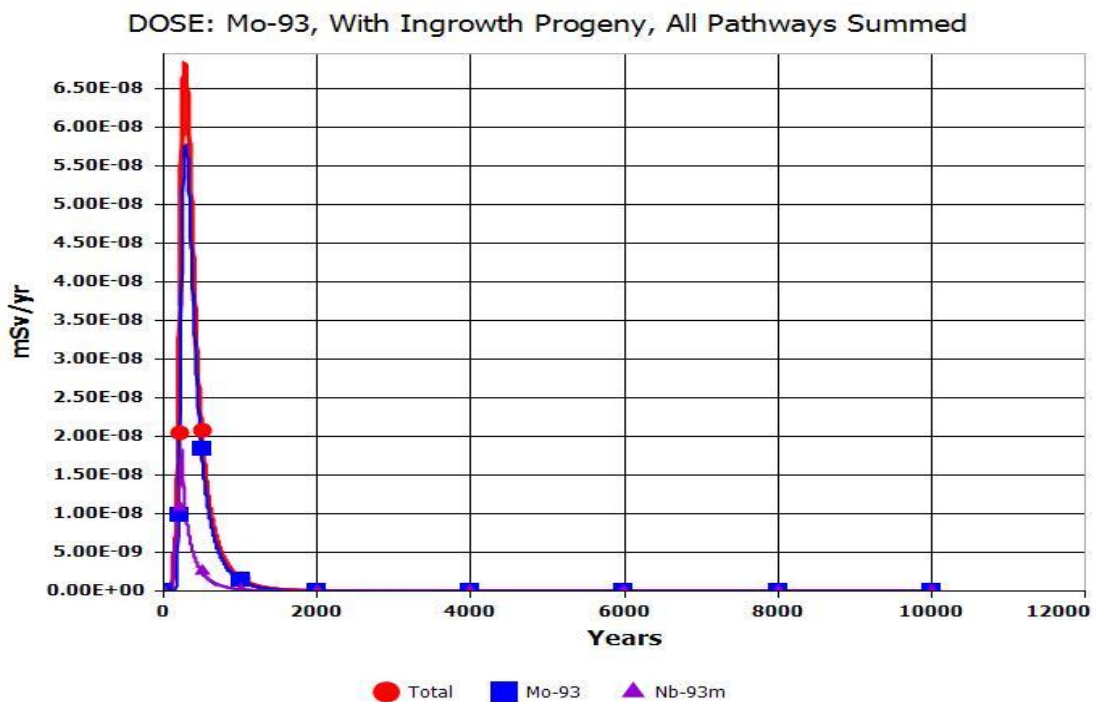
Σχήμα 9: Δόση Cs-137



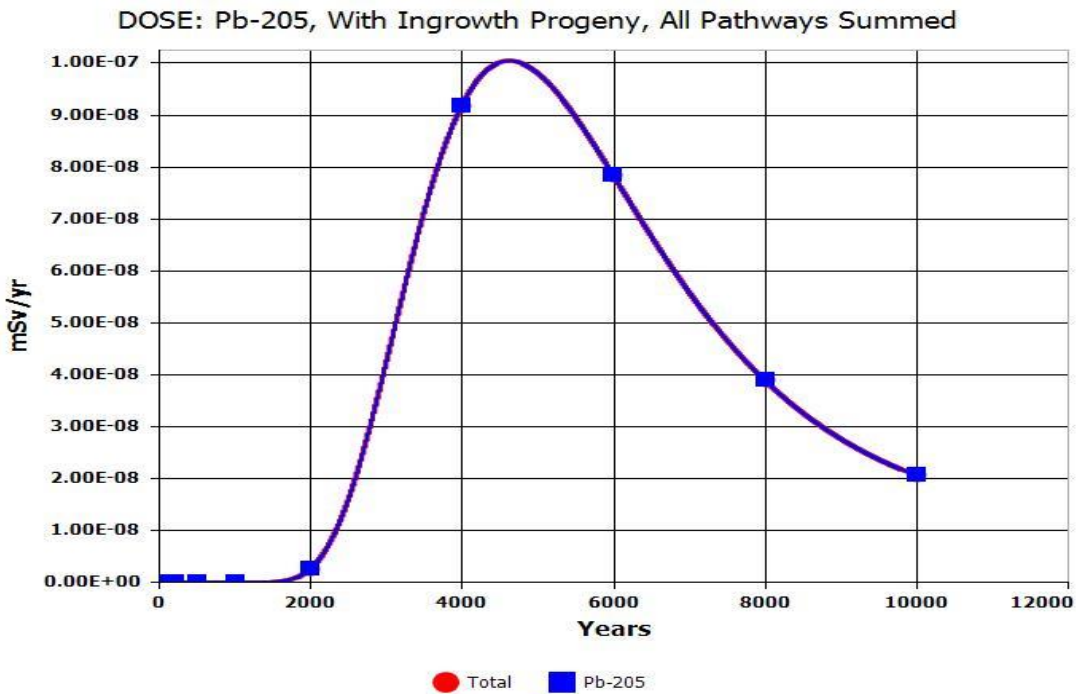
Σχήμα 10: Δόση H-3



Σχήμα 11: Δόση Am-241 και παραγώγων

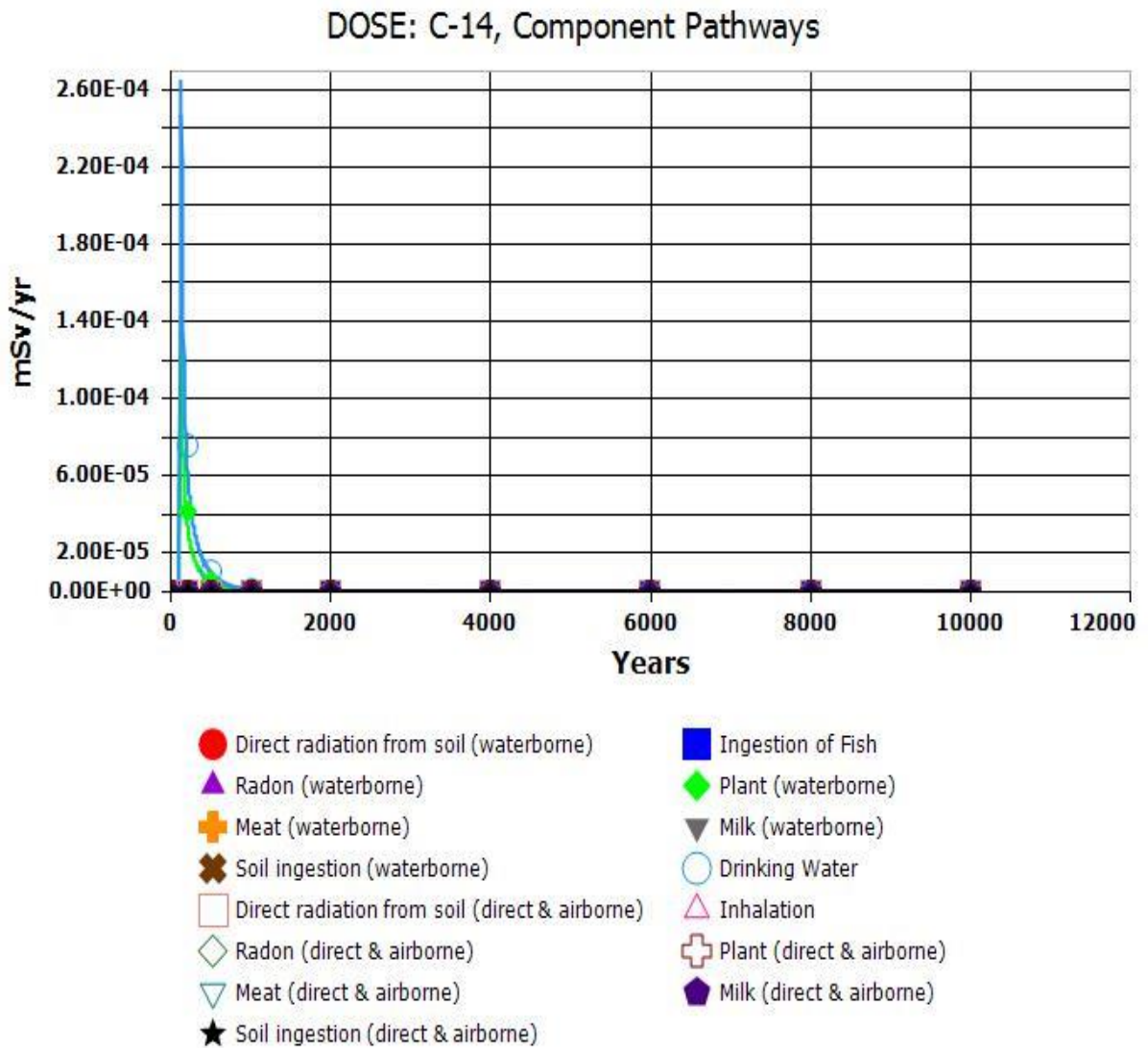


Σχήμα 12: Δόση Mo-93 και παραγώγων

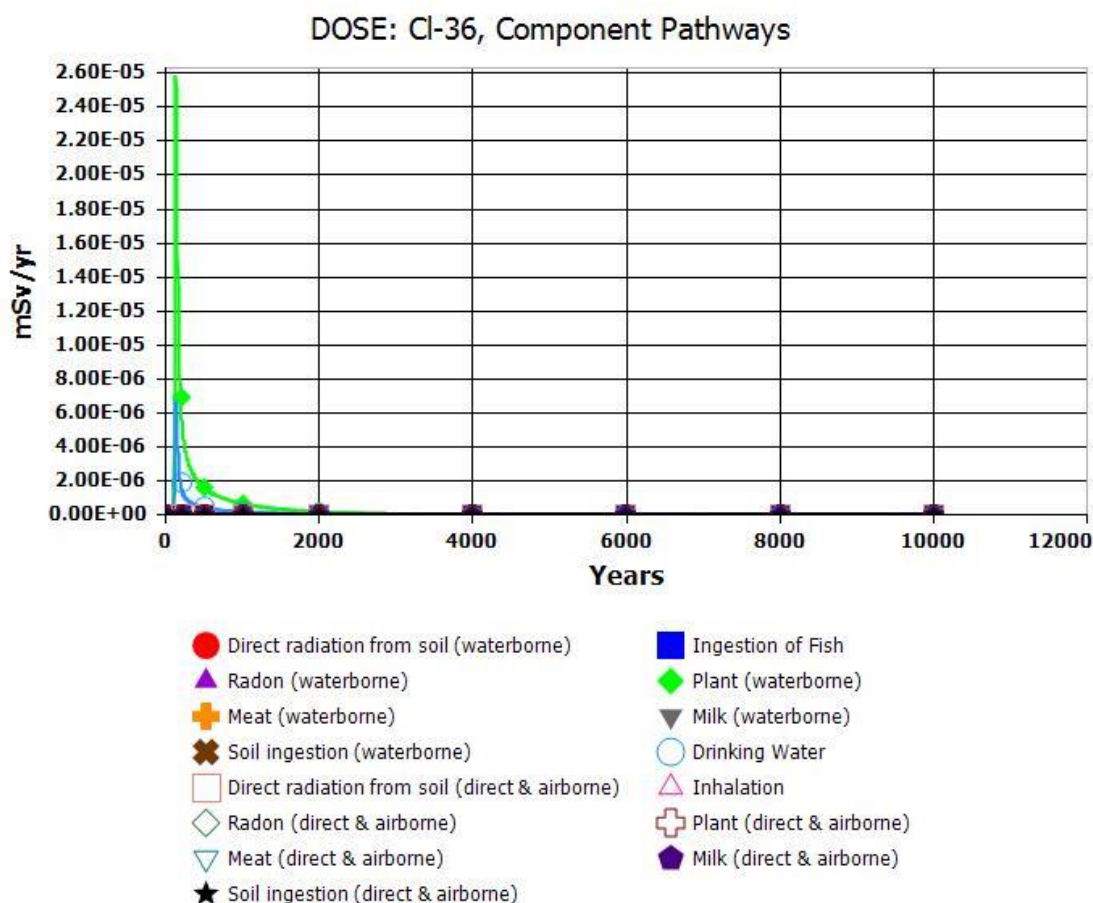


Σχήμα 13: Δόση Pb-205

Τα ραδιονουκλίδια με μικρό συντελεστή στερεού - υγρού (Kd) αποδεσμεύονται πολύ νωρίς και δημιουργούν κινδύνους για σχετικά μικρά χρονικά διαστήματα. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο να προκύψει, καθώς στα στοιχεία αυτά επικρατεί η συγκέντρωση σε υγρή φάση, κάνοντάς το πιο εύκολο να διαπεράσουν τη θωράκιση και μέσα από τους πόρους του εδάφους, να περάσουν στον υδροφόρο ορίζοντα και να ρυπαίνουν το νερό. Λόγω αυτής της φυσικής ιδιότητας, όπως φαίνεται και στα δύο σχήματα που ακολουθούν (βλ. Σχήμα 14-15) για τα δύο πιο σημαντικά ραδιονουκλίδια με μικρό συντελεστή Kd, οι βασικοί οδοί που προκαλούν την επαφή με τη ραδιενεργή δόση που εκλύουν είναι άμεσα συσχετισμένοι με το νερό (φυτά που έχουν καταναλώσει μολυσμένο νερό, άμεση κατάποση μολυσμένου νερού). Αντίθετα, τα ραδιονουκλίδια με μεγάλο συντελεστή κατανομής (Pb-205, Am-241) προκαλούν έκθεση η οποία εξελίσσεται πολύ πιο αργά, με κορυφές που απαντώνται μετά από αρκετές χιλιάδες χρόνια.



Σχήμα 14: Οδοί έκθεσης C-14



Σχήμα 15: Οδοί έκθεσης Cl-36

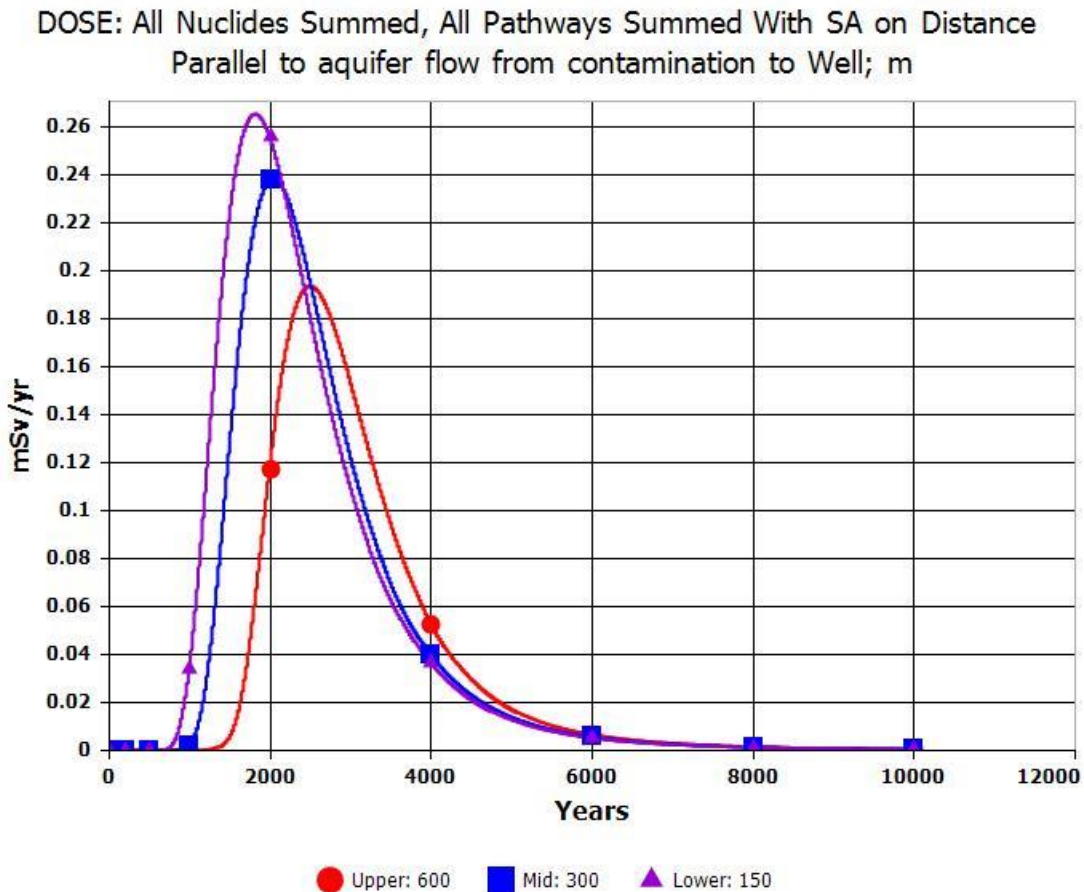
4.2 Ανάλυση Ευαισθησίας σε Παράγοντες

Το σενάριο που αναλύθηκε παραπάνω, μπορεί να επηρεάζεται σημαντικά από συγκεκριμένους παράγοντες. Παρακάτω παρουσιάζεται ανάλυση ευαισθησίας της εκτιμώμενης έκθεσης σε σχέση με σημαντικές παραδοχές (παραμέτρους) των υπολογισμών.

4.2.1 Απόσταση πηγαδιού

Είχε θεωρηθεί ότι σε απόσταση 300 μέτρα από την εγκατάσταση διάθεσης, βρίσκεται ένα πηγάδι από το οποίο αντλείται νερό από τους ανθρώπους που ζουν στο σημείο. Η απόσταση του πηγαδιού επιδρά λόγω της διαμήκου διασποράς του νερού, που βρίσκεται στον υδροφόρο ορίζοντα και της κατακράτησης των ραδιονουκλιδίων ανάλογα με τον συντελεστή κατανομής. Οπότε, όσο πιο κοντά βρίσκεται το πηγάδι,

τόσο πιο εύκολα, η ρύπανση που περνάει από τη ζώνη πρωτογενούς ρύπανση στον υδροφόρο ορίζοντα μεταδίδεται στην περιοχή του πηγαδιού. Μελετήθηκε η ίδια συνθήκη αν το πηγάδι βρισκόταν στη μισή (150m) και στη διπλάσια (600m) απόσταση. Τα διαγράμματα που προέκυψαν παρουσιάζονται παρακάτω:



Σχήμα 16: Ευαισθησία συνολικής δόσης σε σχέση με την απόσταση του πηγαδιού από το σημείο διάθεσης

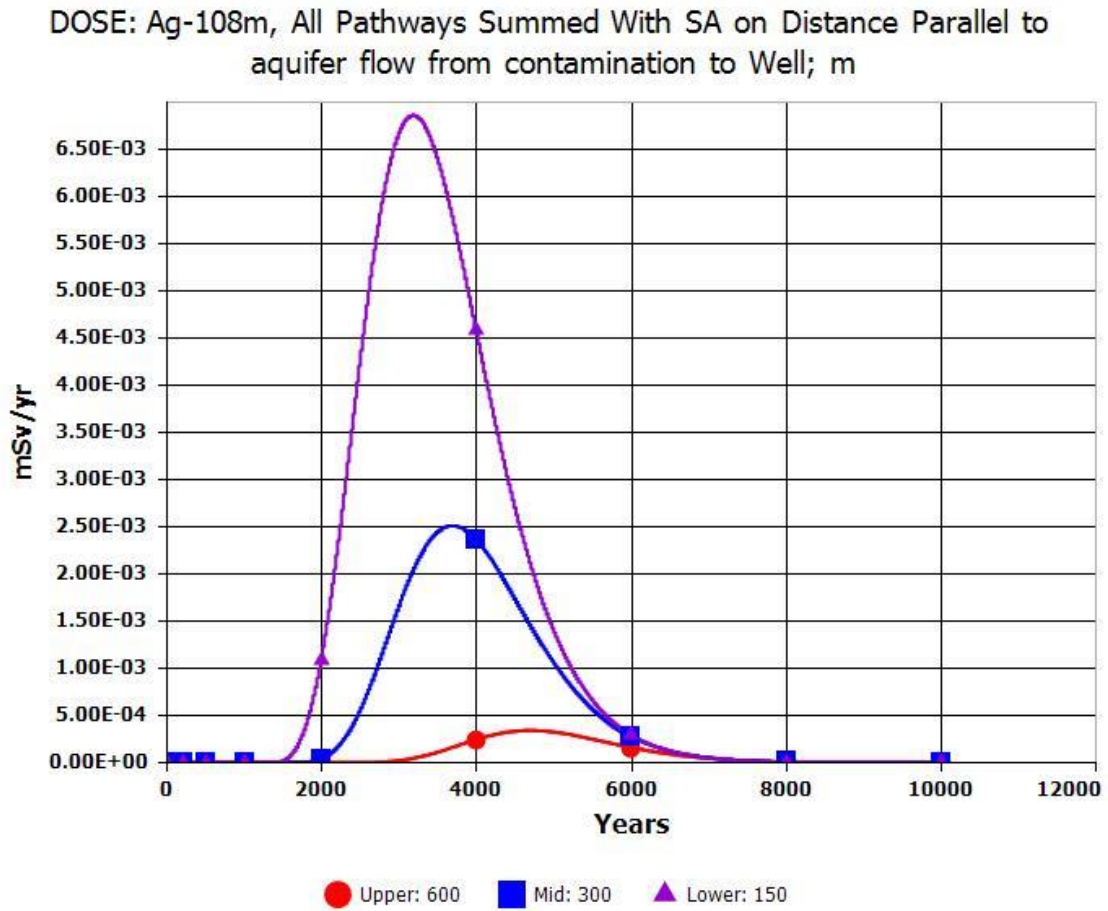
Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η μεταβολή της συνολικής δόσης είναι της τάξης του 8% είτε για τη μείωση είτε για την αύξηση της απόστασης του πηγαδιού. Για το μίγμα και την ενεργότητα των ραδιονουκλιδίων σε συνδυασμό με τις υδρολογικές παραμέτρους που θεωρούνται στην παρούσα ανάλυση, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η απόσταση του σημείου διάθεσης από τις κατοικίες δεν έχει μεγάλη επίδραση στη δόση από το υπόγειο νερό. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικό αν επιβεβαιωθεί από το τελικό απόθεμα των αποβλήτων και τα ακριβή χαρακτηριστικά της τοποθεσίας, καθώς η μικρή απόσταση από τις κατοικίες δεν αποκλείει αναγκαστικά τη διάθεση των αποβλήτων. Υπενθυμίζεται ότι στην περίπτωση

που κρινόταν ακατάλληλη, λόγω αυτού η επέκταση της ήδη υπάρχουσας εγκατάστασης προσωρινής αποθήκευσης στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», θα απαιτούνταν αναζήτηση νέου σημείου και επομένως σημαντικά μεγαλύτερο κόστος.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής της δόσης, σε συνάρτηση με την απόσταση του πηγαδιού του ραδίου και του αργύρου που αποτελούν και τα δύο πιο σημαντικά ραδιονουκλίδια. Αν και για το ράδιο ισχύουν τα παραπάνω, δηλαδή η επίδραση της απόστασης φαίνεται να είναι μικρή, για τον άργυρο προκύπτει ότι η απόσταση του πηγαδιού μπορεί να έχει μεγάλη επίπτωση της εκτιμώμενη έκθεση. Ειδικότερα, η δόση του αργύρου παρουσιάζει αύξηση 160% και μείωση κοντά στο 70%, ενώ το ράδιο αυξάνεται και μειώνεται κατά 8%, όπως και η συνολική δόση. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από τον μεγαλύτερο συντελεστή κατανομής του αργύρου στο έδαφος, ο οποίος, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, συνεπάγεται πιο αργή κίνηση στη γεώσφαιρα, συμπεριλαμβανομένου του υδροφόρου. Η πιο αργή κίνηση, με τη σειρά προκαλεί, για τη μεγαλύτερη απόσταση, σημαντικά μεγαλύτερη απομείωση λόγω ραδιενεργής διάσπασης και τελικά αρκετά μικρότερη έκθεση λόγω του νερού. Στο ράδιο, αντίθετα, που έχει μικρότερο συντελεστή κατανομής και μεγαλύτερο χρόνο ημιζωής, σημαντική ενεργότητα καταλήγει στο νερό και μάλιστα πιο σύντομα, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη έκθεση, η οποία δεν εξαρτάται σημαντικά από την απόσταση του πηγαδιού.

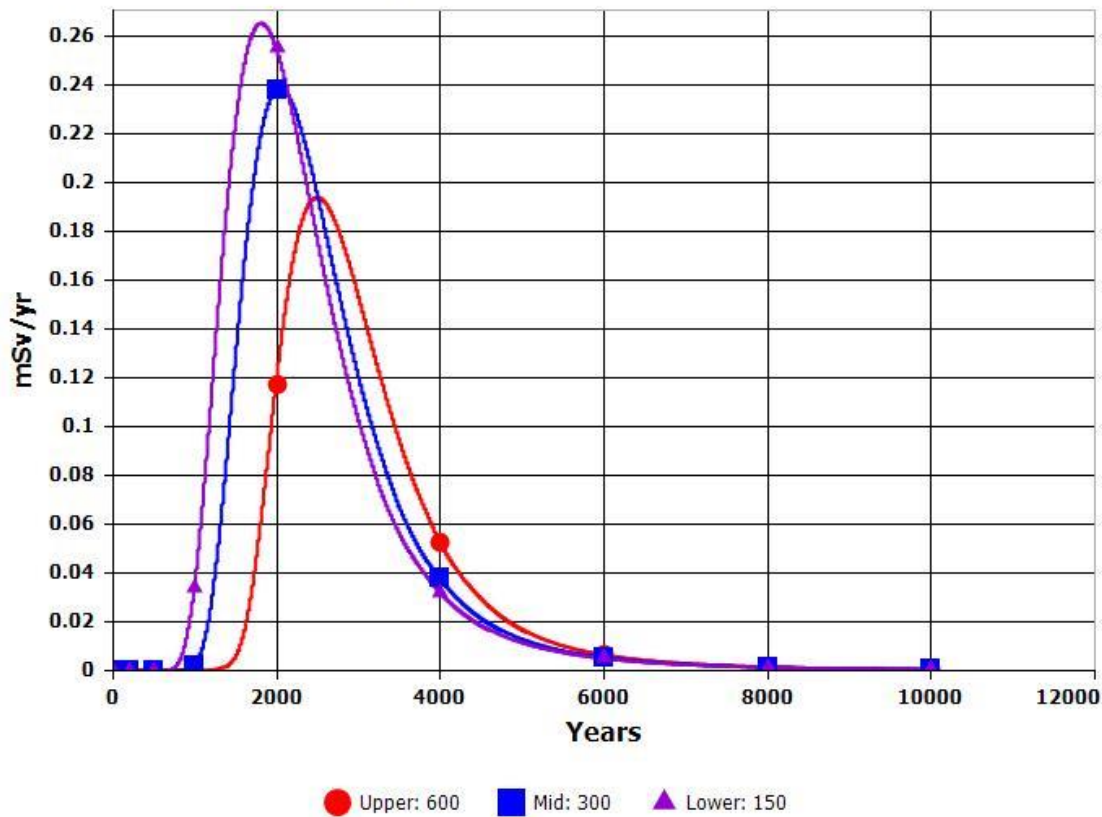
Φαίνεται ξεκάθαρα ότι ο άργυρος έχει για τη δικιά του κλίμακα αρκετά μεγάλη μεταβολή και ειδικά με την αύξηση της απόστασης η δόση υποδεκαπλασιάζεται. Ωστόσο, η μεταβολή αυτή δεν φαίνεται ιδιαίτερα στο διάγραμμα συνολικής δόσης, καθώς το συντριπτικά μεγαλύτερο ποσοστό αφορά το ράδιο. Η εικόνα του ραδίου είναι σχεδόν πανομοιότυπη με την εικόνα της συνολικής δόσης. Το ραδιονουκλίδιο αυτό δείχνει να μην επηρεάζεται ιδιαίτερα από την απόσταση του πηγαδιού, οπότε η επιλογή τοποθέτησης της εγκατάστασης σε μεγάλη απόσταση από το πηγάδι δεν μπορεί να αποτελέσει λύση για τη σημαντική μείωση της δόσης και συνεπώς χρειάζεται κάποιον άλλο τρόπο διαχείρισης, ώστε η δόση που προκύπτει από αυτό να μπορεί να κριθεί ασήμαντη, το οποίο θα μελετηθεί παρακάτω.

Τα παραπάνω δίνουν μια εικόνα για την πολυπλοκότητα της μεταφοράς και της τελικής ραδιολογικής επίπτωσης, η οποία ακόμα και για την ίδια παράμετρο δεν είναι εύκολο να προβλεφθεί, χωρίς λεπτομερείς υπολογισμούς με πολύπλοκα μοντέλα, όπως είναι ο κώδικας RESRAD.



Σχήμα 17: Ευαισθησία Ag-108m στην απόσταση του πηγαδιού

DOSE: Ra-226, All Pathways Summed With SA on Distance Parallel to aquifer flow from contamination to Well; m

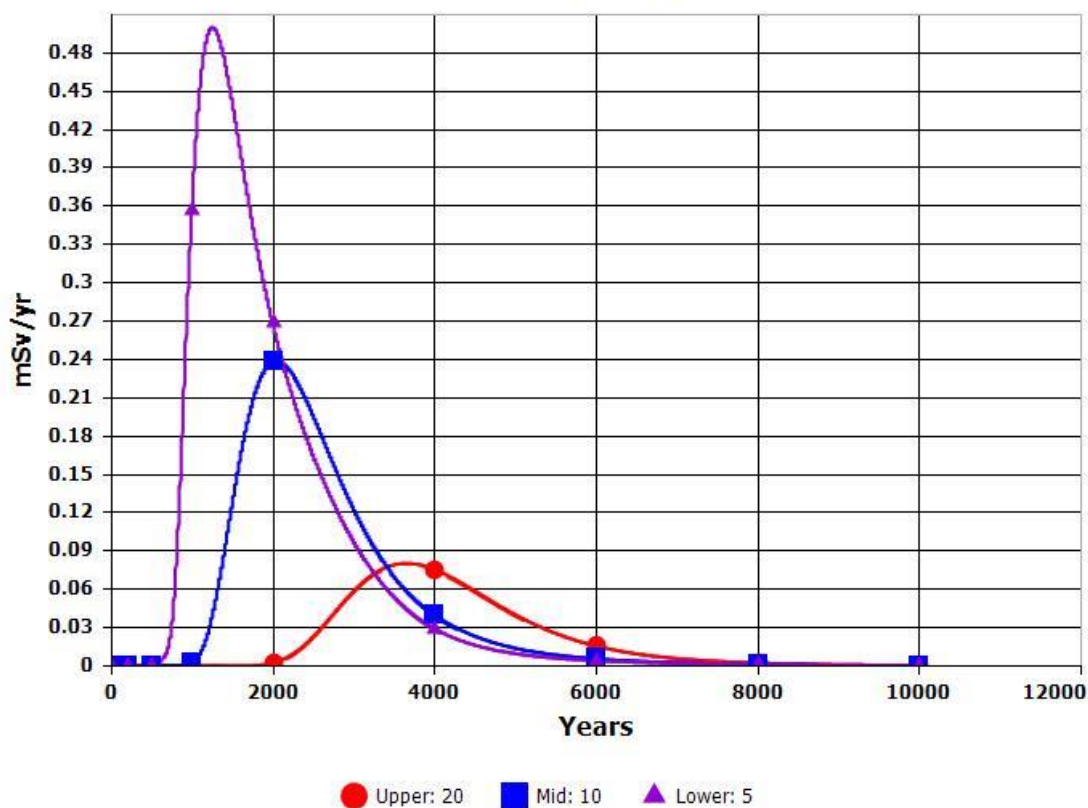


Σχήμα 18: Ευαισθησία Ra-226 στην απόσταση του πηγαδιού

4.2.2 Πάχος ακόρεστης ζώνης

Μεταβάλλοντας το πάχος της ακόρεστης ζώνης, το οποίο είχε θεωρηθεί 10 m, αλλάζει πρακτικά η απόσταση στην οποία βρίσκεται ο υδροφόρος ορίζοντας σε σχέση με τον πάτο της εγκατάστασης. Ο παράγοντας αυτός είναι ιδιαίτερα σημαντικός, καθώς το ρυπασμένο νερό που διαφεύγει από τη θωράκιση της εγκατάστασης, μεταφέρεται μέσα από την ακόρεστη ζώνη και καταλήγει στον υδροφόρο ορίζοντα, απ' όπου διασπείρεται στα υπόγεια νερά, τα οποία μολύνουν οτιδήποτε έρχεται σε επαφή μαζί τους (π.χ. χώμα, φυτά, ανθρώπους). Για να κατανοηθεί η επιδραστικότητα αυτού του παράγοντα, θεωρήθηκαν τρία πάχη της ακόρεστης ζώνης: 5, 10 και 20 μέτρα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται υπό τη μορφή διαγραμμάτων παρακάτω.

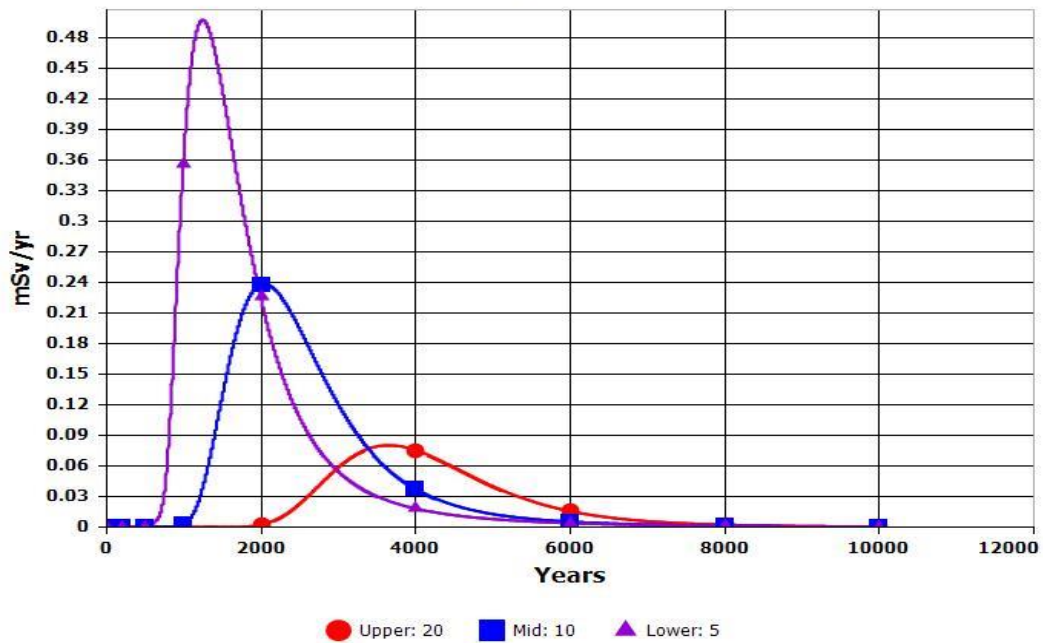
DOSE: All Nuclides Summed, All Pathways Summed With SA on Thickness of Unsaturated Zone 1; m



Σχήμα 19: Ευαισθησία συνολικής δόσης στο πάχος της ακόρεστης ζώνης

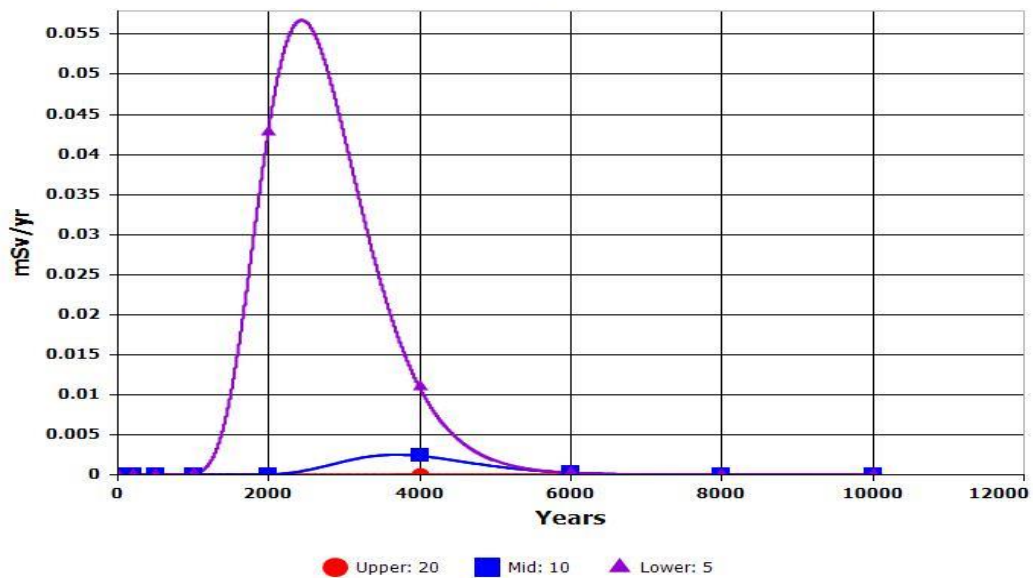
Το πάχος της ακόρεστης ζώνης έχει πολύ σημαντική επίδραση στη συνολική δόση που προκύπτει από τα ραδιενεργά απόβλητα, καθώς βλέπουμε ότι για διπλασιασμό του πάχους προκύπτει αντίστοιχα υποτριπλασιασμός της δόσης, ενώ για υποδιπλασιασμό του πάχους προκύπτει λίγο μεγαλύτερη από τη διπλάσια δόση.

DOSE: Ra-226, All Pathways Summed With SA on Thickness of Unsaturated Zone 1; m



Σχήμα 20: Ευαισθησία της δόσης του Ra-226 στο πάχος της ακόρεστης ζώνης

DOSE: Ag-108m, All Pathways Summed With SA on Thickness of Unsaturated Zone 1; m



Σχήμα 21: Ευαισθησία της δόσης του Ag-108m στο πάχος της ακόρεστης ζώνης

Όπως ήταν αναμενόμενο το διάγραμμα του ραδίου παρουσιάζει σχεδόν πανομοιότυπη εικόνα με το διάγραμμα συνολικής δόσης. Αυτό που παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι η εικόνα του αργύρου, ο οποίος με τον υπερδιπλασιασμό του πάχους εκλύει δεκαπλάσια δόση, ενώ με τον υποδιπλασιασμό σχεδόν εκμηδενίζεται. Αυτό πιθανόν έχει σημαντική συσχέτιση με τη βασική οδό, μέσω της οποίας εκλύεται άργυρος, που όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 5, είναι η άμεση ακτινοβολή από το έδαφος. Αυτό πιθανόν οφείλεται στον μεγαλύτερο συντελεστή κατανομής του αργύρου στο έδαφος, με βάση τον οποίο γίνεται αντιληπτό ότι η κίνηση στη γεώσφαιρα και τον υδροφόρο ορίζοντα είναι πιο αργή. Συνεπώς με την αύξηση/ μείωση του πάχους της ακόρεστης ζώνης, ο άργυρος που ταξιδεύει αργά μέσα από το έδαφος, έχει τώρα να καλύψει τη διπλάσια/ μισή απόσταση μέχρι να φτάσει στον υδροφόρο και από εκεί να αρχίσει να μεταφέρεται οριζόντια προς τον οικισμό. Το χώμα του εδάφους μολύνεται από το νερό του υδροφόρου ορίζοντα, οπότε όπως είναι λογικό, αν η μόλυνση ξεκινάει σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βάθος κάτω από το έδαφος, θα είναι πολύ πιο δύσκολο ή αντίστοιχα αρκετά πιο εύκολο να μεταφερθεί προς τα πάνω.

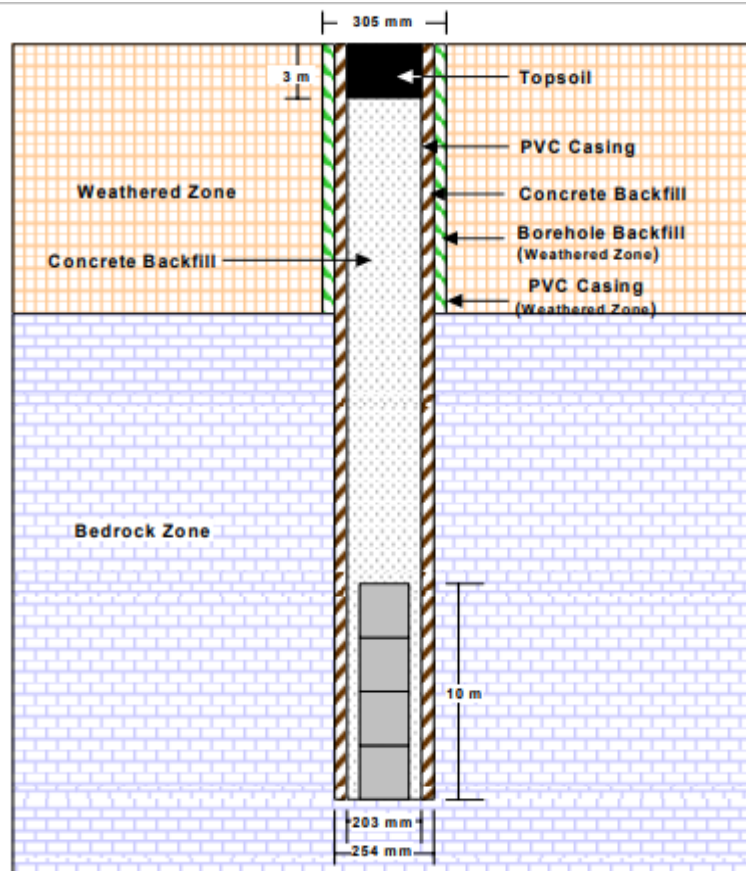
Το πρακτικό συμπέρασμα το οποίο εξάγεται από αυτήν την ανάλυση είναι ότι η τοπολογία και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής στην οποία θα γίνει η εγκατάσταση, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο. Το πάχος της ακόρεστης ζώνης και η σχετική του θέση με τον υδροφόρο θα πρέπει να αποτελέσει έναν βασικό παράγοντα, βάσει του οποίου θα επιλεγθεί η τοποθεσία της εγκατάστασης διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων.

4.3 Διάθεση γεώτρησης για το Ra-226

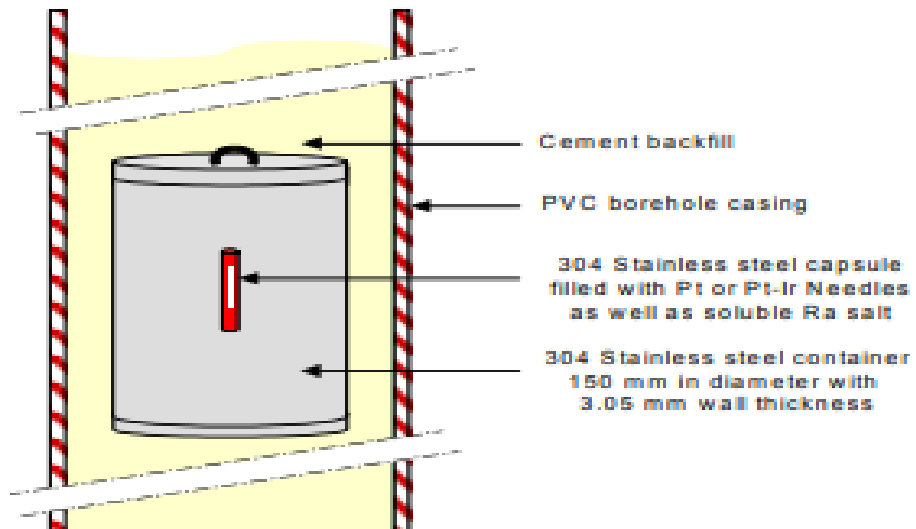
Το ράδιο, όπως έχει φανεί και παραπάνω, αποτελεί το μεγαλύτερο πρόβλημα της εγκατάστασης, αφού είναι υπεύθυνο για το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής δόσης. Συγχρόνως, παράγοντες όπως η απόσταση του πηγαδιού και το πάχος της ακόρεστης ζώνης, δεν το επηρεάζουν τόσο σημαντικά, ώστε να θεωρείται ακίνδυνο. Συνεπώς, κρίνεται σκόπιμο, μόνο για αυτό το ραδιονουκλίδιο, να εξεταστεί ένας εναλλακτικός τρόπος διάθεσης, ο οποίος θα είναι πιο αποτελεσματικός στον περιορισμό του. Για το λόγο αυτό θα εξεταστεί η διάθεση γεώτρησης για ένα δοχείο αποθήκευσης, που θα περιέχει ολόκληρο το ράδιο, μία μέθοδος η οποία συνήθως χρησιμοποιείται υποστηρικτικά σε μία βασική εγκατάσταση.

Στο σενάριο αυτό, η διάχυση μέσω της στάσιμης υγρασίας στα δοχεία είναι ο κύριος μηχανισμός διαρροής, καθώς θεωρείται ότι δεν υπάρχει ροή νερού μέσα από το δοχείο. Η διάχυση επιπλέον μπορεί να ξεκινήσει μόνο αφότου έχει διαβρωθεί σε όλο

το βάθος του τοίχωμα του δοχείου. Αυτό γίνεται η παραδοχή ότι συμβαίνει 100 χρόνια μετά το κλείσιμο της εγκατάστασης. Ο συντελεστής διάχυσης του ραδίου θεωρήθηκε ίσος με $5 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ ή $1.6 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{έτος}$. Η γεώτρηση θα γίνει στα 40 μέτρα κάτω από το έδαφος, σε κυλινδρική γεωμετρία. Μέσα θα τοποθετηθεί ένα δοχείο αποθήκευσης κλασικού τύπου 304, ύψους 25 εκατοστά, διαμέτρου 15 εκατοστά και πάχος τοιχώματος 3.05 χιλιοστά και κατασκευασμένο από ανοξείδωτο ατσάλι, ώστε να είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό στη διάβρωση. Μέσα στο δοχείο, σε κάψουλα, θα τοποθετηθεί το ραδιενεργό υλικό και το υπόλοιπο δοχείο θα πληρωθεί με τσιμέντο. Ο υπόλοιπος κενός χώρος θα πληρωθεί επίσης με τσιμέντο για επιπλέον θωράκιση, ενώ στην επιφάνεια θα τοποθετηθεί ένα στρώμα χώματος πάχους 3 μέτρων, για να εναρμονίζεται με το γύρω περιβάλλον. Τέλος, θα δημιουργηθούν τεχνητά τοιχώματα της εγκατάστασης από τσιμέντο και πολυβινυλοχλωρίδιο. Ενδεικτικός σχεδιασμός σύμφωνα με τον ΔΟΑΕ, αποτυπώνεται ξεκάθαρα στις δύο εικόνες που ακολουθούν:

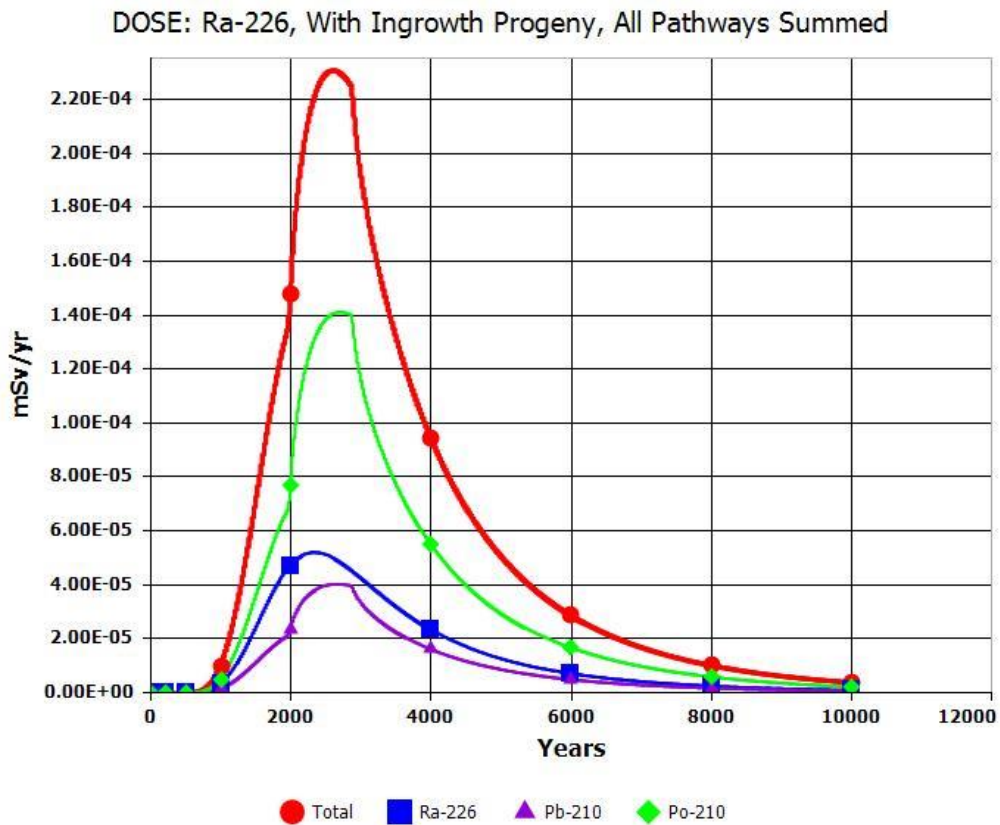


Εικόνα 14: Σχεδιάγραμμα διάθεσης γεώτρησης (ΙΑΕΑ, 2004)



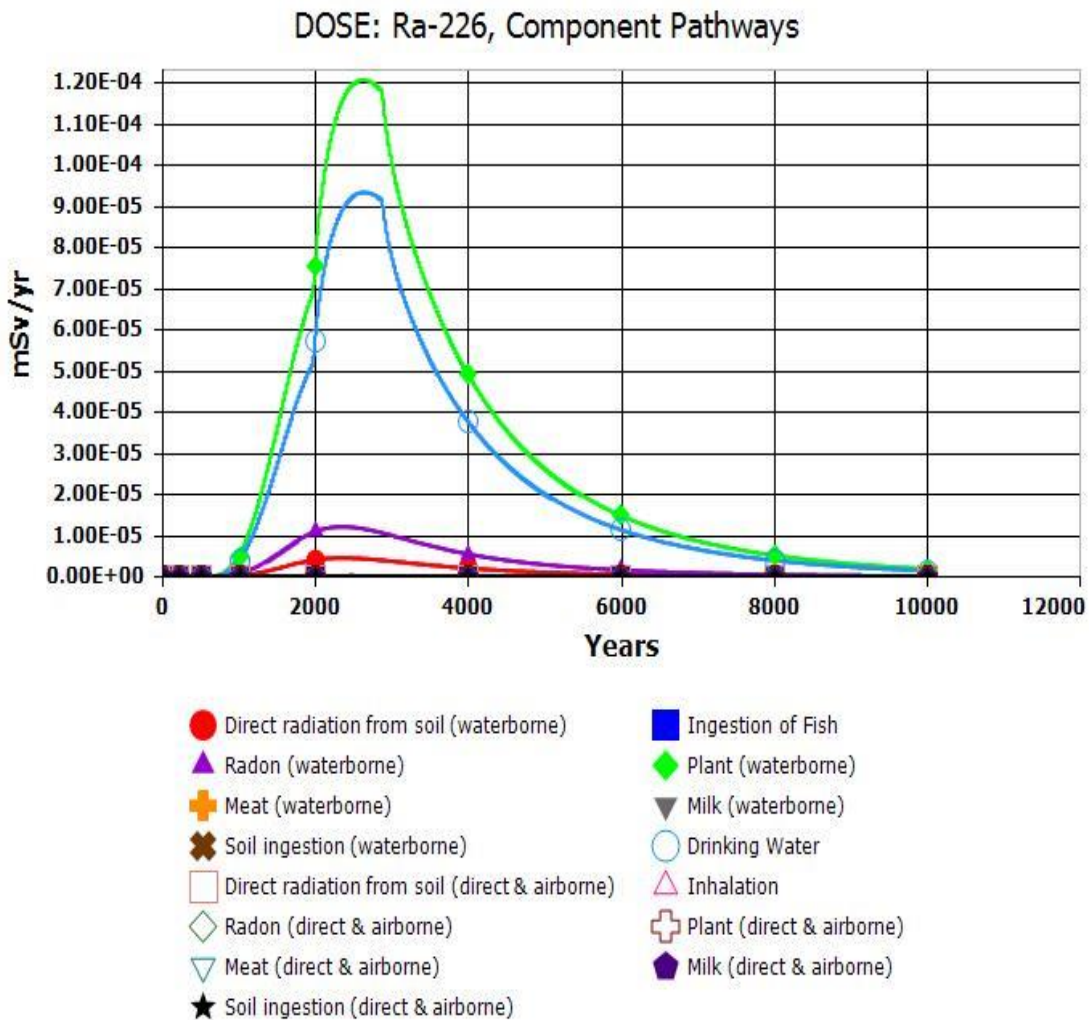
Εικόνα 15: Δοχείο αποθήκευσης Ραδίου στη διάθεσης γεώτρησης (IAEA, 2004)

Στο Σχήμα 22, παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της ετήσιας δόσης, από τη διάθεση του ραδίου στη γεώτρηση:



Σχήμα 22: Δόση από το Ra-226 λόγω διάθεσης σε γεώτρηση

Η μέγιστη δόση λόγω του ραδίου για τη διάθεση σε γεώτρηση είναι μειωμένη κατά δέκα χιλιάδες φορές σε σχέση με την τοποθέτησή του μαζί με τα υπόλοιπα ραδιονουκλίδια στην εγκατάσταση κοντά στην επιφάνεια. Πλέον, η δόση των 2.2×10^{-4} μπορεί να κριθεί αμελητέα και, αφού το ράδιο αποτελούσε το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής δόσης, αντίστοιχη μείωση παρουσιάζει και αυτή. Αν τώρα εξεταστούν οι δίοδοι μέσα από τις οποίες γίνεται η έκλυση προκύπτει το εξής διάγραμμα:



Σχήμα 23: Οδοί έκλυσης Ra-226 σε διάθεση γεώτρησης

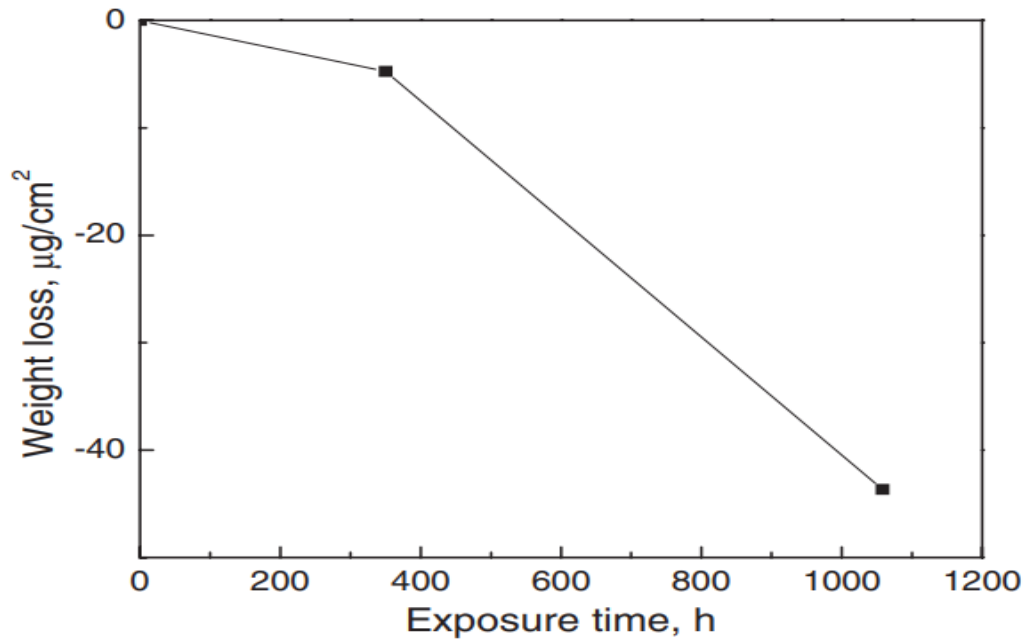
Οι οδοί έκθεσης δεν έχουν διαφορά σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο, καθώς πάλι τα φυτά και το πόσιμο νερό αποτελούν τις βασικές οδούς και φαίνεται να έχουν μειωθεί ομοιόμορφα σε σχέση με τη συνολική δόση. Δεν αποκόπηκε δηλαδή κάποια

συγκεκριμένη οδός με τον τρόπο αυτό, αλλά μειώθηκε η εξαγωγή του ραδιενεργού υλικού από την εγκατάσταση, λόγω του πολύ μεγαλύτερου χρόνου λειτουργίας της θωράκισης και του μηχανισμού διαρροής, ο οποίος λαμβάνει χώρα μέσω της πολύ πιο αργής διάχυσης.

4.4 Διάβρωση Ag-108m

Ο άργυρος αποτελεί το δεύτερο σημαντικότερο ραδιονουκλίδιο της εγκατάστασης, καθώς από αυτό το υλικό είναι κατασκευασμένοι οι ράβδοι ελέγχου. Η ανάλυση του μοντέλου που έγινε στην παράγραφο 4.1 υπερεκτιμά σε πολύ μεγάλο βαθμό τη διαρροή των ραδιονουκλιδίων από τα ενεργοποιημένα μέταλλα όπως ο άργυρος. Παρακάτω, εξετάζεται η διάθεση του αργύρου στην εγκατάσταση κοντά στην επιφάνεια, αλλά θεωρώντας διαφορετικό μηχανισμό διαρροής, που συνάδει περισσότερο με τα χαρακτηριστικά των ενεργοποιημένων υλικών, όπως είναι ο ράβδοι ελέγχου.

Η έκλυση οφείλεται στη διάβρωση του μετάλλου και τον ρυθμό διείσδυσης αυτής ανά τα έτη. Άρα η ποσότητα που είναι κάθε στιγμή διαθέσιμη για διαρροή στο νερό, είναι μόνο ένα πολύ μικρό μέρος της συνολικής ενεργότητας (όπως θεωρείται στην περίπτωση της υπόθεσης ισορροπίας προσρόφησης παραπάνω), το οποίο προκύπτει από τον ρυθμό με τον οποίο εξελλίσεται η διάβρωση του μετάλλου. Ο άργυρος, ειδικά, θεωρείται ότι θα έχει πολύ αργή διάβρωση. Ωστόσο, δεν υπάρχουν στη βιβλιογραφία πολλά στοιχεία για τον προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης του αργύρου, οπότε θα προσεγγιστεί. Με βάση το παρακάτω διάγραμμα, το οποίο βασίζεται σε πείραμα έκθεσης του αργύρου σε διάλυμα άλατος NaCl. Θεωρώντας ότι αυτό θα μπορούσε να είναι μια καλή προσέγγιση, αφού το νερό που εισχωρεί και διαβρώνει την εγκατάσταση εμφανίζει έντονη αλατότητα ύστερα από την ανάμειξή του με το έδαφος, θεωρούμε ότι η επιφανειακή απώλεια μάζας ύστερα από 1000 ώρες έκθεσης **είναι ίση με $w/A= 0.04 \text{ mg/cm}^2$.**



Σχήμα 24: Απώλεια μάζας Ag-108m στη μονάδα του χρόνου
(Lin, 2013)

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο ρυθμός διαβρωτικής διείδυσης σύμφωνα με τον τύπο (William D. Callister, 2015)

$$P\Delta\Delta = \frac{\kappa \cdot w}{A \cdot \rho \cdot t}$$

- κ: Σταθερά μετατροπής μονάδων ίση με 87.6 για να προκύψει ο ΡΔΔ σε μm/έτος
- w/A: Απώλεια βάρους ανά μονάδα επιφάνειας ίση με 0.04 mg/cm²
- ρ: Πυκνότητα Ag ίση με 10.49 g/cm³
- t: χρόνος ίσος με 1000 ώρες

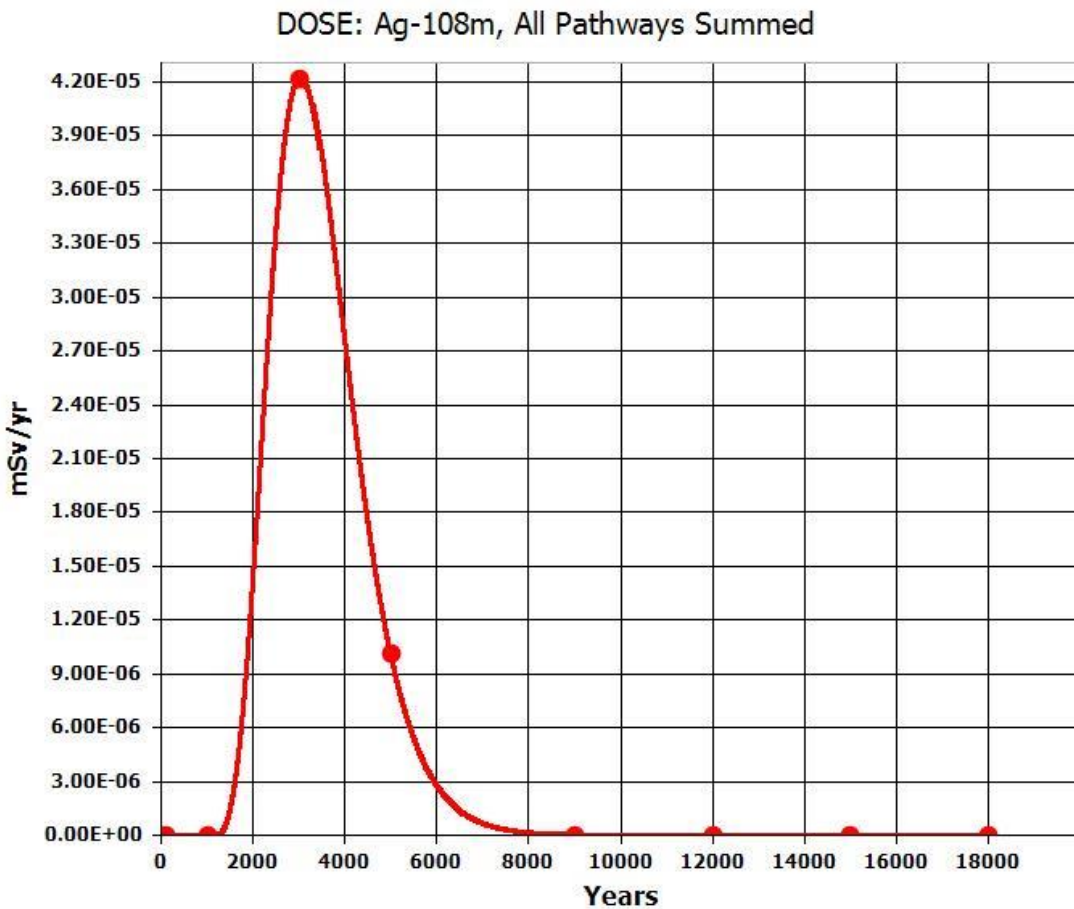
Υπολογίζεται, λοιπόν, ότι $P\Delta\Delta_{Ag} = 0.334 \mu\text{m/year}$

Το νούμερο που προσδιορίστηκε κρίνεται λογικό, καθώς ο άργυρος είναι ένα μέταλλο που δεν διαβρώνεται γρήγορα. Η τιμή βρίσκεται ανάμεσα στα όρια που

προτείνονται στη βιβλιογραφία για τον ανοξειδωτο χάλυβα, ο οποίος έχει ένα εύρος 0.3-10 $\mu\text{m}/\text{year}$ (U.S.N.R.C, 2000) και είναι επίσης ανθεκτικός στη διάβρωση.

Η διάβρωση θεωρείται ότι εξελίσσεται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια. Συνεπώς, η πλήρης διάβρωση θα επιτυγχάνεται, όταν θα έχει διεισδύσει σε απόσταση όση η επιφάνεια του τοιχώματος του δοχείου, δηλαδή 0.5 cm. Με τον ρυθμό που υπολογίστηκε προηγουμένως για τον άργυρο, η πλήρης διάβρωση επιτυγχάνεται ύστερα από 14.970 χρόνια.

Οπότε, με τη θεώρηση ότι στη διάρκεια των περίπου δεκαπέντε χιλιάδων ετών η διάβρωση εξελίσσεται γραμμικά, και την είσοδο των στοιχείων στο RESRAD-OFFSITE, προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα:

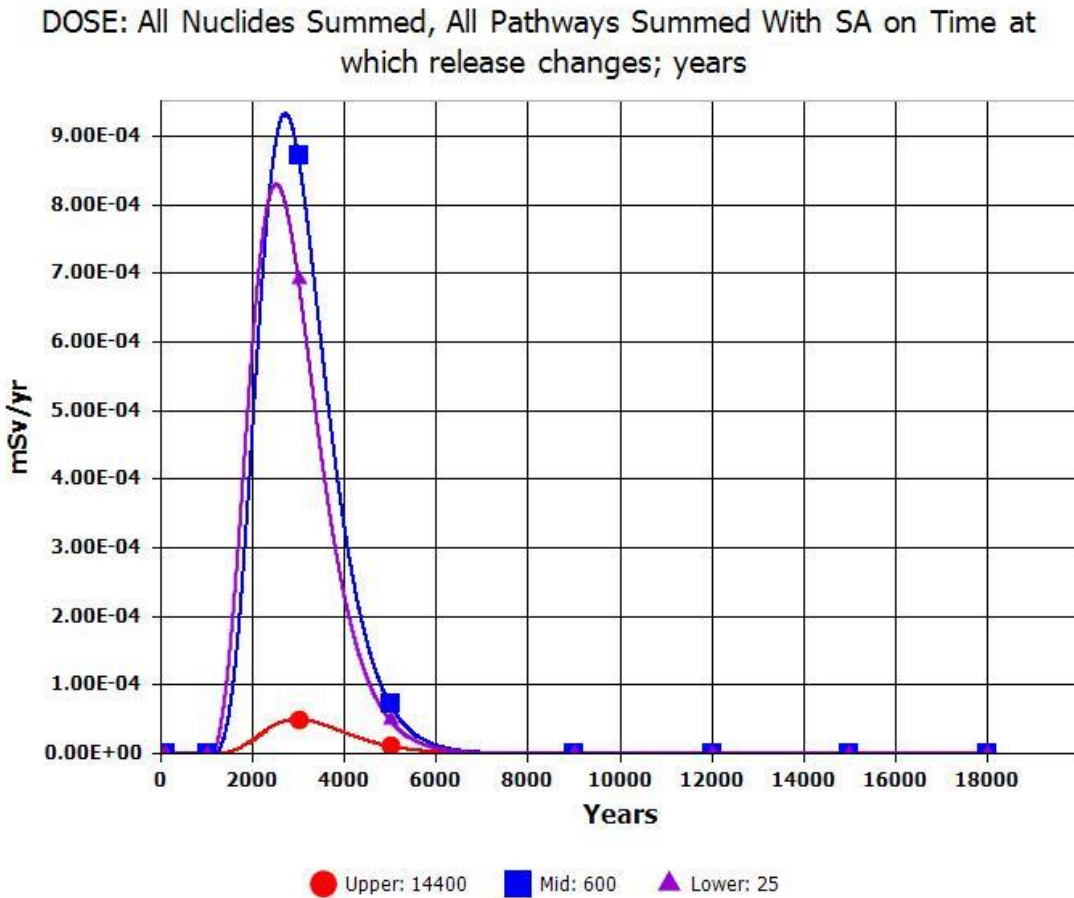


Σχήμα 25: Δόση Ag-108m λόγω διάβρωσης

Παρατηρείται ότι υπάρχει μία σημαντική απόκλιση της μέγιστης δόσης λόγω του αργύρου, ανάμεσα στις δύο διαφορετικές θεωρήσεις, για τον τρόπο με τον οποίο εκλύεται. Στην περίπτωση αυτή, η μέγιστη δόση είναι εκατό φορές μικρότερη από πριν και πλέον ο άργυρος δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα για την εγκατάσταση. Ένα τέτοιο αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο, καθώς η αρχική συνθήκη δημιουργήθηκε με τη λογική να εμπίπτει στην περιοχή ασφάλειας, αφού βγάζοντας αποτελέσματα από ένα σενάριο το οποίο πιθανώς να είναι χειρότερο από την πραγματικότητα, μπορεί να γίνει ο σχεδιασμός και υλοποίηση ενός έργου το οποίο θα είναι ικανό να αντεπεξεχθεί ικανοποιητικά μέχρι και στη χειρότερη δυνατή περίπτωση. Κάτι τέτοιο, κρίνεται συνήθως αναγκαίο σε μηχανικές εγκαταστάσεις, όπου μία αστοχία μπορεί να προκαλέσει πολλά και σοβαρά προβλήματα.

Όπως εύκολα γίνεται αντιληπτό, ο παράγοντας της διάβρωσης περιέχει μια αβεβαιότητα στον υπολογισμό του. Για τον λόγο αυτό, θα πραγματοποιηθεί μία ανάλυση ευαισθησίας σε σχέση με τα χρόνια που απαιτούνται για πλήρη διάβρωση. Το κατώτατο όριο λαμβάνεται μέσω του ανθρακούχου χάλυβα, ο οποίος είναι ένα μέταλλο που δεν είναι ανθεκτικό απέναντι στη διάβρωση και προσδιορίζεται ότι ο ρυθμός διαβρωτικής διείδυσης έχει ένα εύρος 8-200 $\mu\text{m}/\text{year}$ με μέση τιμή τα 57 $\mu\text{m}/\text{year}$ (Sullivan, 1993). Συνεπώς, για την ανώτερη τιμή και θεωρώντας ομοιόμορφη επιφανειακή διάβρωση, θα έπαιρνε περίπου 25 χρόνια για την πλήρη διάβρωση τοιχώματος πάχους 0.5 cm. Ως ανώτατο όριο, θα ληφθεί ο ανοξειδωτος χάλυβας 304, του οποίου το εύρος, όπως έχει παρουσιαστεί παραπάνω, είναι 0.3-10 $\mu\text{m}/\text{year}$ (U.S.N.R.C, 2000). Για την κατώτερη τιμή και με τη θεώρηση της ομοιόμορφης επιφανειακής διάβρωσης, θα έπαιρνε περίπου 15.000 χρόνια για την πλήρη διάβρωση.

Για την ανάλυση ευαισθησίας μέσω του προγράμματος, θεωρήθηκε μία μέση τιμή στα 600 χρόνια και η ανώτερη και η κατώτερη τιμή, που αποτελούν τα όρια που εξηγήθηκαν προηγουμένως, προκύπτουν, πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας τη μέση τιμή με το 24. Συνεπώς, προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 26: Ευαισθησία δόσης από τον Ag-108m σε σχέση με τον χρόνο για πλήρη διάβρωση

Το ανώτατο όριο, αποτελεί πρακτικά την καμπύλη του διαγράμματος 23 και όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, η τιμή του είναι δέκα φορές μικρότερη από τις άλλες δύο περιπτώσεις. Η μέση τιμή με το κατώτατο όριο των 25 ετών, δεν απέχουν πολύ μεταξύ τους, ενώ και οι δύο διαφοροποιούνται σημαντικά από τα 14.400 έτη. Αυτό δημιουργεί το συμπέρασμα ότι ένα υλικό ελάχιστα ανθεκτικό στη διάβρωση κι ένα υλικό σχετικά ανθεκτικό (600 χρόνια για πλήρη διάβρωση) δεν κάνουν μεγάλη διαφορά για την προστασία από τη δόση ενός ενεργοποιημένου μετάλλου. Θα πρέπει, λοιπόν, για τη δημιουργία μια αποτελεσματικής μεθόδου περιορισμού, να χρησιμοποιηθεί ένα υλικό πολύ ανθεκτικό στη διάβρωση, όπως είναι ο ανοξειδωτος χάλυβας.

5. Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας την παρούσα μελέτη, μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα.

Αρχικά, το ήδη υπάρχον απόθεμα ραδιενεργών αποβλήτων στην Ελλάδα κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό και απαιτείται άμεση διαχείριση, καθώς εγκυμονεί πολλούς κινδύνους αν δεν αποθεθεί άμεσα, οπότε η κατασκευή της εγκατάστασης διάθεσης είναι επιτακτική ανάγκη, αφού τα ραδιενεργά υλικά λόγω των μεγάλων χρόνων ημιζωής δεν έχουν διασπαστεί σε μεγάλο βαθμό ακόμα και συνεπώς δεν εκλύουν μεγάλες ποσότητες ραδιενέργειας. Ωστόσο, με το πέρασμα του χρόνου τα δεδομένα αλλάζουν και όσο τα απόβλητα αφήνονται στην ήδη υπάρχουσα εγκατάσταση προσωρινής αποθήκευσης, μπορούν να δημιουργήσουν αρκετούς κινδύνους.

Συγχρόνως, η κατασκευή μιας τέτοιας εγκατάστασης απαιτεί πλήρη μελέτη των παραγόντων που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοσή της. Κάτι τέτοιο θα ήταν εφικτό, μόνο με την οριστικοποίηση της τοποθεσίας κατασκευής, ώστε να συμπεριληφθούν με απόλυτη βεβαιότητα τα υδρολογικά και γεωλογικά στοιχεία της. Στην παρούσα μελέτη έγινε μία θεώρηση κάποιων μεταβλητών, με βάση τα ήδη γνωστά στοιχεία της περιοχής όπου γίνεται η προσωρινή αποθήκευση (ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος), το οποίο αποτελεί και το πιο πιθανό μέρος για την τοποθέτηση της εγκατάστασης, όπως συμπεραίνεται από το δημοσιευμένο εθνικό πρόγραμμα διαχείρισης. Συνέπεια της θεώρησης των χαρακτηριστικών αυτών, είναι η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων, η οποία δεν μπορεί να αποτελέσει ακριβή μελέτη της εγκατάστασης, αλλά έναν οδηγό, ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί στο άμεσο μέλλον.

Σημαντικά συμπεράσματα εξάγονται για την επίδραση των μεταβλητών της απόστασης του πηγαδιού και του βάθους της ακόρεστης ζώνης, όπου η απόσταση από το πηγάδι δεν έχει τόσο σημαντική επίδραση, ώστε να είναι καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή της τοποθεσίας, ενώ το βάθος της ακόρεστης ζώνης κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας. Άρα, ο χώρος στον οποίο θα γίνει η διάθεση, πρέπει να έχει ικανοποιητικό πάχος ακόρεστης ζώνης, ώστε ο πάτος της εγκατάστασης να βρίσκεται σε μία ασφαλή απόσταση από τον υδροφόρο ορίζοντα και έτσι το νερό που θα διαφεύγει από την εγκατάσταση να μην έρχεται εύκολα σε επαφή με αυτόν, απ' όπου μπορεί να ξεκινήσει μία αθέμιτα μεγάλη διασπορά.

Επιπρόσθετα, τα μεγάλα προβλήματα που δημιουργεί το Ράδιο-226 μπορούν να επιλυθούν με τη συμπληρωματική λύση της διάθεσης γεώτρησης, η οποία μπορεί να

λειτουργεί υποστηρικτικά στην υπόλοιπη εγκατάσταση. Το φαινόμενο παρατηρείται αρκετά συχνά σε παρόμοιες μονάδες απόθεσης, για την ευκολότερη διαχείριση των πιο επικίνδυνων αποβλήτων, απ' όπου προέκυψε και η ιδέα, ώστε να συμπεριληφθεί στην παρούσα μελέτη.

6. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Απόθεμα Ραδιενεργών Αποβλήτων	7
Πίνακας 2: Ραδιενεργές πηγές εκτός χρήσης	18
Πίνακας 3: Διαστάσεις κιβωτίων - δοχείων	9
Πίνακας 4: Διαστάσεις εγκατάστασης.....	20
Πίνακας 5: Υδρογεωλογικοί παράμετροι – Κορεσμένη / Ακόρεστη Ζώνη	25
Πίνακας 6: Συγκεντρώσεις- Χρόνοι Ημιζωής – Kd Ραδιονουκλιδίων.....	31

7. Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Συνολική ετήσια δόση, ως συνάρτηση του χρόνου	37
Σχήμα 2: Συνολική δόση Ra-226 και παραγώγων	38
Σχήμα 3: Οδοί έκθεσης Ra-226	39
Σχήμα 4: Συνολική δόση Ag-108m.....	40
Σχήμα 5: Οδοί έκθεσης Ag-108m	41
Σχήμα 6: Δόση C-14.....	42
Σχήμα 7: Δόση Cl-36.....	43
Σχήμα 8: Δόση Ca-41.....	43
Σχήμα 9: Δόση Cs-137	44
Σχήμα 10: Δόση H-3	44
Σχήμα 11: Δόση Am-241 και παραγώγων.....	45
Σχήμα 12: Δόση Mo-93 και παραγώγων.....	45
Σχήμα 13: Δόση Pb-205.....	46
Σχήμα 14: Οδοί έκθεσης C-14	47
Σχήμα 15: Οδοί έκθεσης Cl-36	48
Σχήμα 16: Ευαισθησία συνολικής δόσης σε σχέση με την απόσταση του πηγαδιού από το σημείο διάθεσης.....	49
Σχήμα 17: Ευαισθησία Ag-108m στην απόσταση του πηγαδιού.....	51
Σχήμα 18: Ευαισθησία Ra-226 στην απόσταση του πηγαδιού.....	52
Σχήμα 19: Ευαισθησία συνολικής δόσης στο πάχος της ακόρεστης ζώνης.....	53
Σχήμα 20: Ευαισθησία της δόσης του Ra-226 στο πάχος της ακόρεστης ζώνης.....	54
Σχήμα 21: Ευαισθησία της δόσης του Ag-108m στο πάχος της ακόρεστης ζώνης	54
Σχήμα 22: Δόση από το Ra-226 λόγω διάθεσης σε γεώτρηση	57
Σχήμα 23: Οδοί έκθεσης Ra-226 σε διάθεση γεώτρησης.....	58
Σχήμα: Απώλεια μάζας Ag-108m στη μονάδα του χρόνου	60
Σχήμα 25: Δόση Ag-108m λόγω διάβρωσης	61
Σχήμα 26: Ευαισθησία δόσης από τον Ag-108m σε σχέση με τον χρόνο για πλήρη διάβρωση.....	63

8. Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Τρόποι Διάθεσης με βάση την κατηγορία Ραδιενεργών Αποβλήτων	10
Εικόνα 2: Εγκατάσταση Διάθεσης Ραδιενεργών Αποβλήτων El-Cabril	14
Εικόνα 3: Σχέδιο Κιβωτίων	19
Εικόνα 4: Γεωμετρία Θωράκισης.....	22
Εικόνα 5: Σχεδιασμός Εγκατάστασης Διάθεσης Κοντά στην Επιφάνεια	22
Εικόνα 6: Σχεδιάγραμμα τοποθεσίας της εγκατάστασης διάθεσης PA	25
Εικόνα 7: Περιβαλλοντικοί οδοί και τοποθεσίες έκθεσης	27
Εικόνα 8: Μοντέλο μεταφοράς ραδιονουκλιδίων και οδών έκθεσης για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια.....	28
Εικόνα 9: Σχηματική παρουσίαση της Ισορροπίας Εκρόφησης.....	31
Εικόνα 10: Σχηματική παρουσίαση της Ισορροπίας Διάλυσης.....	32
Εικόνα 11: Σχηματική παρουσίας Ελεγχόμενου Ρυθμού Έκλυσης	32
Εικόνα 12: Κατανομή μόλυνσης στην περιοχή πρωτογενούς ρύπανσης.....	34
Εικόνα 13: Ροή νερού μέσα από την περιοχή πρωτογενούς ρύπανσης	35
Εικόνα 14: Σχεδιάγραμμα διάθεσης γεώτρησης	56
Εικόνα 15: Δοχείο αποθήκευσης Ραδίου στη διάθεση γεώτρησης.....	57

9. Κατάλογος Αναφορών

- E. Gnanapragasam, J.-J. C. (2020). *User's Manual for RESRAD-OFFSITE Code Version 4*. U.S NRC.
- enresa. (2022). *enres.es*. Ανάκτηση από enresa: <https://www.enresa.es/eng/index/activities-and-projects/el-cabril>
- Garrison, C. Z. (2007). *University of Alabama at Birmingham Radiation Safety Procedures Manual Ninth Edition*. Alabama: UAB.
- IAEA. (2001). *Performance of engineered barrier materials in near surface disposal facilities for radioactive waste*. Vienna: IAEA.
- IAEA. (2005). *Upgrading of Near Surface Repositories for Radioactive Waste*. IAEA.
- IAEA. (2009). *Classification of Radioactive waste*. Vienna: IAEA.
- IAEA. (2009). *POLICIES AND STRATEGIES FOR RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT*. Vienna: IAEA.
- Institute of Risk Management. (2016). *About Risk Management, Institute of Risk Management*. (Institute of Risk Management - IRM) Ανάκτηση 26, 2017, από <https://www.theirm.org/about/risk-management>
- John R. Lamarsh, A. J. (2019). *Introduction to Nuclear Engineering*. Pearson Education, Inc.
- Lin, H. (2013). Analysis of Ag Corrosion Products. *Journal of The Electrochemical Society*, 22.
- P. Poškas, R. K. (2019). Disposal of very low-level radioactive waste: Lithuanian case on the approach and long-term safety aspects. *ELSEVIER*, 10.
- Sullivan, T. M. (1993). *Disposal Unit Source Term (DUST) Data Input Guide*. New York: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- U.S.N.R.C, U. S. (2000). *A Performance Assessment Methodology for Low-Level Radioactive Waste Disposal Facilities*. Washington,DC: U.S.N.R.C.
- Ulla Bergström, K. P. (2011). *International perspective on repositories for low level waste*. SKB International AB.
- William D. Callister, J. D. (2015). *Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons.
- WNA. (2021, May). *world-nuclear.org*. Ανάκτηση April 23, 2022, από World Nuclear Association: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-waste/storage-and-disposal-of-radioactive->

waste.aspx#:~:text=Disposal%20of%20low-level%20waste,the%20most%20radioactive%20waste%20produced.

- ΕΕΑΕ. (2020). *“Εθνικό Πρόγραμμα” για τη διαχείριση αναλωθέντων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων- Σχέδιο δεύτερο*. Αθήνα: ΕΕΑΕ.
- ΕΕΑΕ. (2021). *eeae.gr*. Ανάκτηση 4 23, 2022, από ΕΕΑΕ: <https://eeae.gr/ασφάλεια-ακτινοβολιών/διαχείριση-ραδιενεργών-αποβλήτων/διαχείριση-ραδιενεργών-αποβλήτων>
- ΕΕΑΕ. (2021, Νοέμβριος). https://eeae.gr/files/Current_INVENTORY.pdf. Ανάκτηση από <https://eeae.gr/ασφάλεια-ακτινοβολιών/διαχείριση-ραδιενεργών-αποβλήτων>: https://eeae.gr/files/Current_INVENTORY.pdf
- ΙΑΕΑ. (2004). *SAFETY ASSESSMENT METHODOLOGIES FOR NEAR SURFACE DISPOSAL FACILITIES VOLUME 2*. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA).
- (2011). *ΟΔΗΓΙΑ 2011/70/ΕΥΡΑΤΟΜ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ*. Βρυξέλλες: Ευρωπαϊκή Ένωση.