



Υπολογιστική εκτίμηση της  
διακύμανσης των ραδιολογικών  
επιπτώσεων από τη διάθεση  
ραδιενεργών αποβλήτων κοντά  
στην επιφάνεια

Τομέας: Πυρηνικής Τεχνολογίας

Επιβλέπων: Δημήτριος Μητράκος, 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.**

**Κωνσταντίνος Θεοτόκης Φλούδας**

Πολλές ευχαριστίες στον καθηγητή μου, κύριο Δημήτρη Μητράκο για τη συνεχή υποστήριξη, την υπομονή και την ευχάριστη συνεργασία μας, στην οικογένειά μου που με στηρίζει σε κάθε μου βήμα και στους φίλους μου που κάνουν τον αγώνα τους μαζί μου

## Περιεχόμενα

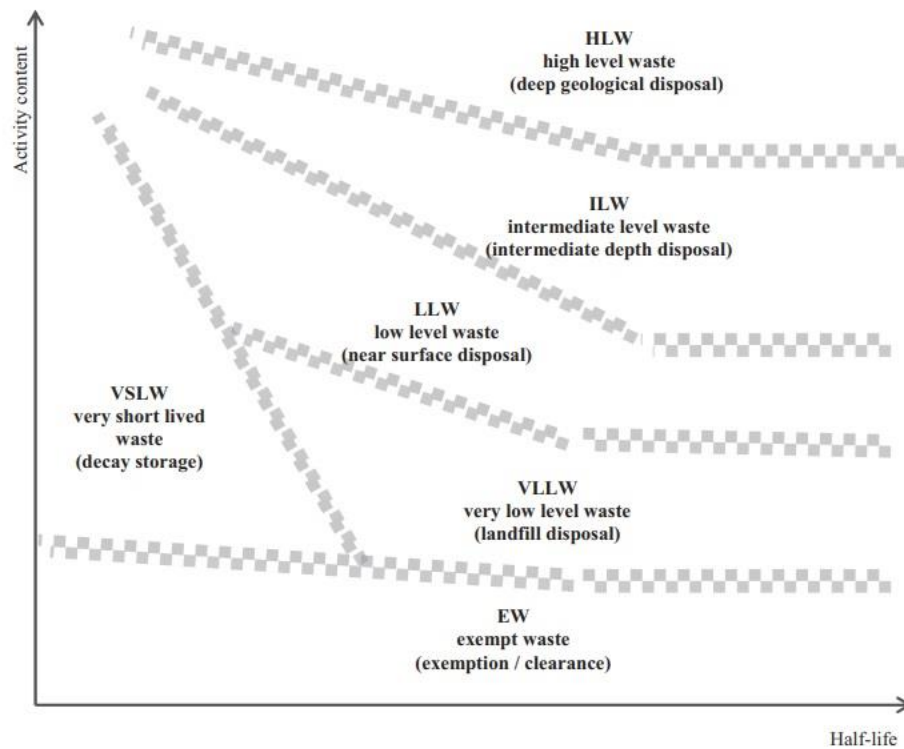
1. Εισαγωγή-Οργάνωση Εργασίας .....	4
2. Παρουσίαση Προβλήματος .....	14
3. Αναλύσεις .....	24
3.1 Ντετερμινιστική Ανάλυση(Deterministic Analysis) .....	24
3.2 Ανάλυση Αβεβαιότητας(Uncertainty/Probabilistic Analysis).....	38
4. Αποτελέσματα .....	42
4.1 Ντετερμινιστική Ανάλυση .....	42
4.2 Αποτελέσματα της Ανάλυσης Αβεβαιότητας(Uncertainty/Probabilistic Analysis Results) .....	53
5. Συμπεράσματα .....	69
5.1 Συμπεράσματα Ντετερμινιστικής Ανάλυσης(Deterministic Analysis Conclusions) 69	
5.2 Συμπεράσματα Ανάλυσης Αβεβαιότητας(Conclusions of Uncertainty Analysis) 70	
5.3 Συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας .....	71
6. Κατάλογος Πινάκων.....	72
7. Κατάλογος Εικόνων .....	73
8. Κατάλογος Γραφημάτων .....	74
9.Βιβλιογραφία – Κατάλογος Αναφορών .....	80
10.Παράρτημα .....	83

## 1. Εισαγωγή-Οργάνωση Εργασίας

Η ραδιενέργεια είναι συνήθως συνυφασμένη με τη παραγωγή πυρηνικής ενέργειας. Η χρήση της ραδιενέργειας, ωστόσο, βρίσκει εφαρμογές σε πολλές σύγχρονες δραστηριότητες ακόμα και σε μη πυρηνικές χώρες. Τομείς της πυρηνικής ιατρικής αξιοποιούν είδη ακτινοβολιών είτε για διαγνωστικές εξετάσεις, είτε για λόγους θεραπείας(π.χ. χρήση ραδιοφαρμάκων, ακτινοθεραπεία). Η πυρηνική έρευνα που λαμβάνει χώρα καθημερινά σε ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια συμβάλλει όλο και περισσότερο στην εξοικείωση της κοινής γνώμης με τον όρο “ραδιενέργεια”, προσθέτοντας παράλληλα μικρά χαλίκια στον λόφο της γνώσης της ανθρωπότητας πάνω στο αντικείμενο αυτό που μόλις πριν 100 περίπου χρόνια ξεκίνησε να ανθίζει. Ακόμα και κατά την εξόρυξη σπάνιων γαιών, παράγονται ποσότητες ουρανίου (U) και θορίου (Th). Στην Ελλάδα, η μόνη πυρηνική εγκατάσταση είναι ο ερευνητικός πυρηνικός αντιδραστήρας του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», ο οποίος βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Από τις παραπάνω δραστηριότητες συνήθως προκύπτει και κάποια παραγωγή Ραδιενεργών Αποβλήτων (ΡΑ).

Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα (ΙΑΕΑ-ημερομηνία του προτύπου) τα ΡΑ ταξινομούνται σε κλάσεις με βάση την ενεργότητα και τον χρόνο ημιζωής τους (Εικόνα 1) :

- **Απόβλητα Χαμηλού Επιπέδου (Low-Level Waste/LLW)**  
Εδώ ανήκουν απόβλητα που περιέχουν μικρές ποσότητες κυρίως βραχύβιων ραδιονουκλιδίων
- **Απόβλητα Ενδιάμεσου Επιπέδου(Intermediate-Level Waste/ILW)**  
Περιέχουν υψηλότερες ποσότητες ραδιενέργειας και απαιτείται η θωράκιση και η διάθεσή τους σε μεγαλύτερα βάθη (της τάξης των δεκάδων μέτρων).
- **Απόβλητα Υψηλού Επιπέδου(High-Level Waste/HLW)**  
Προκύπτουν από τη σχάση σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα. Περιέχουν τα λεγόμενα προϊόντα σχάσης και τα υπερουρανικά στοιχεία που παράγονται στον πυρήνα του αντιδραστήρα, είναι εξαιρετικά ραδιενεργά και θερμά λόγω της θερμότητας αποξήλωσης και χρίζουν προσεκτικής ψύξης και διαχείρισης. Προορίζονται τυπικά για γεωλογική διάθεση σε πολύ μεγάλα βάθη (εκατοντάδες μέτρα)



Εικόνα 1: Ταξινόμηση ραδιενεργών αποβλήτων σε σχέση με τον χρόνο ημιζωής τους

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

- με **αποδέσμευση** στο περιβάλλον, εφόσον πληρούνται τα θεσμοθετημένα όρια. Στη χώρα μας, τα όρια αυτά καθορίζονται στους Κανονισμούς Ακτινοπροστασίας(π.δ. 101/2018). Τα όρια αυτά έχουν τεθεί με γνώμονα την ετήσια δόση ακτινοβολίας που δέχεται οποιοδήποτε άτομο λόγω της εγκατάστασης αποδέσμευσης, η οποία ετήσια δόση δεν μπορεί να ξεπερνά τα 10μSv. Για λόγους πληρότητας, αναφέρεται πως η δόση που δέχεται ένα άτομο από το σύνολο των πρακτικών ιοντιζουσών ακτινοβολιών ανά έτος δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1mSv.
- με **διάθεση**(οριστική εναπόθεση) σε εγκεκριμένη εγκατάσταση. Υπάρχουν διάφορα είδη εγκαταστάσεων διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων, όπως π.χ. εναπόθεση σε έκταση(land field disposal), εναπόθεση σε επιφανειακή εγκατάσταση μικρού βάθους(near surface disposal), βαθιά γεωλογική διάθεση(deep geological disposal) κ.α.. Η επιλογή της εγκατάστασης είναι εξαρτώμενη από μία πληθώρα παραγόντων, όπως είναι η ποσότητα και η

κλάση των ραδιενεργών αποβλήτων, η κατάταξή τους στην κλίμακα των βραχυπρόθεσμων-μακροπρόθεσμων, το σύνολο των διαδικασιών που έχουν προηγηθεί της διάθεσης, οι περιβαλλοντικές συνθήκες που αναμένεται να συναντήσει μία τέτοια εγκατάσταση, η διαθεσιμότητα χώρων και η σχετική τοποθεσία τους αναφορικά με κατοικημένες περιοχές, κλπ.

Στην Ελλάδα, δεν διατίθενται εγκαταστάσεις ανακύκλωσης ραδιενεργών υλικών, συνεπώς η χώρα μας είναι αναγκασμένη να αποστέλλει τα ραδιενεργά της απόβλητα σε έτερες χώρες της Ε.Ε., όπου δύναται να λάβει χώρα η διαδικασία της επεξεργασίας τους και εν τέλει η ανακύκλωσή τους. Σε γενικότερο πλαίσιο, σύμφωνα με την Οδηγία 2011/70/Ευρατόμ, κάθε κράτος μέλος της Ε.Ε. οφείλει να αναλαμβάνει τη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων που παράγονται εντός της επικράτειάς του. Κατ' επέκταση, το Ελληνικό κράτος έχει την υποχρέωση να διαχειρίζεται τα ραδιενεργά απόβλητα που παράγονται από δραστηριότητες εντός της χώρας και υπάγονται στη δικαιοδοσία του, σύμφωνα με τις βασικές αρχές της «εθνικής πολιτικής», όπως περιγράφεται στο άρθρο 4 του Π.Δ. 122/2013, όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει (βλ. [σχετική άτυπη κωδικοποίηση των δύο π.δ.](#)), και το [εθνικό πρόγραμμα](#), όπως έχει δημοσιευθεί στο ΦΕΚ 4317/Β/02.10.2020.

Βάσει των προτύπων της ΙΑΕΑ η διαχείριση των ΡΑ μπορεί να περιλαμβάνει διάφορα στάδια και διαδικασίες:

- i. **Planning and Preparation/ Σχεδιασμός και Προετοιμασία**
- ii. **Waste Treatment/ Επεξεργασία Αποβλήτων**  
Συνήθως λαμβάνει χώρα λίγο μετά τη δημιουργία των αποβλήτων. Οι τεχνικές επεξεργασίας ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο των αποβλήτων και την προβλεπόμενη τοποθεσία διάθεσης. Παραδείγματα τέτοιων τεχνικών αποτελούν η απολύμανση, ο τεμαχισμός, η συμπίεση, η αποξήρανση και η στερεοποίηση των αποβλήτων.
- iii. **Packaging/Συσκευασία**  
Τα περισσότερα ραδιενεργά απόβλητα απαιτούν συσκευασία σε ειδικά κατασκευασμένα δοχεία (containers) για την ασφαλή αποθήκευση και διάθεσή τους. Επιτρέπει, επίσης, ευκολότερη διαχείριση και μεταφορά.
- iv. **Storage/Αποθήκευση**  
Οι “προσωρινές” εγκαταστάσεις (interim storage facilities) φιλοξενούν συγκεκριμένους τύπους αποβλήτων έως ότου καταστεί διαθέσιμη μία κατάλληλη τοποθεσία διάθεσης. Η αποθήκευση μπορεί να διαρκέσει από μερικούς μήνες έως και πολλές δεκαετίες.
- v. **Disposal/Διάθεση**  
Η διάθεση ανάγεται στην τοποθέτηση των αποβλήτων μετά την

αποθήκευσή τους σε ειδικά διαμορφωμένες τοποθεσίες, όπου θα παραμείνουν μόνιμα.

Κατόπιν του σταδίου επεξεργασίας και συσκευασίας, τα απόβλητα μπορούν να διατεθούν. Γενικά, η συγκέντρωση, ο περιορισμός των ραδιενεργών αποβλήτων και απομόνωσή τους από τη βιόσφαιρα είναι η αποδεκτή στρατηγική διαχείρισης για το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών. Ο περιορισμός και η απομόνωση μπορούν να επιτευχθούν μέσω μιας σειράς συμπληρωματικών φραγμάτων ασφαλείας, π.χ. βάσει της μορφής των αποβλήτων, δοχείων αποβλήτων, άλλων κατασκευαστικών χαρακτηριστικών που σχετίζονται με τον σχεδιασμό της εγκατάστασης και του τοπικού περιβάλλοντος. Καθεμία από αυτές τις παραμέτρους μπορεί να συμβάλλει στην πρόληψη της απελευθέρωσης ραδιονουκλιδίων από τα απόβλητα, καθώς και στον περιορισμό της έκλυσης ραδιενεργών στοιχείων από την εγκατάσταση στο περιβάλλον.

Αναφέρθηκε, λοιπόν, πως το τελικό στάδιο της διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων αποτελεί η διάθεση, δηλαδή η ταφή τους σε ειδικά διαμορφωμένες εγκαταστάσεις, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της δόσης που θα δεχτεί τόσο ο πληθυσμός, όσο και τα στοιχεία χλωρίδας-πανίδας που ζουν στην ευρύτερη περιοχή. Η διάθεση συναντάται σε ποικίλες μορφές, η καθεμία εκ των οποίων παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, ανάλογα πάντα και με τους υπόλοιπους παράγοντες που περιστοιχίζουν το πρόβλημα των προς διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων. Ωστόσο, τα είδη που κατά βάση αξιοποιούνται συχνότερα είναι τα εξής:

- **Η διάθεση κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (near-surface disposal)**
- **Η βαθιά γεωλογική διάθεση (deep geological disposal)**

Πιο αναλυτικά, η διάθεση κοντά στην επιφάνεια του εδάφους ανάγεται στην τοποθέτηση στερεών/στερεοποιημένων ραδιενεργών αποβλήτων που περιέχουν κυρίως ραδιονουκλίδια σε μία εγκατάσταση διάθεσης που βρίσκεται στην ή κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Το βάθος που επιλέγεται για τη διάθεση και ο τύπος της εγκατάστασης που θα αναπτυχθεί εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η φύση και οι ιδιότητες των αποβλήτων, καθώς και οι τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες στην προτεινόμενη τοποθεσία. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της διάθεσης κοντά στην επιφάνεια του εδάφους είναι η πιθανή ανάγκη να διατηρηθεί ο θεσμικός έλεγχος της τοποθεσίας για κάποια περίοδο μετά το κλείσιμο και το σφράγισμα, λόγω του κινδύνου διατάραξης της εγκατάστασης και του περιεχομένου της από ανθρώπινες δραστηριότητες. Ωστόσο, όπως αναφέρεται στο τεχνικό έγγραφο του ΔΟΑΕ(ΙΑΕΑ-TECDOC1097), "η μακροπρόθεσμη ασφάλεια μιας εγκατάστασης διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων απαιτείται να μην είναι εξαρτώμενη από έναν ενεργό θεσμικό έλεγχο".

Αντίστοιχα, σύμφωνα με μία δημοσίευση της Επιτροπής Διαχείρισης Ραδιενεργών Αποβλήτων (Radioactive Waste Management Committee/RWMC) της Nuclear Energy Agency (NEA) το 2008 (NEA 2008), ένα σύστημα γεωλογικής διάθεσης παρέχει ένα μοναδικό επίπεδο και χρονικό πλαφόν προστασίας για ραδιενεργά απόβλητα υψηλής συγκέντρωσης και μεγάλης διάρκειας ζωής. Η ιδέα αυτή εκμεταλλεύεται τις δυνατότητες τόσο της τοπικής γεωλογίας, όσο και των διαθέσιμων τεχνικών υλικών, προκειμένου να ικανοποιήσει συγκεκριμένες λειτουργίες ασφαλείας με τρόπο συμπληρωματικό μεταξύ τους, παρέχοντας πολλαπλές “στρώσεις” και δικλείδες ασφαλείας. Η συντριπτική πλειοψηφία των επιστημονικών γνώμων παγκοσμίως συμφωνεί στο ότι η γεωλογική διάθεση είναι τεχνολογικά εφικτή και βιώσιμη. Η συγκεκριμένη γνώμη υποστηρίζεται από τα πειραματικά δεδομένα που έχουν συλλεχθεί και συσσωρευθεί για διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς ανά τον κόσμο και μεγάλη ποικιλία τεχνικών υλικών από έρευνες στην επιφάνεια της Γης, από υπόγειες ερευνητικές εγκαταστάσεις, από την τωρινή κατάσταση σε τεχνικές μοντελοποίησης που δύνανται να απλοποιήσουν την ανάλυση και την επίλυση του προβλήματος της διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων, από την εμπειρία στη λειτουργία υπόγειων αποθετηρίων για άλλες κατηγορίες αποβλήτων (π.χ. χημικά απόβλητα) και από την πρόοδο στις βέλτιστες πρακτικές για τη διενέργεια αξιολογήσεων ασφαλείας των πιθανών συστημάτων διάθεσης.

Πιο αναλυτικά, για τη διάθεση κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (near-surface disposal) στο επίπεδο του εδάφους, ή σε βάθος μερικών δεκάδων μέτρων, διατίθενται κυρίως LLW ή/και ILW. Έχει εφαρμοστεί για LLW σε πολλές χώρες, όπως η Τσεχία, η Φινλανδία, η Γαλλία, η Ιαπωνία, η Ολλανδία, η Ισπανία, η Σουηδία, το Ηνωμένο Βασίλειο και οι ΗΠΑ. Για ILW, έχει εφαρμοστεί μεμονωμένα στη Φινλανδία και στη Σουηδία, κοντά στην επιφάνεια της γης λόγω πρόσφορων γεωλογικών χαρακτηριστικών.

Για τη βαθιά γεωλογική διάθεση (σε βάθη μεταξύ 250 και 1000 μέτρων για εξορυσσόμενα αποθετήρια, ή σε βάθη 2000 έως και 5000 μέτρων για γεωτρήσεις), γίνεται εφαρμογή για μακρόβια ILW και HLW(συμπεριλαμβανομένων και χρησιμοποιημένων καυσίμων). Οι περισσότερες χώρες έχουν ερευνήσει τη βαθιά γεωλογική διάθεση και είναι επίσημη πολιτική σε αρκετές χώρες του κόσμου. Στη Φινλανδία, βρίσκεται υπό κατασκευή μία εγκατάσταση βαθιάς γεωλογικής διάθεσης και αναμένεται να εκκινήσει τη λειτουργία της το 2023. Εκτός αυτού, έχουν ήδη ξεκινήσει οι διαδικασίες επιλογής κατάλληλης τοποθεσίας για την εγκατάσταση γεωλογικού αποθετηρίου στο Ηνωμένο Βασίλειο και στον Καναδά.

Στην Ελλάδα δεν υπάρχουν πυρηνικά απόβλητα, λόγω έλλειψης εφαρμογών που θα μπορούσαν να τα δημιουργήσουν (π.χ. πυρηνικοί αντιδραστήρες). Υπάρχει, ωστόσο, παραγωγή μικρών ποσοτήτων ραδιενεργών αποβλήτων που χρίζουν σωστής διαχείρισης.



Στην Ελλάδα, ραδιενεργά απόβλητα μπορούν να προκύψουν κυρίως μέσω εφαρμογών στον τομέα της ιατρικής, της έρευνας και της βιομηχανίας. Στην πλειονότητά τους, τα απόβλητα αυτά είναι πολύ βραχύβια (VSLW/Very Short-Lived Waste), πολύ χαμηλού επιπέδου (VLLW/Very Low-Level Waste) ή χαμηλού επιπέδου (LLW). Μεγάλο μέρος των αποβλήτων, κατόπιν σχετικά σύντομης αποθήκευσης, παύουν να υπερβαίνουν τα όρια αποδέσμευσης και η αποδέσμευσή τους στο περιβάλλον είναι πλέον ασφαλής και εφικτή.

Παρ' όλα αυτά, εκτός των προαναφερθέντων, παράγονται και ραδιενεργά απόβλητα που δεν μπορούν να απορριφθούν μέσω της διαδικασίας αποδέσμευσης στο περιβάλλον, και απαιτούν άλλου είδους μεταχείριση. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν:

- Ραδιενεργά απόβλητα LLW ή VLLW, τα οποία παράγονται κατά την αποξήλωση αλεξικέραυνων ή λόγω εφαρμογών σε ερευνητικά ή ιατρικά εργαστήρια (π.χ. ραδιορυπασμένος εξοπλισμός ή μολυσμένα εργαλεία).
- Ραδιενεργά απόβλητα που μπορούν να προκύψουν κατά τη διαδικασία της αποξήλωσης του πυρηνικού αντιδραστήρα του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος”, τα οποία είναι LLW. Μικρές ποσότητες ILW μπορούν επίσης να προκύψουν. Παράλληλα, τα χρησιμοποιημένα καύσιμα του αντιδραστήρα αποτελούν επίσης ραδιενεργά απόβλητα. Αυτά επιστρέφονται στη χώρα παραγωγής τους (εν προκειμένω οι ΗΠΑ), άρα το θέμα της διαχείρισής τους μεταβιβάζεται μακριά από τη χώρα μας.
- Υλικά NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials) ή TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials), τα οποία πολλές φορές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως απόβλητα VLLW.
- Ραδιενεργές πηγές εκτός χρήσης.

Πρέπει να σημειωθεί πως στη χώρα μας (και σε κάθε χώρα) υπάρχουν απόβλητα που έχουν παραχθεί από παλαιότερες διεργασίες και εφαρμογές (“ιστορικά”, legacy/historical waste). Κατάλογοι για το σύνολο των ραδιενεργών αποβλήτων που παράγονται/έχουν παραχθεί στη χώρα μας και περιλαμβάνονται στις εθνικές εκθέσεις, οι οποίες είναι διαθέσιμες στην επίσημη ιστοσελίδα της Ε.Ε.Α.Ε..

Τα απόβλητα που προκύπτουν μέσω εφαρμογών στον τομέα της ιατρικής αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό των ραδιενεργών αποβλήτων που παράγονται στη χώρα μας. Οι διαδικασίες που οδηγούν στην παραγωγή τους λαμβάνουν χώρα κατά κύριο λόγο σε εργαστήρια πυρηνικής ιατρικής, όπου χρησιμοποιούνται ραδιοφάρμακα (φαρμακευτικά σκευάσματα που περιέχουν έναν ραδιενεργό πυρήνα ή μία χημική ένωση που έχει σημανθεί με ραδιοϊσότοπα) είτε για λόγους διάγνωσης, είτε για λόγους θεραπείας. Τα κυριότερα από αυτά τα απόβλητα είναι:

- Ραδιορυπασμένος ιατρικός εξοπλισμός, όπως χειρουργικά εργαλεία, υφάσματα περίδεσης ασθενών, σύριγγες, φιαλίδια, γενικότερα αντικείμενα που διαχειρίζονται από το εξειδικευμένο προσωπικό των εργαστηρίων πυρηνικής ιατρικής.

- Εκκρίματα ασθενών κλινικών/νοσοκομείων με σημαντική συγκέντρωση ραδιενέργειας, π.χ. κέντρα ιωδιοθεραπείας καρκίνου του θυροειδούς με χορήγηση I-131, το οποίο είναι ραδιενεργό. Σε τέτοια κέντρα, υπάρχουν εγκαταστάσεις αποθήκευσης των εκκρινμάτων αυτών έως την απομείωση του ραδιενεργού ιωδίου.

Σχετικά με τα ραδιενεργά εκκρίματα ασθενών που διαμένουν στις οικίες τους, τα οποία συνήθως ακολουθούν την απόρριψη μέσω αποχέτευσης, αποτελούν αστικά απόβλητα λόγω της πολύ χαμηλής ραδιενέργειας που περιέχουν. Συνεπώς, δεν αποτελούν κίνδυνο και η απόρριψή τους ως κοινά απόβλητα π.χ. σε ΧΥΤΑ είναι αποδεκτή.

Όσον αφορά τη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων, στη χώρα μας υπάρχει νομοθεσία που προσδιορίζει την εθνική πολιτική και προβλέπει τα απαιτούμενα βήματα που πρέπει να γίνουν σε αυτόν τον τομέα. Η εθνική στρατηγική περιγράφεται στα εξής κείμενα:

- Συμμόρφωση του ελληνικού συντάγματος με την Οδηγία 2011/70/Ευρατόμ του Συμβουλίου της 19ης Ιουλίου 2011 περί θεσπίσεως κοινοτικού πλαισίου για την υπεύθυνη και ασφαλή διαχείριση αναλωθέντων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων, Προεδρικό διάταγμα 122, ΦΕΚ 177/Α/12.08.2013
- Νομοθετικό πλαίσιο και εφαρμογή αυτού για την υπεύθυνη και ασφαλή διαχείριση αναλωθέντων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων και τροποποίηση του Προεδρικού Διατάγματος 122/2013, Προεδρικό Διάταγμα 91, ΦΕΚ 130/Α/01.09.2017
- Καθορισμός της εθνικής πολιτικής για τη διαχείριση των αναλωθέντων καυσίμων και των ραδιενεργών αποβλήτων, Απόφαση 131207/Ι3/20.08.2015, ΦΕΚ 858/Β/27.08.2015
- Εθνικό Πρόγραμμα για τη διαχείριση αναλωθέντων καυσίμων και ραδιενεργών αποβλήτων-Σχέδιο Δεύτερο”, ΦΕΚ 4317/Β/02.10.2020.
- Κύρωση της Κοινής Σύμβασης για την ασφάλεια της διαχείρισης αναλωθέντων καυσίμων και την ασφάλεια της διαχείρισης ραδιενεργών αποβλήτων, Ν. 2824/2000, ΦΕΚ 90/Α/16.03.2000.

Όσον αφορά τη χρηματοδότηση μίας τέτοιας διαδικασίας, η κατάρτιση του σχεδίου και η αναζήτηση κονδυλίων πραγματοποιείται από την Εθνική Επιτροπή Διαχείρισης Ραδιενεργών Αποβλήτων(ΕΕΔΡΑ), ενώ έχει επίσης προβλεφθεί η δημιουργία ταμείου παρακαταθήκης. Εκτός αυτού, ο εκάστοτε παραγωγός ραδιενεργών αποβλήτων επιβαρύνεται με το κόστος διαχείρισής τους και υποχρεούται να αναλάβει την εξ' ολοκλήρου χρηματοδότηση, την υλικοτεχνική υποδομή και το εξειδικευμένο ανθρώπινο δυναμικό που απαιτείται για την ασφαλή διαχείρισή τους.

Αν και το μεγαλύτερο μέρος του ραδιενεργού υλικού στα απόβλητα διασπάται σε σύντομο χρονικό διάστημα που κυμαίνονται από λεπτά έως αρκετές δεκαετίες, ένα μικρό

κλάσμα παραμένει ραδιενεργό για πολύ μεγαλύτερες χρονικές περιόδους. Για τον λόγο αυτό έχουν θεσπιστεί απαιτήσεις ασφάλειας για τη διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων που περιλαμβάνουν και την εκτίμηση των ραδιολογικών επιπτώσεων και την εξέλιξη της στον χρόνο

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάζεται η διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων κοντά στην επιφάνεια σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά των σεναρίων που μελετώνται σε τεχνική έκδοση του ΔΟΑΕ. Συγκεκριμένα, η εργασία γίνεται με βάση το τεχνικό έγγραφο 1380 της ΙΑΕΑ (ΙΑΕΑ-TECDOC-1380), όπου αναλύεται ένα παρόμοιο σενάριο. Σκοπός της εργασίας είναι να αναλύσει περαιτέρω το γενικό σενάριο αυτό, προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση διάφορων παραμέτρων και του μοντέλου που χρησιμοποιείται και να εκτιμηθεί η διακύμανση των ραδιολογικών επιπτώσεων. Εδώ, για τη λεπτομερέστερη ανάλυση χρησιμοποιείται το λογισμικό RESRAD-OFFSITE, σε συνδυασμό με ανάλυση αβεβαιότητας για την εκτίμηση της διακύμανσης της έκθεσης του πληθυσμού. Για την άμεση σύγκριση των προσεγγίσεων, η έκθεση υπολογίζεται και ως δόση ανά μονάδα αρχικής ενεργότητας διάθεσης.

Το πρόγραμμα RESRAD-OFFSITE έχει εγκριθεί και χρησιμοποιείται από την U.S.NRC (United States Nuclear Regulatory Commission) για την παραμετροποίηση και προσομοίωση σεναρίων διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων, και ανήκει στην οικογένεια προγραμμάτων "RESRAD". Το πρώτο λογισμικό της οικογένειας αυτής ήταν το RESRAD-ONSITE, το οποίο υπολογίζει την ραδιολογική δόση και τον κίνδυνο ανάπτυξης καρκίνου για ένα άτομο που κατοικεί ή εργάζεται ακριβώς πάνω σε μια ρυπασμένη περιοχή (Gilbert 1989, Yu 1993;2001) και προοριζόταν για μελέτες αποξήλωσης και αποκατάστασης. Αναπτύχθηκε από την ομάδα Διεύθυνσης Περιβαλλοντικής Εκτίμησης της Argonne τη δεκαετία του '80, και έχει αξιοποιηθεί πολλές φορές για τη μελέτη ραδιορυσασμένων περιοχών από την κυκλοφορία του το 1989.

Η ανάπτυξη του προγράμματος RESRAD-OFFSITE ως συνέχεια-βελτίωση του προηγούμενου RESRAD-ONSITE ξεκίνησε τη δεκαετία του '90, κατά τη Μελέτη Επικύρωσης ενός Μοντέλου Βιόσφαιρας (BIOsphere MOdel Validation Study II/BIOMOVs II) από την ΙΑΕΑ, η οποία συνέκρινε μοντέλα ραδιολογικών εκτιμήσεων (Gnanapragasam and Yu 1997, ΙΑΕΑ 1996). Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη αυτή αναγόταν στη δημιουργία μοντέλων με την ικανότητα πρόβλεψης της έκθεσης σε ένα άτομο εκτός του αποτυπώματος της περιοχής αρχικής ρύπανσης (Primary Contamination/Contamination Zone).

Αναλυτικότερα, το λογισμικό RESRAD-OFFSITE υπολογίζει τη ραδιολογική δόση (radiological dose) και τον κίνδυνο ανάπτυξης καρκίνου (excess cancer risk) για ένα άτομο, το οποίο εκτίθεται σε ραδιενέργεια βρισκόμενο εντός ή/και εκτός της περιοχής αρχικής ρύπανσης (primary contaminated zone). Η περιοχή αρχικής ρύπανσης είναι μία ακτίνα περιμετρικά της τοποθεσίας διάθεσης των ραδιενεργών αποβλήτων, η οποία είναι η

μοναδική πηγή κάθε έκλυσης και θεωρείται δεδομένο το ότι βρίσκεται κάτω από ένα στρώμα χώματος σε κάποιο βάθος. Εξαρτάται από τη συγκέντρωση των νουκλιδίων που διατίθενται, τη μορφή του υπεδάφους (υγρή/ξηρή άμμος, χώμα, χαλίκι κλπ.), το κλίμα της ευρύτερης περιοχής (βροχερό, ξηρό κλπ.), το βάθος διάθεσης κ.α.. Όλοι αυτοί οι παράγοντες λαμβάνονται υπόψη και μπορούν να υπολογισθούν μέσω του λογισμικού.

Οι οδοί έκθεσης, είτε αυτές είναι χερσαίες, είτε είναι πηγές νερού, δύνανται να βρίσκονται είτε εντός, είτε εκτός της περιοχής αρχικής ρύπανσης. Ο κώδικας λαμβάνει υπόψη τις εκλύσεις ραδιενεργών ουσιών από την πρωτογενή μόλυνση της ατμόσφαιρας, την απορροή στην επιφάνεια της γης και από τα υπόγεια ύδατα. Ειδικότερα, μοντελοποιεί τη μετακίνηση των ρύπων από την ρυπασμένη ζώνη σε γεωργικές εκτάσεις, βοσκοτόπια, κατοικημένες περιοχές, πηγάδια και ένα επιφανειακό υδάτινο σώμα (surface water body). Εκτός αυτού, έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της συσσώρευσης των ρύπων στις τοποθεσίες αυτές. Οποιαδήποτε συνεισφορά ρύπων από την εγκατάσταση προς σώματα νερού και από πηγές νερού σε χερσαίες τοποθεσίες λαμβάνεται επίσης, υπόψη.

Αναφορικά με τις οδούς έκθεσης, το λογισμικό προσομοιώνει συνολικά 9 κατηγορίες:

- 1) Άμεση έκθεση λόγω ρυπασμένου εδάφους
- 2) Εισπνοή σωματιδίων
- 3) Εισπνοή βραχύβιων θυγατρικών του ραδονίου Rn-222
- 4) Κατάποση φυτικών τροφών (π.χ. φρούτα, λαχανικά, δημητριακά)
- 5) Κατάποση κρέατος
- 6) Κατάποση γάλακτος
- 7) Κατάποση υδρόβιας τροφής (π.χ. ψάρια, μύδια)
- 8) Κατάποση νερού
- 9) Ακούσια κατάποση χώματος (συνήθως από παιδιά)

Το λογισμικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για ντετερμινιστική ανάλυση όσο και για ανάλυση αβεβαιότητας (Uncertainty Analysis).

Ο ΔΟΑΕ στο TECDOC 1380 εξετάζει το σενάριο της εγκατάστασης διάθεσης με επίδραση σε κατοικία με πηγάδι και γεωργικές-κτηνοτροφικές εκτάσεις. Η μεταφορά των νουκλιδίων γίνεται μέσω της διαρροής στο υπόγειο νερό (leaching). Τα νουκλινίδια, δηλαδή μεταφέρονται μέσω των υπόγειων υδάτων. Στο έγγραφο, δίνεται η ενεργότητα του κάθε νουκλινιδίου για τις συνθήκες που περιγράφονται στο επόμενο Κεφάλαιο.

Το σενάριο αυτό εξετάζεται στην παρούσα εργασία τόσο ντετερμινιστικά όσο και μέσω ανάλυσης αβεβαιότητας. Κατά την Ντετερμινιστική Ανάλυση, λαμβάνει χώρα μία προσομοίωση του σεναρίου με όλα τα νουκλινίδια. Οι συνθήκες λαμβάνονται όπως αυτές αναγράφονται στο TECDOC1380. Ωστόσο, ο RESRAD-OFFSITE προσφέρει την ευκαιρία περιγραφής του σεναρίου με περισσότερες μεταβλητές. Στην Ανάλυση Αβεβαιότητας

εξετάζεται η επίδραση του κάθε νουκλιδίου στην συνολική δόση που θα λάβει το άτομο. Για αυτό, λαμβάνει χώρα μία προσομοίωση για κάθε νουκλίδιο, ώστε να είναι ξεκάθαρη η συμμετοχή του. Έτσι, μέσω αυτής της ανάλυσης μπορεί να εξετασθεί οποιοδήποτε σενάριο μεταξύ του χείριστου και του βέλτιστου, δεδομένου του παράγοντα της αβεβαιότητας που αυτή περιέχει. Η διακύμανση της έκθεσης λόγω κάθε νουκλιδίου εκτιμάται με βάση εκτιμήσεις για το εύρος διάφορων σημαντικών παραμέτρων, όπως είναι ο συντελεστής κατανομής  $K_d$ , οι υδραυλικές αγωγιμότητες σε κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη, καθώς και τα ολικά και ενεργά πορώδη σε αυτές.

## 2. Παρουσίαση Προβλήματος

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η παρούσα διπλωματική ανάγεται στην λεπτομερέστερη ανάλυση του σεναρίου στο ΙΑΕΑ-TECDOC-1380 με δύο μεθόδους: Ντετερμινιστικά και Πιθανολογικά(Αβεβαιότητα).

Η εγκατάσταση που εξετάζεται είναι τύπου near-surface disposal, χωρίς κάλυμμα στην πάνω πλευρά, ενώ εξετάζεται η περίπτωση του trench (τάφρος). Τα ραδιονουκλίδια που έχουν διατεθεί είναι τα εξής:  $^{241}\text{Am}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{41}\text{Ca}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{94}\text{Nb}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{151}\text{Sm}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ .

**Πίνακας 1: Τα ραδιονουκλίδια που διατίθενται στην εγκατάσταση και ο χρόνος ημιζωής τους**

Ραδιονουκλίδιο	Χρόνος Ημιζωής (Ετη)
$^{241}\text{Am}$	432.2
$^{14}\text{C}$	5.70E+3
$^{41}\text{Ca}$	1.02E+5
$^{60}\text{Co}$	5.2713
$^{134}\text{Cs}$	2.0648
$^{137}\text{Cs}$	30.1671
$^{55}\text{Fe}$	2.737
$^3\text{H}$	12.32
$^{129}\text{I}$	1.57E+7
$^{94}\text{Nb}$	2.03E+4
$^{59}\text{Ni}$	1.01E+5
$^{63}\text{Ni}$	100.1
$^{237}\text{Np}$	2.144E+6
$^{238}\text{Pu}$	87.7
$^{239}\text{Pu}$	2.411E+4
$^{240}\text{Pu}$	6564
$^{241}\text{Pu}$	14.35
$^{226}\text{Ra}$	1600
$^{228}\text{Ra}$	5.75
$^{151}\text{Sm}$	90

<sup>90</sup> Sr	28.79
<sup>99</sup> Tc	2.111E+5
<sup>232</sup> Th	1.405E+10
<sup>234</sup> U	2.455E+5
<sup>235</sup> U	7.04E+8
<sup>238</sup> U	4.468E+9
<sup>93</sup> Zr	1.53E+6

Ο τρόπος, με τον οποίο τα ραδιονουκλίδια περνούν από την εγκατάσταση στο χώμα είναι μέσω του φαινομένου της έκπλυσης (leaching). Συγκεκριμένα, το leaching είναι μια διαδικασία μεταφοράς μάζας που λαμβάνει χώρα μέσω της εξαγωγής μιας ουσίας από ένα στερεό υλικό που έχει έρθει σε επαφή με το υγρό. Είναι ο μηχανισμός, με τον οποίο οι υδατοδιαλυτές ενώσεις από το έδαφος ή (εν προκειμένω) τα απόβλητα, ξεπλένονται. Ανάγεται σε δύο βασικούς μηχανισμούς που λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα:

- I. Χημικές αλληλεπιδράσεις με επιφάνειες
- II. Φυσική κίνηση του νερού

Η πρωτογενής ρύπανση ανάγεται στην ύπαρξη ρυπασμένου μέσου περιβαλλόμενου από αρχικά καθαρό χώμα. Κρίσιμη παράμετρος για τη διαρροή και κίνηση των νουκλιδίων στην εγκατάσταση και στη συνέχεια στη γεώσφαιρα είναι ο συντελεστής διασποράς  $K_d$  (Distribution Coefficient) του εκάστοτε ραδιονουκλιδίου μεταξύ του μέσου και της υγρασίας στο έδαφος. Τόσο ο συντελεστής αυτός, όσο και η κίνηση των νουκλιδίων στο έδαφος, εξαρτώνται από τις ιδιότητες του εδάφους.

Στο σενάριο που εξετάζει ο ΔΟΑΕ, η διάθεση γίνεται σε περιοχή με εύκρατο κλίμα. Η εγκατάσταση που μελετάται είναι τύπου τάφρου (trench) με διαστάσεις 100m σε μήκος, 15m σε πλάτος και 4m σε βάθος. Το πλάτος θεωρείται ότι είναι παράλληλο ως προς τη ροή στον υδροφόρο ορίζοντα (aquifer).

Κάτω από την εγκατάσταση (ρυπασμένη ζώνη) συναντάται η Ακόρεστη Ζώνη (Unsaturated Zone), η οποία ορίζεται ως ένα αρχικά καθαρό από ρύπανση στρώμα εδάφους που βρίσκεται μεταξύ της ρυπασμένης ζώνης και του υδροφόρου ορίζοντα (aquifer). Το χαρακτηριστικό ακόρεστης ζώνης είναι η μη-πληρότητα των πόρων του εδάφους με νερό.

Ο υδροφόρος ορίζοντας (κορεσμένη ζώνη), είναι ένα σώμα από πέτρινες δομές ή/και ιζημάτα που έχουν δημιουργηθεί χάριν γεωλογικών μεταβολών ανά τα χρόνια, που συγκρατούν τα υπόγεια ύδατα. Η κορεσμένη ζώνη χαρακτηρίζεται από 100% πληρότητα

των πόρων και των δομικών κενών με νερό. Τα υδάτινα σώματα αυτά είναι η απόρροια του κύκλου του νερού, καθώς η βροχόπτωση/χιονόπτωση διεισδύει συνεχώς σε μεγάλα βάθη στο έδαφος.

Όπως αναφέρθηκε, εξαιρετικά σημαντικό μέγεθος για τη διασπορά των ρύπων αποτελεί ο συντελεστής κατανομής  $K_d$  (Distribution Coefficient). Στην παρούσα εργασία, ο συντελεστής κατανομής λαμβάνεται ντετερμινιστικά λαμβάνοντας τις προεπιλεγμένες τιμές του λογισμικού, καθώς και μέσω ανάλυσης αβεβαιότητας. Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής κατανομής περιγράφει τον καταμερισμό του κάθε νουκλιδίου μεταξύ της υδατικής (aqueous) και της στερεάς φάσης του εδάφους, των ιζημάτων ή του ρυπασμένου μέσου. Μαθηματικά, ορίζεται ως ο λόγος της συγκέντρωσης ρυπογόνων ουσιών στην προσροφημένη φάση του εδάφους (ή των ιζημάτων) προς την συγκέντρωση ρυπογόνων ουσιών στην υδατική φάση του εδάφους (ή των ιζημάτων). Οι μονάδες του είναι σε κυβικά εκατοστά ανά γραμμάριο ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ). Η τιμή του εξαρτάται από παράγοντες όπως ο τύπος του εδάφους (χώμα, άμμος κλπ.), το pH, το δυναμικό οξειδοαναγωγής, και η παρουσία άλλων ιόντων. Ο συντελεστής κατανομής παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση μεταξύ σημείων ακόμα και της ίδια τοποθεσίας, έως και τάξεις μεγέθους.

Για κάθε ένα από τα παραπάνω νουκλίδια έχουμε μία συγκεκριμένη αρχική συγκέντρωση που διαθέτουμε στην προκείμενη εγκατάσταση, η οποία προσδιορίζεται ως προς τη μάζα του ρυπασμένου μέσου και υπολογίζεται ως εξής:

Όπως και η IAEA, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ως αρχική ενεργότητα, η οποία προκαλεί δόση ίση με  $1 \text{ mSv}/\text{έτος}$ , δηλαδή ως  $\text{Bq}/(\text{mSv}/\text{έτος})$ . Για τον λόγο αυτό, για κάθε νουκλίδιο θεωρείται στους υπολογισμούς αρχική ενεργότητα ίση με  $1 \text{ Bq}$ . Το λογισμικό RESRAD απαιτεί την έκφραση της αρχικής ενεργότητας ως προς τη μάζα της ρυπασμένης ζώνης, δηλαδή ως  $\text{Bq}/\text{gr}$ . Για τον προσδιορισμό της τιμής, διαιρείται το  $1 \text{ Bq}$  με τη συνολική μάζα της εγκατάστασης, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

Υπολογίζεται ο όγκος του trench που μελετάται, το οποίο στα πλαίσια του λογισμικού θεωρείται ως ορθογώνιο παραλληλόγραμμο. Είναι, δηλαδή:

$$V = 100\text{m} \times 15\text{m} \times 4\text{m} = 6.000 \text{ m}^3$$

Η πυκνότητα όγκου είναι δεδομένη μέσω του TECDOC της IAEA και ισούται με  $1.6 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Δίνεται, επίσης, πως ο λόγος του συνολικού όγκου των νουκλιδίων προς τον όγκο της χωμάτινης επίστρωσης ισούται με  $2/1$ . Άρα, για να υπολογιστεί η μάζα των νουκλιδίων που διατίθενται, αρκεί να πολλαπλασιαστεί το  $1/3$  του όγκου του trench με την πυκνότητα. Προκύπτει η μάζα  $M$ , δηλαδή η μάζα του κάθε νουκλιδίου που διατίθεται. Από τη σχέση της συγκέντρωσης  $C = 1/M$ , υπολογίζεται η συγκέντρωση που θα έχει το κάθε νουκλίδιο στην εγκατάσταση, η οποία ισούται με  $C = 6.073\text{E}-11 \text{ Bq}/\text{g}$ .



Πέρα των αναφορών που έγιναν παραπάνω, στο έγγραφο δίνονται περαιτέρω παράμετροι, οι οποίες εισήχθησαν στο πρόβλημα. Αυτές οι παράμετροι αφορούν το σύνολο της εγκατάστασης και είναι: το κινηματικό πορώδες και το ολικό πορώδες, που έχουν τιμή 0.4, καθώς και η υδραυλική αγωγιμότητα, η οποία ισούται με  $10^{-5}$  m/s.

Ένα σημαντικό κομμάτι της μελέτης που διεξάγεται είναι η μορφή της γεώσφαιρας στην ευρύτερη τοποθεσία της διάθεσης. Εν προκειμένω, το έδαφος παραπέμπει σε μορφή αμμώδους γεώσφαιρας (sandy geosphere). Ο ΔΟΑΕ θεωρεί τα παρακάτω χαρακτηριστικά για τη γεώσφαιρα:

- Πάχος ακόρεστης ζώνης = 2m
- Μέση περιεχόμενη υγρασία στην ακόρεστη ζώνη = 0.15
- Κινηματικό και συνολικό πορώδες = 0.3
- Πυκνότητα = 2000 kg/m<sup>3</sup>
- Υδραυλική αγωγιμότητα =  $10^{-5}$  m/s
- Υδραυλική κλίση = 0.02
- Κορεσμένο πάχος = 15m
- Διαμήκης διασπορά = (Απόσταση κίνησης)/10 (m)
- Εγκάρσια διασπορά = (Απόσταση κίνησης)/50 (m)

Η επόμενη κατηγορία μεταβλητών που παρατίθενται στο TECDOC 1380 αφορά εκείνες που έχουν να κάνουν με την ανθρώπινη συμπεριφορά, η οποία συνδέεται άμεσα με τη δόση που θα καταλήξει να λάβει το κάθε άτομο. Αυτές οι μεταβλητές είναι οι:

- Ρυθμός αναπνοής = 1 m<sup>3</sup>/h
- Ρυθμός πρόσληψης πόσιμου νερού = 0.73 m<sup>3</sup>/y
- Ρυθμός κατανάλωσης ιχθύων γλυκού νερού<sup>1</sup> = 2 kg/y
- Ρυθμός κατανάλωσης σιτηρών = 148 kg/y
- Ρυθμός κατανάλωσης ριζικών λαχανικών = 235 kg/y
- Ρυθμός κατανάλωσης πράσινων λαχανικών = 62 kg/y
- Ρυθμός κατανάλωσης αγελαδινού γάλακτος = 330 kg/y
- Ρυθμός κατανάλωσης αγελαδινού κρέατος = 95 kg/y
- Συγκέντρωση σκόνης =  $10^{-6}$  kg/m<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Στα αποτελέσματα των εν προκειμένω σεναρίων, παρατηρήθηκε πως η δόση που αντιστοιχεί στην κατανάλωση ιχθύων με ίχνη ραδιενεργούς ρύπανσης είναι απειροελάχιστη συγκριτικά με τις υπόλοιπες οδούς έκθεσης. Συνεπώς, στους υπολογισμούς παραλείφθηκε.

- Συντελεστής κάλυψης γης = 0.034

Όσον αφορά την καλλιέργεια, ο ΔΟΑΕ θεωρεί τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Ρυθμός άρδευσης ανά καλλιέργεια (σε εύκρατο κλίμα) = 0.3 m/y (χωρίς άρδευση βοσκοτοπιών)
- Πάχος του χώματος = 0.25 m
- Παράγοντας διακοπής (interception factor) = 0.33
- Απόδοση σιτηρών = 0.4 kg/(m<sup>2</sup>y) (υγρό βάρος)<sup>2</sup>
- Απόδοση ριζικών λαχανικών = 3.5 kg/(m<sup>2</sup>y) (υγρό βάρος)
- Απόδοση πράσινων λαχανικών = 3 kg/(m<sup>2</sup>y) (υγρό βάρος)
- Απόδοση βοσκοτοπιών = 1.7 kg/(m<sup>2</sup>y) (υγρό βάρος)<sup>3</sup>

Εφόσον στο σενάριο που μελετάται, λαμβάνεται υπόψη και η οδός έκθεσης μέσω κατάποσης κρέατος (προφανώς ζώων που ζουν και τρέφονται με τη χλωρίδα της περιοχής πέριξ της τοποθεσίας διάθεσης), απαιτούνται και για αυτήν την οδό δεδομένα, τα οποία επίσης δίνονται. Θεωρείται εκτροφή βοοειδών με τα παρακάτω χαρακτηριστικά: .

- Ημερήσια κατανάλωση νερού = 0.06 m<sup>3</sup>/day
- Ημερήσια κατανάλωση χώματος = 0.6 kg/day
- Ημερήσια πρόσληψη βοσκής (υγρής)<sup>4</sup> = 55 kg/day
- Μέσο βάρος ζώου = 500 kg
- Μέση ετήσια παραγωγή γάλακτος = 5500 kg/y
- Πυκνότητα ζώων σε κτηνοτροφική γη = 100 ζώα/km

Έπειτα, αξίζει να σημειωθούν κάποιες σχέσεις που συμβάλλουν στην ευκολότερη και πιο ρεαλιστική προσέγγιση ενός τέτοιου σεναρίου.

---

<sup>2</sup> Σχετικά με το υγρό βάρος των λαχανικών και των σιτηρών, πρέπει να διευκρινιστεί η εξής λεπτομέρεια: Το υγρό βάρος συμπεριλαμβάνει, πέρα από το ίδιο το συστατικό (σιτηρά, λαχανικά κλπ.), και το βάρος του νερού που τυχόν βρέθηκε στην περιοχή, από την οποία λήφθηκε το δείγμα. Δεν εφαρμόζεται, δηλαδή, κάποια διαδικασία απομάκρυνσης του νερού πριν τον υπολογισμό του βάρους του δείγματος.

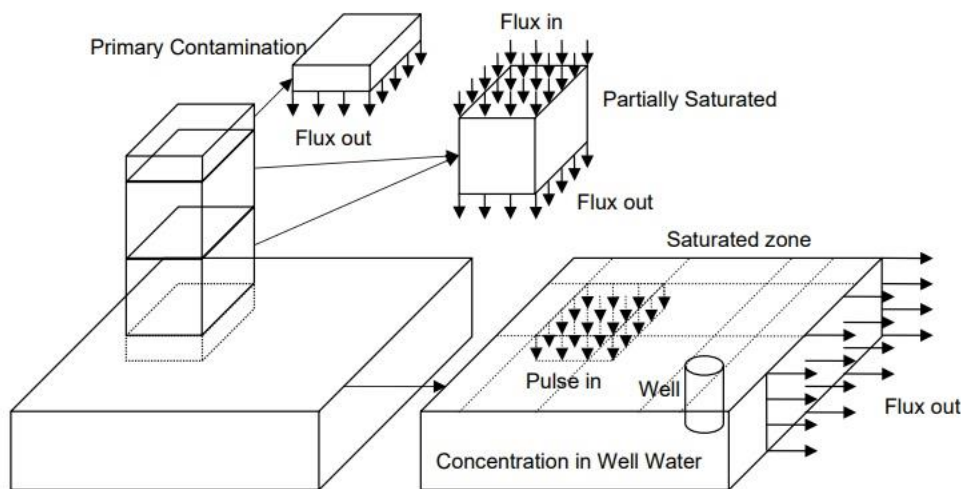
<sup>3</sup> Τα βοσκοτόπια θεωρείται ότι έχουν ρυπανθεί από την πρόσληψη των ριζών στο έδαφος, το οποίο είχε χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για την καλλιέργεια αρδευόμενων καλλιεργειών.

<sup>4</sup> Πάλι, στη βοσκή προσμετράται και το βάρος του νερού.

Το μοντέλο προσομοίωσης της μετακίνησης των υπόγειων υδάτων ανάγεται σε ορισμένες “ζώνες”:

1. Την πρωτογενή ρύπανση
2. Μηδέν έως πέντε οριζόντια στρώματα μερικώς κορεσμένες ζώνες
3. Μια αρχικά μη-ρυπασμένη και απεριόριστη κορεσμένη ζώνη

Στην Εικόνα 2 απεικονίζεται ένα σενάριο, στο οποίο η πρωτογενής ρύπανση βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα με δύο μερικώς κορεσμένες ζώνες.



**Εικόνα 2: Αναπαράσταση πρωτογενούς ρύπανσης και κορεσμένων ζωνών**

Η Κάτοψη της πρωτογενούς ρύπανσης (σχήμα στο οριζόντιο επίπεδο) θεωρείται ότι είναι ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο, με ένα ζεύγος πλευρών παράλληλο προς την κατεύθυνση της ροής των υπόγειων υδάτων.

Η ροή του νερού και στις μερικώς κορεσμένες ζώνες και στην πρωτογενή ρύπανση, είναι καθοδική στην κάθετη κατεύθυνση. Στην κορεσμένη ζώνη, και στην πρωτογενή ρύπανση που βρίσκεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, η ροή κινείται στην οριζόντια κατεύθυνση.

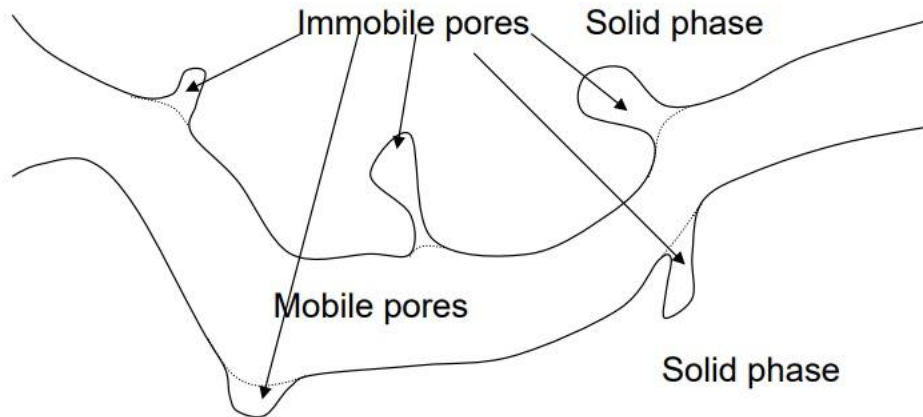
Η κάθε ζώνη μεταφοράς αντιμετωπίζεται ως ένα ομοιογενές στρώμα, δηλ. ιδιότητες όπως η πυκνότητα, το πορώδες, η υδραυλική αγωγιμότητα, η διασπορά και η υδραυλική κλίση θεωρούνται ως αμετάβλητες σε κάθε ξεχωριστή ζώνη μεταφοράς. Το λογισμικό ενδιαφέρεται μόνο για τους διασυνδεδεμένους πόρους για τη μοντελοποίηση της μεταφοράς νουκλιδίων στα υπόγεια ύδατα, επειδή οι απομονωμένοι πόροι δεν επηρεάζουν την κίνηση τους.

Οι διασυνδεδεμένοι πόροι ανάγονται σε δύο κατηγορίες:

1. Κινητοί πόροι

## 2. Ακίνητοι πόροι

Η απεικόνιση των πόρων γίνεται στην Εικόνα 3.



**Εικόνα 3: Κινητοί και Ακίνητοι πόροι**

Στους κινητούς πόρους, το νερό είναι ελεύθερο να κινείται και συμβάλλει στη γρήγορη μεταφορά των νουκλιδίου.

Στους ακίνητους πόρους, η υγρασία παγιδεύεται είτε επειδή οι ίδιοι οι πόροι είναι “αδιέξοδοι” (dead-end pores), είτε επειδή είναι στενά δεσμευμένη στη στερεά φάση και δεν συνεισφέρει στη μεταφορά των νουκλιδίου.

Οι δύο τύποι πόρων συνδέονται με την ακόλουθη έκφραση:

$$\theta_m + \theta_{im} = \theta_t$$

Όπου:

$\theta_m$  το κινηματικό πορώδες, το πορώδες που επιτρέπει ή συμβάλλει στην κίνηση του νερού

$\theta_{im}$  το ενεργό πορώδες, το πορώδες που δεν επιτρέπει ή δεν συμβάλλει στην κίνηση του νερού

$\theta_t$  το άθροισμα των δύο πορώδων, δηλ. το συνολικό πορώδες

Αν και τα νουκλίδια απορροφώνται από την επιφάνεια των στερεών του εδάφους, η συγκέντρωσή τους στο έδαφος εκφράζεται ως προς τη μάζα των στερεών. Το κλάσμα όγκου του χώματος που σχετίζεται με τους κινητούς πόρους ( $u_m$ ) και το κλάσμα όγκου του χώματος που σχετίζεται με τους ακίνητους πόρους ( $u_{im}$ ) θεωρείται πως έχουν την ίδια αναλογία με τα πορώδη αυτών των δύο φάσεων. Ισχύει δηλαδή:

$$\frac{u_m}{u_{im}} = \frac{\theta_m}{\theta_{im}}$$

Ο καταμερισμός των ραδιονουκλιδίων μεταξύ της υδατικής φάσης στους πόρους και της στερεάς φάσης που προσροφώνται στην επιφάνεια είναι δυναμικός.

Τα νουκλίδια απορροφώνται με ρυθμό που εξαρτάται από τη συγκέντρωσή τους στην υδατική φάση. Αντίστροφα, τα νουκλίδια που απορροφήθηκαν από την επιφάνεια εκροφώνται με ρυθμό που εξαρτάται από τη συγκέντρωσή τους στη στερεά (προσροφημένη) φάση.

Με την πάροδο του χρόνου, οι δύο φάσεις έρχονται σε ισορροπία και ο καταμερισμός των νουκλιδίου μεταξύ της υδατικής και της στερεάς φάσης χαρακτηρίζεται από έναν γραμμικό συντελεστή κατανομής ισορροπίας στον RESRAD-OFFSITE, τον  $K_d$ :

$$K_d = \frac{S_m}{C_m} 10^6 = \frac{S_{im}}{C_{im}} 10^6$$

Όπου:

$K_d$  ο συντελεστής διασποράς ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )

$S_m, S_{im}$  οι συγκεντρώσεις των νουκλιδίων στο χώμα που σχετίζεται με τους κινητούς και τους ακίνητους πόρους αντίστοιχα ( $\text{Bq/g}$ )

$C_m, C_{im}$  συγκεντρώσεις των νουκλιδίων στους κινητούς και στους ακίνητους πόρους ( $\text{Bq/m}^3$ )

$10^6$  συντελεστής μετατροπής ( $\text{cm}^3/\text{m}^3$ )

Η ποσότητα των νουκλιδίων σε μια στοιχειώδη μονάδα όγκου στο έδαφος είναι το άθροισμα των ποσοτήτων στους κινητούς και τους ακίνητους πόρους και στη στερεά φάση που σχετίζεται με αυτούς τους πόρους:

$$\begin{aligned} & \theta_m C_m + \theta_{im} C_{im} + u_m \rho_b 10^6 S_m + u_{im} \rho_b 10^6 S_{im} \\ = & \theta_m C_m + \theta_{im} C_{im} + \frac{u_m}{u_m + u_{im}} \rho_b 10^6 S_m + \frac{u_{im}}{u_m + u_{im}} \rho_b 10^6 S_{im} \\ = & \theta_m C_m + \theta_{im} C_{im} + \frac{\theta_m}{\theta_m + \theta_{im}} \rho_b K_d C_m + \frac{\theta_{im}}{\theta_m + \theta_{im}} \rho_b K_d C_{im} \\ = & \theta_m C_m + \frac{\rho_b K_d}{\theta_t} \theta_m C_m + \theta_{im} C_{im} + \frac{\rho_b K_d}{\theta_t} \theta_{im} C_{im} \\ = & \left(1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta_t}\right) \theta_m C_m + \left(1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta_t}\right) \theta_{im} C_{im} \\ = & \frac{\theta_m C_m + \theta_{im} C_{im}}{\theta_t} (\theta_t + \rho_b K_d) \\ = & c_{av} (\theta_t + \rho_b K_d) \end{aligned}$$

Όπου  $c_{av}$  η μέση συγκέντρωση του νουκλιδίου στους διασυνδεδεμένους πόρους ( $\rho\text{Ci}/\text{m}^3$ ).

Η αλλαγή στην ποσότητα των ραδιονουκλιδίων στον στοιχειώδη όγκο του εδάφους με την πάροδο του χρόνου ως αποτέλεσμα των ραδιολογικών μετασχηματισμών προκύπτει από την έκφραση για την ποσότητα των νουκλιδίου στη μονάδα όγκου εδάφους:

$$change = -\lambda c_{av}(\theta_t + \rho_b K_d) \delta x \delta y \delta z$$

Αυτή η αλλαγή ανάγεται στη διαφορά μεταξύ της ποσότητας των νουκλιδίων που μεταφέρονται από το νερό που εισέρχεται στον όγκο μέσω των κινητών πόρων και της ποσότητας των νουκλιδίων που εξέρχονται από αυτόν μέσω της εκροής από τους κινητούς πόρους.

$$change = -V_m \theta_m \delta x \delta y \frac{\partial c_m}{\partial z} \delta z$$

Όπου  $V_m$  η μέση ταχύτητα του νερού όσο ρέει διαμέσω των κινητών πόρων (m/έτος)

Καθώς η ρύπανση κινείται, το νερό που εισέρχεται στους κινητούς πόρους περιέχει ραδιονουκλίδια. Εν γένει, τα ραδιονουκλίδια που βρίσκονται στους μεν πόρους (κινητούς/ακίνητους) μεταφέρονται στους δε με ρυθμό που εξαρτάται από τη συγκέντρωσή τους στους πρώτους. Με την πάροδο του χρόνου, η συγκέντρωση στους ακίνητους πόρους όλο και αυξάνεται, μέχρι το σημείο όπου επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ των δύο (κινητούς και ακίνητους πόρους).

Για τον υπολογισμό της μέσης συγκέντρωσης στους πόρους, έχει γίνει μία απλουστευτική παραδοχή: Εάν ο χρόνος που απαιτείται για τη διάσχιση ενός συγκεκριμένου όγκου χώματος είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με εκείνον που απαιτείται για να έρθουν σε ισορροπία οι κινητοί και οι ακίνητοι πόροι, τότε η συγκέντρωση στους τελευταίους θεωρείται αμελητέα σε σχέση με εκείνη στους πρώτους.

Υπό αυτή τη συνθήκη, η μέση συγκέντρωση στο σύνολο των πόρων δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$c_{av} = \frac{\theta_m c_m + \theta_{im} c_{im}}{\theta_t} \approx \frac{\theta_m}{\theta_t} c_m$$

Επίσης, εάν ο χρόνος που απαιτείται για τη διάσχιση ενός συγκεκριμένου όγκου χώματος είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με εκείνον που απαιτείται για να έρθουν σε ισορροπία οι κινητοί και οι ακίνητοι πόροι, τότε οι συγκεντρώσεις στους μεν και στους δε είναι ίσες.

Υπό αυτή τη συνθήκη, η μέση συγκέντρωση στο σύνολο των πόρων δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$C_{av} = \frac{\theta_m c_m + \theta_{im} c_{im}}{\theta_t} \approx \frac{\theta_t}{\theta_t} c_m = c_m$$

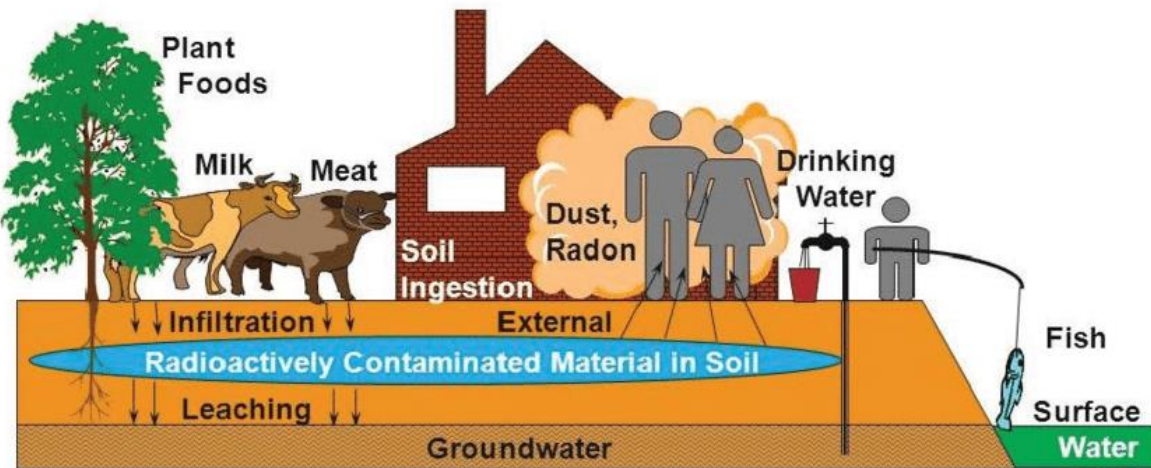
### 3. Αναλύσεις

#### 3.1 Ντετερμινιστική Ανάλυση(Deterministic Analysis)

Η **Ντετερμινιστική Ανάλυση (1<sup>ο</sup> σενάριο)**, περιλαμβάνει μία και μόνο προσομοίωση, η οποία περιέχει συγκεκριμένες μεταβλητές, σύμφωνα με τις τιμές των παραμέτρων στο TECDOC1380 της ΙΑΕΑ, όπως αυτές παρατέθηκαν στο Κεφάλαιο 2(Παρουσίαση Προβλήματος). Για τις παραμέτρους που απαιτεί ο κώδικας RESRAD για τις οποίες δεν δίνονται τιμές στο TECDOC 1380, λαμβάνονται οι προεπιλεγμένες τιμές του κώδικα.

Η ανάλυση περιλαμβάνει την προσομοίωση με όλα τα νουκλίδια μαζί, με ίσες μεταξύ τους συγκεντρώσεις και όλες τις οδούς έκθεσης που παρατέθηκαν, πέραν του ραδονίου και της κατανάλωσης ιχθύων, δηλ. χρησιμοποιούνται η λίστα νουκλιδίων του Πίνακα 1 με συγκέντρωση  $6.73E-11$  Bq/g.

Στην Εικόνα 4 απεικονίζεται το σύνολο των οδών έκθεσης που μπορούν να εισαχθούν στην προσομοίωση του σεναρίου.



Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση των οδών έκθεσης στον RESRAD-OFFSITE

Οι οδοί έκθεσης που χρησιμοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο σενάριο είναι:

1. Άμεση έκθεση λόγω ρυπασμένου εδάφους
2. Εισπνοή σωματιδίων
3. Κατάποση φυτικών τροφών (π.χ. φρούτα, λαχανικά, δημητριακά)
4. Κατάποση κρέατος
5. Κατάποση γάλακτος
6. Κατάποση νερού
7. (Ακούσια) κατάποση χώματος (συνήθως από παιδιά)



### **ΜΟΝΤΕΛΟ ΡΥΠΑΣΜΕΝΗΣ ΖΩΝΗΣ**

Αρχικά, ως του μοντέλου προσομοίωσης δεν επιλέγεται το μοντέλο εκθετικής έκλυσης του RESRAD-ONSITE, αλλά ένα μοντέλο όπου συγκεκριμενοποιείται η αρχική ραδιενέργεια των νουκλιδίων βάσει της συνολικής μάζας της πρωτογενούς ρύπανσης, το οποίο βασίζεται στη δημοσίευση στην ICRP 107. Οι ιδιότητες της πρωτογενούς ρύπανσης χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της μεταφοράς της από την στερεά στην υδατική φάση, καθώς και τη μεταφορά των ραδιονουκλιδίων μέσω αυτής. Επίσης, οι ραδιολογικές μονάδες που χρησιμοποιούνται είναι Bq για τη ραδιενέργεια και mSv για τη δόση. Το βασικό όριο ραδιολογικής δόσης λαμβάνεται στα 0.25 mSv/year.

### **ΧΡΟΝΙΚΟ ΠΛΑΣΙΟ**

Σημαντική παράμετρος είναι ο χρόνος που εκκινεί η προσομοίωση αναφορικά με την αρχική διάθεση. Εν προκειμένω, έχει γίνει η θεώρηση θεσμικής περιόδου διάρκειας 100 ετών. Δηλαδή, για τα πρώτα 100 χρόνια μετά τη διάθεση των ραδιενεργών αποβλήτων και το κλείσιμο της εγκατάστασης, στην τοποθεσία λαμβάνει χώρα σε ετήσια βάση έλεγχος, ο οποίος έχει ως βασικό σκοπό τον έλεγχο των επιπέδων ραδιενέργειας στην ευρύτερη περιοχή και η ανίχνευση τυχόντος κινδύνου ή ατελειών της εγκατάστασης. Μετά το πέρας αυτής της περιόδου θεωρείται ότι τα φράγματα ασφάλειας αστοχούν ακαριαία. Επομένως, η διαφυγή ραδιονουκλιδίων ξεκινά 100 χρόνια μετά το σφράγισμα της εγκατάστασης.

### **ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ**

Εύκολα καταλαβαίνει κανείς πως ο πλέον σημαντικός παράγοντας για την έκθεση του πληθυσμού είναι τα νουκλίδια που θα διατεθούν, καθώς και οι συγκεντρώσεις τους. Η λίστα των ραδιονουκλιδίων αναγράφεται στον Πίνακα 1. Όπως εξηγήθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο(Παρουσίαση Προβλήματος), η αρχική συγκέντρωση των ραδιονουκλιδίων στη ρυπασμένη ζώνη για μοναδιαία ολική ενεργότητα υπολογίζεται ίση με  $6.73E-11$  Bq/g. Αξίζει να σημειωθεί πως στη λίστα αυτή συμπεριλαμβάνονται και τα θυγατρικά των αρχικών ισοτόπων.

Στη συνέχεια, έχουν σειρά στοιχεία σχετικά με την έκλυση σε υπόγεια ύδατα. Ο μηχανισμός μεταφοράς του ρύπου που επιλέχθηκε είναι η ισορροπία μεταφοράς εκρόφησης (Equilibrium Desorption Transfer). Οι κυριότεροι συντελεστές διασποράς είναι εκείνοι που αντιστοιχούν στην Ρυπασμένη Ζώνη, στην Ακόρεστη και στην Κορεσμένη Ζώνη. Ο πίνακας των νουκλιδίων και των βασικών συντελεστών μεταφοράς τους δίνεται παρακάτω:

**Πίνακας 2: Βασικοί συντελεστές μεταφοράς νουκλιδίων**

Νουκλίδιο	Συντ. κατανομής στην Ρυπασμένη Ζώνη (cm <sup>3</sup> /g)	Συντ. στην Ακόρεστη Ζώνη(cm <sup>3</sup> /g)	Συντ. στην Κορεσμένη Ζώνη(cm <sup>3</sup> /g)
<b>Ac-227</b>	20	20	20
<b>Am-241</b>	20	20	20
<b>C-14</b>	0	0	0
<b>Ca-41</b>	50	50	50
<b>Co-60</b>	1000	1000	1000
<b>Cs-134</b>	4600	4600	4600
<b>Cs-137</b>	4600	4600	4600
<b>Fe-55</b>	1000	1000	1000
<b>H-3</b>	0	0	0
<b>I-129</b>	0.1	0.1	0.1
<b>Nb-93m</b>	0	0	0
<b>Nb-94</b>	0	0	0
<b>Ni-59</b>	1000	1000	1000
<b>Ni-63</b>	1000	1000	1000
<b>Np-237</b>	257	257	257
<b>Pa-231</b>	50	50	50
<b>Pb-210</b>	100	100	100
<b>Po-210</b>	10	10	10
<b>Pu-238</b>	2000	2000	2000
<b>Pu-239</b>	2000	2000	2000
<b>Pu-240</b>	2000	2000	2000
<b>Pu-241</b>	2000	2000	2000
<b>Ra-226</b>	70	70	70
<b>Ra-228</b>	70	70	70
<b>Sm-151</b>	825	825	825
<b>Sr-90</b>	30	30	30
<b>Tc-99</b>	0	0	0
<b>Th-228</b>	60000	60000	60000
<b>Th-229</b>	60000	60000	60000
<b>Th-230</b>	60000	60000	60000
<b>Th-232</b>	60000	60000	60000
<b>U-233</b>	50	50	50
<b>U-234</b>	50	50	50
<b>U-235</b>	50	50	50
<b>U-236</b>	50	50	50

<b>U-238</b>	50	50	50
<b>Zr-93</b>	2200	2200	2200

Επίσης, συντελεστές διασποράς ορίζονται για της εξής κατηγορίες:

- Αιωρούμενα Ιζήματα σε Επιφανειακά Υδάτινα Σώματα (Suspended sediment in Surface Water Body)
- Ίζημα Πυθμένα σε Επιφανειακά Υδάτινα Σώματα (Bottom sediment in Surface Water Body)
- Χωράφια μη φυλλώδη, καλλιεργημένα με φρούτα και σιτηρά (Fruit, grain, nonleafy fields)
- Χωράφια καλλιεργημένα με φυλλώδη λαχανικά (Leafy vegetable fields)
- Βοσκοτόπια, χωράφια καλλιέργειας φρέσκου χορταριού (Pasture, silage growing areas)
- Κτηνοτροφικά χωράφια με σιτηρά (Livestock feed grain fields)
- Τοποθεσία κατοικίας (Dwelling site)

Για κάθε κατηγορία από αυτές, η τιμή του συντελεστή διασποράς έχει την ίδια τιμή για το κάθε νουκλίδιο και ίση με αυτή του Πίνακα 2.

Πολύ σημαντικοί είναι επίσης και οι συντελεστές μεταφοράς (transfer factors) από το περιβάλλον στα λαχανικά και άλλα προϊόντα:

- Συντελεστής Μεταφοράς από το χώμα προς τα φυτά (Soil to plant transfer factor)  
Περιλαμβάνει, ειδικότερα, συντελεστές για φρούτα, σιτηρά και μη φυλλώδη λαχανικά (Fruit, grain, non-leafy vegetables), για φυλλώδη λαχανικά (Leafy vegetables), για βοσκοτόπια και φρέσκο χορτάρι (Pasture, silage) και κτηνοτροφία με σιτηρά (Livestock feed grain).
- Συντελεστής Μεταφοράς για πρόσληψη σε ζωικά προϊόντα (Intake to animal product transfer product)  
Τέτοιοι συντελεστές συναντώνται για το γάλα (Milk) και για το κρέας (Meat).
- Συντελεστής Μεταφοράς από το νερό σε υδρόβια τρόφιμα (Water to aquatic food transfer factor)  
Σε αυτή την κατηγορία, υπάρχουν συντελεστές για ιχθείς (Fish) και για καρκινοειδή (Crustacea).

Παρακάτω, παρατίθεται ο πίνακας με τις τιμές των συντελεστών μεταφοράς για κάθε νουκλίδιο.

**Πίνακας 3: Συντελεστές μεταφοράς νουκλιδίων**

Νουκλίδιο	Fruit, Grain, nonleafy vegetables [(Bq/kg)/(Bq/kg)]	Leafy vegetables [(Bq/kg)/(Bq/kg)]	Pasture, silage [(Bq/kg)/(Bq/kg)]	Livestock feed grain [(Bq/kg)/(Bq/kg)]	Meat [(Bq/kg)/(Bq/d)]	Milk [(Bq/L)/(Bq/d)]	Fish [(Bq/kg)/(Bq/L)]	Crustacea [(Bq/kg)/(Bq/L)]
<sup>227</sup> Ac	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.00002	0.00002	15	1000
<sup>241</sup> Am	0.001	0.001	0.001	0.001	0.00005	0.000002	30	1000
<sup>14</sup> C	0.2667	0.06	0.06	0.2667	0.0105	0.00837	50000	9100
<sup>41</sup> Ca	0.5	0.5	0.5	0.5	0.0016	0.003	1000	330
<sup>60</sup> Co	0.08	0.08	0.08	0.08	0.02	0.002	300	200
<sup>134</sup> Cs	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.008	2000	100
<sup>137</sup> Cs	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.008	2000	100
<sup>55</sup> Fe	0.001	0.001	0.001	0.001	0.02	0.0003	200	3200
<sup>3</sup> H	4	4	4	4	0.005742	0.004312	1	1
<sup>129</sup> I	0.02	0.02	0.02	0.02	0.07	0.01	40	5
<sup>93m</sup> Nb	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0000003	0.000002	300	100
<sup>94</sup> Nb	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0000003	0.000002	300	100
<sup>59</sup> Ni	0.05	0.05	0.05	0.05	0.005	0.02	100	100
<sup>63</sup> Ni	0.05	0.05	0.05	0.05	0.005	0.02	100	100
<sup>237</sup> Np	0.02	0.02	0.02	0.02	0.001	0.000005	30	400
<sup>231</sup> Pa	0.01	0.01	0.01	0.01	0.005	0.000005	10	110
<sup>210</sup> Pb	0.01	0.01	0.01	0.01	0.0008	0.0003	300	100
<sup>210</sup> Po	0.001	0.001	0.001	0.001	0.005	0.00034	100	20000
<sup>238</sup> Pu	0.001	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.000001	30	100
<sup>239</sup> Pu	0.001	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.000001	30	100
<sup>240</sup> Pu	0.001	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.000001	30	100
<sup>241</sup> Pu	0.001	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.000001	30	100
<sup>226</sup> Ra	0.04	0.04	0.04	0.04	0.001	0.001	50	250
<sup>228</sup> Ra	0.04	0.04	0.04	0.04	0.001	0.001	50	250
<sup>151</sup> Sm	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.002	0.00002	25	1000
<sup>90</sup> Sr	0.3	0.3	0.3	0.3	0.008	0.002	60	100
<sup>99</sup> Tc	5	5	5	5	0.0001	0.001	20	5
<sup>228</sup> Th	0.001	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.000005	100	500
<sup>229</sup> Th	0.001	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.000005	100	500
<sup>230</sup> Th	0.001	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.000005	100	500
<sup>232</sup> Th	0.001	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.000005	100	500
<sup>233</sup> U	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.00034	0.0006	10	60
<sup>234</sup> U	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.00034	0.0006	10	60
<sup>235</sup> U	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.00034	0.0006	10	60
<sup>236</sup> U	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.00034	0.0006	10	60
<sup>238</sup> U	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.00034	0.0006	10	60
<sup>93</sup> Zr	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000001	0.0000006	300	6.7

Όσον αφορά την ατμοσφαιρική μεταφορά, οι μεταβλητές που συμβάλλουν στη διασπορά των ραδιονουκλιδίων είναι η ταχύτητα εναπόθεσης αναπνεύσιμων σωματιδίων [m/s] και η ταχύτητα εναπόθεσης όλων των σωματιδίων [m/s].

Και για τις δύο μεταβλητές χρησιμοποιούνται οι default τιμές του λογισμικού.

**ΧΡΟΝΟΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ**

Οι χρόνοι αποθήκευσης (storage times) ορίζονται ως εκείνα τα χρονικά διαστήματα, στα οποία τα τρόφιμα και το νερό αποθηκεύονται προτού καταναλωθούν. Λαμβάνουν συγκεκριμένες τιμές για κάθε είδος τροφίμου ή πηγής νερού όπως φαίνεται στον Πίνακα 4:

**Πίνακας 4:Χρόνοι αποθήκευσης βρώσιμων/πόσιμων συστατικών**

Τρόφιμο/Νερό	Χρόνος αποθήκευσης(ημέρες)
Νερό επιφάνειας (Surface Water)	1
Νερό πηγαδιού (Well Water)	1
Φρούτα, σιτηρά και μη-φυλλώδη λαχανικά (Fruit, grain and non-leafy vegetables)	14
Φυλλώδη λαχανικά (Leafy vegetables)	1
Βοσκοτόπια και φρέσκο χορτάρι (Pasture and silage)	1
Κτηνοτροφία με σιτηρά (Livestock feed grain)	45
Κρέας (Meat)	20
Γάλα (Milk)	1
Ιχθείς (Fish)	7
Καρκινοειδή (Crustacea)	7

**ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ**

Θεωρώντας ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων x-y, μπορούν να οριστούν τα όρια ζωνών που παίζουν ρόλο σχετικά με τα δεδομένα του προβλήματος.

Αρχικά, θεωρείται πως η Ρυπασμένη Ζώνη έχει διαστάσεις (X,Y) = (100m,15m). Οι υπόλοιπες τοποθεσίες και ζώνες, παρατίθενται παρακάτω:

**Πίνακας 5: Διάταξη της εγκατάστασης**

Τοποθεσία	Μήκος(m) <sup>5</sup>	Πλάτος(m) <sup>6</sup>	X εκκίνησης(m) <sup>7</sup>	Y εκκίνησης(m)
Καλλιέργεια φρούτων, σιτηρών και μη-φυλλώδων λαχανικών	150	50	0	0

<sup>5</sup> Το μήκος αναφέρεται στην απόσταση που καλύπτεται στον άξονα X.

<sup>6</sup> Το πλάτος αναφέρεται στην απόσταση που καλύπτεται στον άξονα Y.

<sup>7</sup> Τα X,Y εκκίνησης αναφέρονται στο σημείο εκκίνησης της μέτρησης του μήκους και του πλάτους.

Καλλιέργεια φυλλώδων λαχανικών	150	50	0	0
Βοσκοτόπια και εκτάσεις φρέσκου χορταριού	100	50	0	0
Εκτάσεις με σιτηρά	100	250	0	50
Κατοικία	20	20	0	0

Το πηγάδι τοποθετείται στη θέση με συντεταγμένες ως προς την αρχή των αξόνων που ορίστηκε παραπάνω  $(X,Y) = (50 \text{ m},0)$ , δηλαδή σε απόσταση 50 m από τη ρυπασμένη ζώνη

### ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΖΩΝΩΝ

Στους Πίνακες 6, 7 παρατίθενται τα κύρια χαρακτηριστικά των ζωνών που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς. Τα κύρια υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των ζωνών, όπως έχει αναφερθεί, λήφθηκαν σύμφωνα με τις τιμές που καθορίζονται στο TECDOC 1380. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι λαμβάνονται με τις προεπιλεγμένες στο πρόγραμμα τιμές τους.

**Πίνακας 6: Μεταβλητές Πρωτογενούς Ρύπανσης**

Μεταβλητή PCZ	Τιμή
Επιφάνεια (Εμβαδόν) PCZ	1500 m <sup>2</sup>
Μήκος της ρύπανσης παράλληλο προς τον υδροφόρο ορίζοντα	15 m
Βάθος του στρώματος ανάμειξης	0.15 m
Συγκέντρωση μάζας όλων των σωματιδίων	0.0001 grams/m <sup>3</sup>
Ταχύτητα εναπόθεσης για όλα τα σωματίδια	0.001 m/s
Αναπνεύσιμα σωματίδια ως κλάσμα των συνολικών	1
Ταχύτητα εναπόθεσης των αναπνεύσιμων σωματιδίων	0.001 m/s
Συνολική άρδευση ανά έτος	0.2 m ανά έτος
Συντελεστής εξάτμισης (evapotranspiration coefficient)	0.4
Συντελεστής απορροής (runoff coefficient)	0

Παράγοντας κλίσης (slope-length-steepness factor)	0.3
Παράγοντας κάλυψης και διαχείρισης (cover and management factor)	0.003
Παράγοντας πρακτικής υποστήριξης (Support practice factor)	1
Κλάσμα της πρωτογενούς ρύπανσης που είναι βυθισμένο	0

Πίνακας 7: Μεταβλητές Καλύμματος από χώμα πάνω από την PCZ

Μεταβλητή καλύμματος	Τιμή
Πάχος (Thickness)	1 m
Παράγοντας Διάβρωσης του Εδάφους (Soil Erodibility Factor)	0.4 tons/acre
Ξηρά Πυκνότητα (Dry Bulk Density)	1.5 grams/cm <sup>3</sup>
Ρυθμός Διάβρωσης (Erosion Rate)	8.602E(-06) m/έτος
Συνολικό Πορώδες (Total Porosity)	0.4
Ογκομετρική Περιεκτικότητα σε Νερό (Volumetric Water Content)	0.05

### ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΠΟΡΡΟΗ

Μετά τη διάβρωση που λαμβάνει χώρα στην πρωτογενή ρύπανση, ένα μέρος των υλικών που ακολουθούν αυτή τη διαδικασία απομακρύνονται μέσω της απορροής (Runoff). Μέσω αυτής, μπορεί να γίνει μία πρόβλεψη/ανάλυση της τοποθεσίας εναπόθεσης των υλικών αυτών. Έτσι, έγινε η παρακάτω παραδοχή:

- 1) Κλάσμα διαβρωμένων ραδιονουκλιδίων που εναποτέθηκαν στην κατοικία: 0.2
- 2) Κλάσμα διαβρωμένων ραδιονουκλιδίων που εναποτέθηκαν σε καλλιέργειες μη-φυλλωδών λαχανικών: 0.2
- 3) Κλάσμα διαβρωμένων ραδιονουκλιδίων που εναποτέθηκαν σε καλλιέργειες φυλλωδών λαχανικών: 0.2
- 4) Κλάσμα διαβρωμένων ραδιονουκλιδίων που εναποτέθηκαν σε βοσκή: 0.2
- 5) Κλάσμα διαβρωμένων ραδιονουκλιδίων που εναποτέθηκαν σε καλλιέργειες σιτηρών προς ζωτροφή: 0.2

- 6) Κλάσμα διαβρωμένων ραδιονουκλιδίων που εναποτέθηκαν σε επιφανειακό σώμα νερού: 0

**ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ**

Οι γεωργικές περιοχές (Agricultural Areas) ανάγονται σε χωράφια καλλιεργημένα με φρούτα, σιτηρά και μη-φυλλώδη λαχανικά και σε χωράφια καλλιεργημένα με φυλλώδη λαχανικά. Οι κτηνοτροφικές περιοχές (Livestock Feed Growing Areas) ανάγονται σε βοσκοτόπια και εκτάσεις με φρέσκο χορτάρι και σε εκτάσεις όπου καλλιεργούνται σιτηρά. Τέλος, αναλύεται και η τοποθεσία κατοικίας, η οποία παίζει προφανώς πολύ σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα. Οι σχετικές υπολογιστικές παράμετροι δίνονται στον Πίνακα 8.

**Πίνακας 8: Μεταβλητές Γεωργικών, Κτηνοτροφικών περιοχών και της Κατοικίας**

Μεταβλητή	Τιμή για τα χωράφια καλλιεργημένα με φρούτα, σιτηρά και μη-φυλλώδη λαχανικά	Τιμή για τα χωράφια καλλιεργημένα με φυλλώδη λαχανικά	Τιμή για βοσκοτόπια και εκτάσεις με φρέσκο χορτάρι	Εκτάσεις όπου καλλιεργούνται σιτηρά	Τοποθεσία κατοικίας
<b>Επιφάνεια (Surface)</b>	7500 m <sup>2</sup>	7500 m <sup>2</sup>	5000 m <sup>2</sup>	25000 m <sup>2</sup>	400 m <sup>2</sup>
<b>Κλάσμα των περιοχών ακριβώς πάνω από την πρωτογενή ρύπανση</b>	0.2	0.2	0.3	0	-
<b>Άρδευση ανά χρόνο (Irrigation Applied per Year)</b>	0.2 m ανά έτος	0.2 m ανά έτος	0.2 m ανά έτος	0.2 m ανά έτος	0.2 m ανά έτος
<b>Συντελεστής εξάτμισοδιαπνοής (Evapotranspiration Coefficient)</b>	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
<b>Συντελεστής Απορροής (Runoff Coefficient)</b>	0	0	0	0	0
<b>Βάθος του στρώματος ανάμειξης</b>	0.15 m	0.15 m	0.15 m	0.15 m	0.15 m
<b>Ογκομετρική Περιεκτικότητα σε Νερό (Volumetric Water Content)</b>	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3



Ρυθμός Διάβρωσης (Erosion Rate)	1.147E(-5) m/έτος	1.147E(-5) m/έτος	1.147E(-5) m/έτος	1.147E(-5) m/έτος	0
Ξηρά Πυκνότητα του χώματος (Dry Bulk Density)	1.5 grams/cm <sup>3</sup>	1.5 grams/cm <sup>3</sup>	1.5 grams/cm <sup>3</sup>	1.5 grams/cm <sup>3</sup>	1.5 grams/cm <sup>3</sup>
Παράγοντας διαβρωσιμότητας του σώματος (Soil Erodibility Factor)	0.4 tons/acre	0.4 tons/acre	0.4 tons/acre	0.4 tons/acre	0
Παράγοντας κλίσης (Slope-Length-Steepness Factor)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Παράγοντας κάλυψης και διαχείρισης (Cover and Management Factor)	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Παράγοντας Πρακτικής Υποστήριξης (Support Practice Factor)	1	1	1	1	1
Συνολικό πορώδες (Total Porosity)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Αναλογία Παροχής Ιζημάτων από Πρωτογενή Μόλυνση	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

### ΧΡΗΣΗ ΝΕΡΟΥ

Δεδομένων των οδών έκθεσης και των ραδιονουκλιδίων που λαμβάνονται υπόψη στην προκείμενη μελέτη, η κύρια δίοδος μετάδοσης και διασποράς της ραδιενέργειας από την πρωτογενή ρύπανση προς το ευρύτερο περιβάλλον είναι το νερό. Παρακάτω, δίνονται οι σημαντικότερες μεταβλητές που σχετίζονται με τη χρήση του.

**Πίνακας 9: Μεταβλητές Χρήσης Νερού**

Μεταβλητή	Τιμή
Κατανάλωση ανά άτομο	510 Lt/έτος

Κατανάλωση εντός της κατοικίας ανά άτομο	225 Lt/έτος
Κατανάλωση βοοειδών (ανά ζώο)	50 Lt/έτος
Κατανάλωση αγελάδων γαλακτοπαραγωγής (ανά ζώο)	160 Lt/έτος

Πίνακας 10: Διάβρωση σε τοποθεσίες της εγκατάστασης

Μεταβλητή	Τιμή
Διάβρωση σε καλλιέργειες φρούτων, σιτηρών και μη-φυλλωδών λαχανικών	0.2 m ανά έτος
Διάβρωση σε καλλιέργειες φυλλωδών λαχανικών	0.2 m ανά έτος
Διάβρωση σε βοσκοτόπια και εκτάσεις με φρέσκο χορτάρι	0.2 m ανά έτος
Διάβρωση σε καλλιέργειες σιτηρών ζωοτροφών	0.2 m ανά έτος
Διάβρωση στην τοποθεσία της κατοικίας	0.2 m ανά έτος

Επιπρόσθετα, έχουν γίνει οι εξής υποθέσεις:

- Συμβίωση 4 ατόμων στην κατοικία.
- Η κατοικία αντλεί το νερό της εξ' ολοκλήρου από πηγάδι, ενώ από το επιφανειακό σώμα νερού (surface water body) λαμβάνει μηδενική ποσότητα.
- Ο ρυθμός άντλησης του πηγαδιού (Well Pumping Rate) ισούται με 9565 m<sup>3</sup>/έτος.

#### **ΚΟΡΕΣΜΕΝΗ-ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΖΩΝΗ**

Η ακόρεστη ζώνη (Unsaturated Zone) ορίζεται ως εκείνη η ζώνη ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, η οποία περιέχει νερό και/ή αέρα σε σπές ή πόρους. Οι πόροι αυτοί δεν είναι εξ' ολοκλήρου γεμάτοι.

Η κορεσμένη ζώνη (Saturated Zone) ορίζεται ως εκείνη η ζώνη ακριβώς κάτω από την ακόρεστη, η οποία περιέχει τα ίδια συστατικά με αυτή, ενώ οι πόροι της είναι γεμάτοι. Και για τις δύο ζώνες αυτές, παρέχονται σημαντικές πληροφορίες μέσω μεταβλητών, οι οποίες λήφθηκαν από το TECDOC1380 στην ολότητά τους αποτελούν, μάλιστα, από τους πιο σημαντικούς παράγοντες της εν λόγω μελέτης.

Παρατίθενται πίνακες με τις μεταβλητές αυτές:

**Πίνακας 11: Μεταβλητές Ακόρεστης Ζώνης**

Μεταβλητή	Τιμή
Πάχος (Thickness)	2 m
Ξηρά πυκνότητα (Dry Bulk Density)	2 grams/cm <sup>3</sup>
Ολικό πορώδες (Total Porosity)	0.3
Ειδικό πορώδες (Effective Porosity)	0.3
Χωρητικότητα πεδίου (Field Capacity)	0.3
Υδραυλική Αγωγιμότητα (Hydraulic Conductivity)	315.36 m/έτος
Παράμετρος b	5.3
Διαμήκης Διασπορά (Longitudinal Dispersivity)	0.2 m

**Πίνακας 12: Μεταβλητές Κορεσμένης Ζώνης**

Μεταβλητή	Τιμή
Πάχος (Thickness)	15 m
Ξηρά Πυκνότητα (Dry Bulk Density)	2 grams/cm <sup>3</sup>
Ολικό Πορώδες (Total Porosity)	0.3
Ειδικό Πορώδες (Effective Porosity)	0.3
Υδραυλική Αγωγιμότητα (Hydraulic Conductivity)	315.36 m/έτος

**Πίνακας 13: Υδραυλικές Μεταβλητές της Κορεσμένης Ζώνης**

Μεταβλητή	Τιμή σε σχέση με το πηγάδι	Τιμή σε σχέση με το επιφανειακό σώμα νερού
Υδραυλική Κλίση (Hydraulic Gradient)	0.02	0.02
Βάθος Συμβαλλόμενου Υδροφόρου Ορίζοντα (Depth of Aquifer Contributing)	12 m κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα	5 m κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα
Διαμήκης Διασπορά (Longitudinal Dispersivity)	5 m	10 m
Οριζόντια Πλευρική Διασπορά (Horizontal Lateral Dispersivity)	1 m	1 m
Κατακόρυφη Πλευρική Διασπορά (Vertical Lateral Dispersivity)	1 m	0.06 m

### ΡΥΘΜΟΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ

Οι ρυθμοί κατάποσης (ingestion rates) σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με τις οδούς έκθεσης που έχουν επιλεγεί για την προσομοίωση του συγκεκριμένου σεναρίου, καθώς σχεδόν όλες τους εμπεριέχουν κατάποση/κατανάλωση φαγητού/υγρού. Επίσης, χάριν μιας πιο ρεαλιστικής μελέτης, έγινε η θεώρηση πως τα προϊόντα που καταναλώνονται δεν προέρχονται στο σύνολό τους από τη ραδιορυσπασμένη περιοχή, αλλά μόνο ένα μέρος τους. Οι μεταβλητές αυτές δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 14: Ρυθμοί Κατανάλωσης**

Μεταβλητή	Ρυθμός Κατανάλωσης	Κλάσμα από τη ρυπασμένη περιοχή
Πόσιμο Νερό (Drinking Water)	510 Lt/έτος	1
Ιχθείς (Fish)	5.4 kg/έτος	0.5
Καρκινοειδή και Μαλάκια (Crustacea and Mollusks)	0.9 kg/έτος	0.5
Φρούτα, Σιτηρά και μη-Φυλλώδη Λαχανικά	160 kg/έτος	0.5
Φυλλώδη Λαχανικά	14 kg/έτος	0.5
Κρέας	63 kg/έτος	0.5
Γάλα	92 Lt/έτος	0.5
Χώμα (Ακούσιο)	36.5 grams/έτος	-

### ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΧΛΩΡΙΔΑΣ

Οι μεταβλητές της χλωρίδας σχετίζονται με τα φρούτα και τα λαχανικά που λαμβάνουν μέρος στη μελέτη. Όλες εισήχθησαν ως defaults από το λογισμικό του RESRAD-OFFSITE και, προφανώς, συμβάλλουν σημαντικά στον υπολογισμό της δόσης λόγω της έκθεσης σχετιζόμενης με αυτά. Παρατίθενται παρακάτω:

**Πίνακας 15: Παράγοντες Χλωρίδας**

Μεταβλητή	Τιμή για φρούτα, σιτηρά και μη-φυλλώδη λαχανικά	Τιμή για φυλλώδη λαχανικά
Απόδοση Καλλιεργειών (σε Υγρό Βάρος)	0.7 kg/m <sup>2</sup>	1.5 kg/m <sup>2</sup>
Διάρκεια Καλλιεργητικής Περιόδου	0.17 έτη	0.25 έτη

Συντελεστής Μεταφοράς από το Φύλλωμα προς την Τροφή	0.1	1
Σταθερά Απομάκρυνσης λόγω Καιρικών Συνθηκών	20 ανά έτος	20 ανά έτος
Παράγοντας Αναχαίτισης Φυλλώματος για τη Διάβρωση	0.25	0.25
Παράγοντας Αναχαίτισης Φυλλώματος για τη Σκόνη	0.25	0.25
Βάθος Ριζών	1.2 m	0.9 m

### ΠΡΟΣΛΗΨΕΙΣ ΖΩΩΝ

Οι προσλήψεις των ζώων έχουν να κάνουν με τη διατροφή τους και τις ποσότητες που καταναλώνουν ανά κάποιο χρονικό διάστημα. Ο πίνακας με τις μεταβλητές αυτές δίνεται παρακάτω:

**Πίνακας 16: Καταναλώσεις Ζώων**

Μεταβλητή	Τιμή για βοοειδή	Τιμή για αγελάδες γαλακτοπαραγωγής
Νερό	50 Lt/ημέρα	160 Lt/ημέρα
Βοσκή και φρέσκο χορτάρι	14 kg/ημέρα	44 kg/ημέρα
Σιτηρά	54 kg/ημέρα	11 kg/ημέρα
Χώμα από βοσκή και φρέσκο χορτάρι	0.1 kg/ημέρα	0.4 kg/ημέρα
Χώμα από Σιτηρά	0.4 kg/ημέρα	0.1 kg/ημέρα

Εκτός αυτού, υφίστανται παράγοντες που αφορούν την κτηνοτροφία, όπως και την χλωρίδα παραπάνω. Σε αντιστοιχία, προκύπτει ο πίνακας:

**Πίνακας 17: Παράγοντες Προσλήψεων Ζώων**

Μεταβλητή	Τιμή για βοσκή και φρέσκο χορτάρι	Τιμή για σιτηρά
Απόδοση Καλλιεργειών (σε Υγρό Βάρος)	1.1 kg/m <sup>2</sup>	0.7 kg/m <sup>2</sup>
Διάρκεια Καλλιεργητικής Περιόδου	0.08 έτη	0.17 έτη

Συντελεστής Μεταφοράς από το Φύλλωμα προς την Τροφή	1	0.1
Σταθερά Απομάκρυνσης λόγω Καιρικών Συνθηκών	20 ανά έτος	20 ανά έτος
Παράγοντας Αναχαίτισης Φυλλώματος για τη Διάβρωση	0.25	0.25
Παράγοντας Αναχαίτισης Φυλλώματος για τη Σκόνη	0.25	0.25
Βάθος Ριζών	0.9 m	1.2 m

### ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Προφανώς, η ανθρώπινη συμπεριφορά των κατοίκων που υπάρχουν στο σενάριο προσομοίωσης που περιγράφεται μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την τελική έκβαση των αποτελεσμάτων (ουσιαστικά τη δόση που θα λάβει το άτομο). Σημαντική παράμετρος είναι το κλάσμα του χρόνου που περνά το άτομο σε διάφορα τμήματα της εγκατάστασης, ρυπασμένα ή μη. Στον Πίνακα 18 δίνεται μία εικόνα της συμπεριφοράς του ατόμου στο συγκεκριμένο σενάριο, αναφορικά με τον χρόνο που περνά σε διάφορα μέρη της εγκατάστασης.

**Πίνακας 18: Κλάσματα Χρόνου Ανθρώπινης Συμπεριφοράς**

Τοποθεσία	Κλάσμα Χρόνου
Κατοικία (Εντός κτηρίου)	0.4
Κατοικία (Σε εξωτερικό χώρο)	0.2
Χωράφια φρούτων, σιτηρών και μη-φυλλωδών λαχανικών	0.1
Χωράφια φυλλωδών λαχανικών	0.1
Βοσκοτόπια και εκτάσεις φρέσκου χορταριού	0.1
Χωράφια κτηνοτροφικών σιτηρών	0.1

### **3.2 Ανάλυση Αβεβαιότητας(Uncertainty/Probabilistic Analysis)**

Η ανάλυση αβεβαιότητας περιλαμβάνει σειρά διαδοχικών υπολογισμών με διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων. Οι παράμετροι επιλέγονται τυχαία από διάστημα το οποίο καθορίζεται για όποιες από αυτές συμμετέχουν ως παράμετροι

αβεβαιότητας. Οι υπόλοιπες μεταβλητές διατηρούν τις σταθερές τιμές που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.1.

Αρχικά, στο συγκεκριμένο σενάριο λαμβάνουν χώρα 27 προσομοιώσεις, μία για κάθε νουκλίδιο. Οι μεταβλητές αβεβαιότητας θεωρούνται ότι ακολουθούν στατιστικές κατανομές, επιλέγοντας από τις διαθέσιμες κατανομές του προγράμματος. Η κατανομή προς δειγματοληψία χωρίζεται σε έναν αριθμό εξίσου πιθανών τμημάτων κατανομής, με τον αριθμό να είναι ίσος με τον επιθυμητό αριθμό παρατηρήσεων. Στη συνέχεια, επιλέγεται τυχαία ένα δείγμα από κάθε τέτοιο τμήμα, διασφαλίζοντας ότι τα δείγματα καλύπτουν όλο το εύρος της κατανομής.

Ο αριθμός παρατηρήσεων είναι ουσιαστικά το πλήθος των τιμών δείγματος που πρόκειται να δημιουργηθούν μέσω του λογισμικού για κάθε μεταβλητή εισόδου. Επίσης, είναι θεμιτή η επανάληψη της ανάλυσης πάνω από μία φορά, ώστε να να εκτιμηθεί η επάρκεια των τμημάτων. Εδώ, ο αριθμός παρατηρήσεων είναι 100 για καθεμία από τις 3 επαναλήψεις.

Οι μεταβλητές που εισάγονται στην ανάλυση αβεβαιότητας για την εκάστοτε προσομοίωση δίνονται στον πίνακα 19.

**Πίνακας 19: Στατιστικά στοιχεία των μεταβλητών στην Ανάλυση Αβεβαιότητας**

	Κατανομή	Μέση τιμή (Μu)	Τυπική απόκλιση (σ)	Χαμηλό όριο	Υψηλό όριο
<b>K<sub>d</sub> στην Ακόρεστη Ζώνη</b>	Truncated Lognormal-N	8.17	1.7	0.001	0.999
<b>K<sub>d</sub> στην Κορεσμένη Ζώνη</b>	Truncated Lognormal-N	8.17	1.7	0.001	0.999
<b>Υδραυλική αγωγιμότητα της Ακόρεστης Ζώνης</b>	Bounded Lognormal-N	2.3	2.11	0.004	9250
<b>Υδραυλική αγωγιμότητα της Κορεσμένης Ζώνης</b>	Bounded Lognormal-N	2.3	2.11	0.004	9250
<b>Ολικό πορώδες της Ακόρεστης Ζώνης</b>	Truncated Normal	0.425	0.0867	0.001	0.999

<b>Ολικό πορώδες της Κορεσμένης Ζώνης</b>	Truncated Normal	0.425	0.0867	0.001	0.999
<b>Ενεργό πορώδες της Ακόρεστης Ζώνης</b>	Truncated Normal	0.355	0.0906	0.001	0.999
<b>Ενεργό πορώδες της Κορεσμένης Ζώνης</b>	Truncated Normal	0.355	0.0906	0.001	0.999

Τα στατιστικά στοιχεία που απαιτούνται για την πλήρη περιγραφή των κατανομών των μεταβλητών αυτών (μέση τιμή, απόκλιση, ανώτατο-κατώτατο ποσοστό) λήφθηκαν από πίνακες της δημοσίευσης NUREG/CR-7267, η οποία έγινε επίσης από την U.S.NRC (NUREG/CR-7267-Default Parameter Values and Distribution in RESRAD-ONSITE V7.2, RESRAD-BUILD V3.5, and RESRAD-OFFSITE V4.0 Computer Codes).

Οι διάφορες παράμετροι μπορεί να σχετίζονται μεταξύ τους. Για παράδειγμα το ολικό πορώδες σχετίζεται με το ενεργό πορώδες, καθώς όσο μεγαλύτερο είναι το ένα τόσο μεγαλύτερο είναι και το άλλο. Η εξάρτηση αυτή λαμβάνεται υπόψη μέσω κατάλληλων συντελεστών συσχέτισης (U.S.NRC/NUREG/CR-7267). Οι παράμετροι που αλληλεξαρτώνται στους παρόντες υπολογισμούς δίνονται στον Πίνακα 20. Όλες οι συσχετίσεις στον Πίνακα 20 είναι θετικές, δηλαδή, θεωρείται ότι όταν αυξάνει η μία μεταβλητή αυξάνει και η σχετιζόμενη με αυτή.

**Πίνακας 20: Συσχετίσεις Μεταβλητών**

Kd στην Ακόρεστη Ζώνη	Kd στην Κορεσμένη Ζώνη
Ενεργό Πορώδες της Κορεσμένης Ζώνης	Ενεργό Πορώδες της Ακόρεστης Ζώνης
Ενεργό Πορώδες της Κορεσμένης Ζώνης	Ολικό Πορώδες της Κορεσμένης Ζώνης
Ενεργό Πορώδες της Κορεσμένης Ζώνης	Ολικό Πορώδες της Ακόρεστης Ζώνης
Ενεργό Πορώδες της Ακόρεστης Ζώνης	Ολικό Πορώδες της Κορεσμένης Ζώνης
Ενεργό Πορώδες της Ακόρεστης Ζώνης	Ολικό Πορώδες της Ακόρεστης Ζώνης
Ολικό Πορώδες της Ακόρεστης Ζώνης	Ολικό Πορώδες της Κορεσμένης Ζώνης
Υδραυλική Αγωγιμότητα της Ακόρεστης Ζώνης	Υδραυλική Αγωγιμότητα της Κορεσμένης Ζώνης

Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των δειγμάτων τόσο καλύτερη είναι η στατιστική αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Λόγω των περιορισμών χρόνου στο πλαίσιο της



διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε ως αποδεκτός συμβιβασμός το πλήθος των 100 δειγμάτων, το οποίο θεωρείται ότι εξασφαλίζει ικανοποιητική αξιοπιστία και συγχρόνως κάνει πρακτικά διαχειρίσιμο το υπολογιστικό κόστος της ανάλυσης αβεβαιότητας.

## 4. Αποτελέσματα

Κατόπιν των προσομοιώσεων που έγιναν, παράχθηκαν κάποια αποτελέσματα, τα οποία ερμηνεύονται και αναλύονται παρακάτω. για την ντετερμινιστική ανάλυση και την ανάλυση αβεβαιότητας.

### 4.1 Ντετερμινιστική Ανάλυση

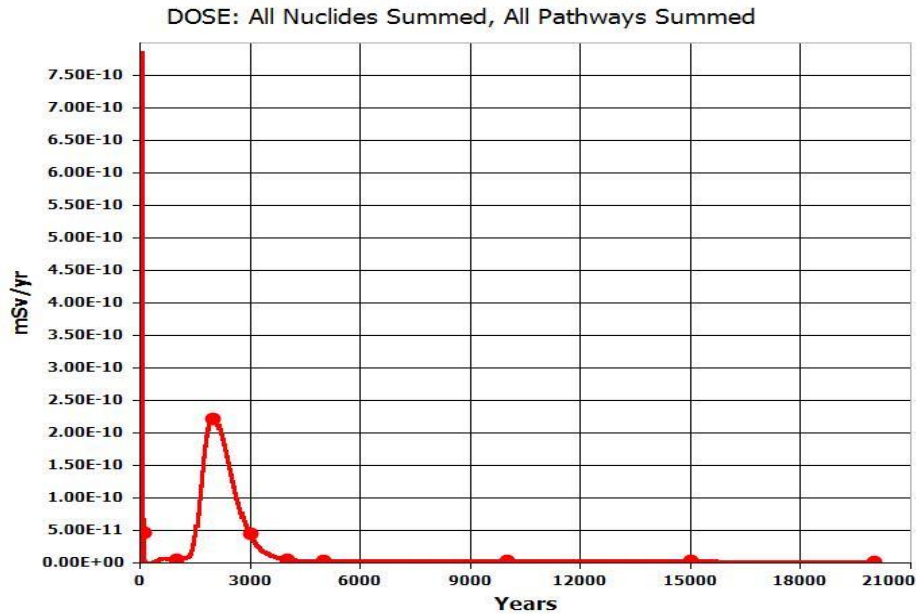
---

Στο μοντέλο της ντετερμινιστικής ανάλυσης, έλαβε χώρα μία προσομοίωση με τη χρήση του λογισμικού RESRAD, η οποία περιείχε όλες τις μεταβλητές που αναφέρθηκαν άνωθεν και αφορούσε μια εγκατάσταση διάθεσης για όλα τα ραδιονουκλίδια της λίστας (Πίνακας 1).

Στο **Γράφημα 1** παρουσιάζεται η ετήσια δόση ως συνάρτηση του χρόνου για την περίπτωση της ντετερμινιστικής προσομοίωσης. Παρατηρώντας το Γράφημα 1, μπορεί κανείς να εντοπίσει τη μέγιστη δόση, η οποία ισούται με κάτι περισσότερο από  $7.5E-10$  mSv/έτος και ανιχνεύεται σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα κατόπιν της χρονικής στιγμής του σφραγίσματος της εγκατάστασης. Υπενθυμίζεται ότι η αρχική ενεργότητα δεν αντιπροσωπεύει κάποιο πραγματικό απόθεμα, αλλά έχει ληφθεί ίση με 1 Bq για όλα τα νουκλίδια. Ως εκ τούτου, η δόση είναι πολύ μικρή ως απόλυτη τιμή.

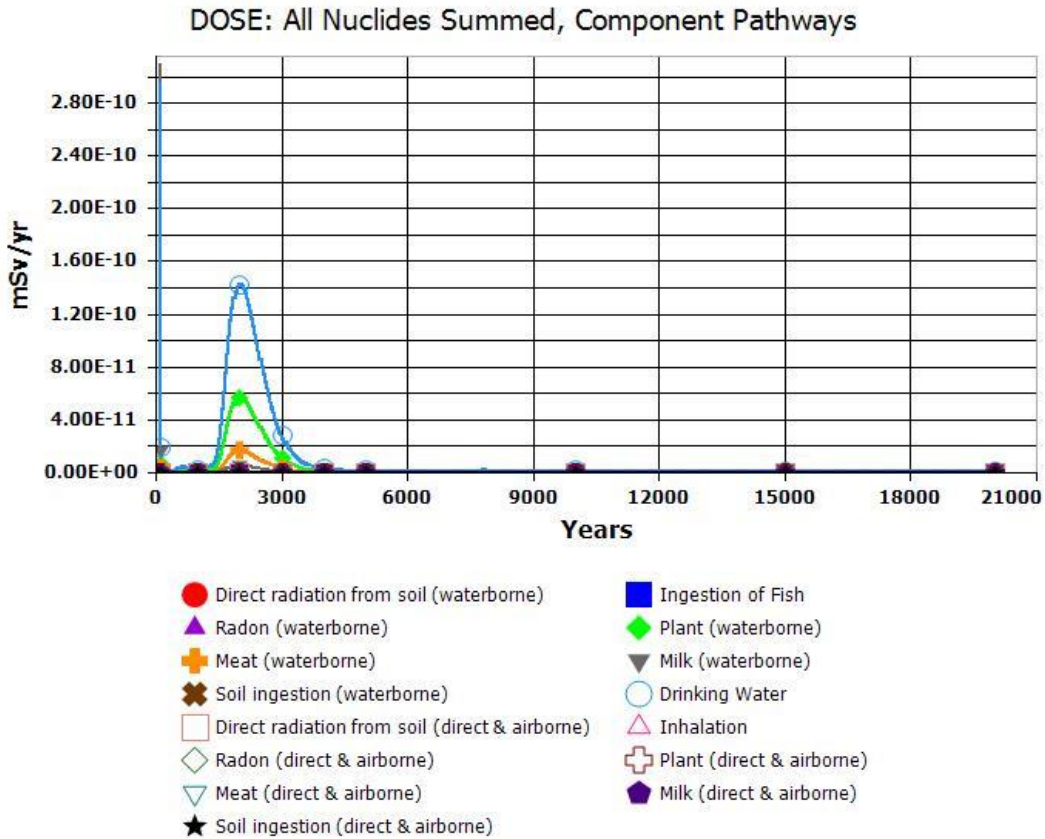
Δεν πρέπει να παραληφθεί η αναφορά στη θεσμική περίοδο (institutional period), η οποία εδώ ισούται με 100 έτη και στο τέλος της βρίσκεται η χρονική στιγμή μηδέν για το εν λόγω σενάριο. Επίσης, η δόση σχεδόν μηδενίζεται μετά από έναν αριθμό ετών, κι αυτό λόγω

του πέρατος μεγάλου αριθμού χρόνων ημιζωής για κάθε νουκλίδιο που έχει διατεθεί, συνεπώς και μείωση, σε σημαντικό βαθμό, της ραδιενέργειας που δύναται να εκπεμφθεί.



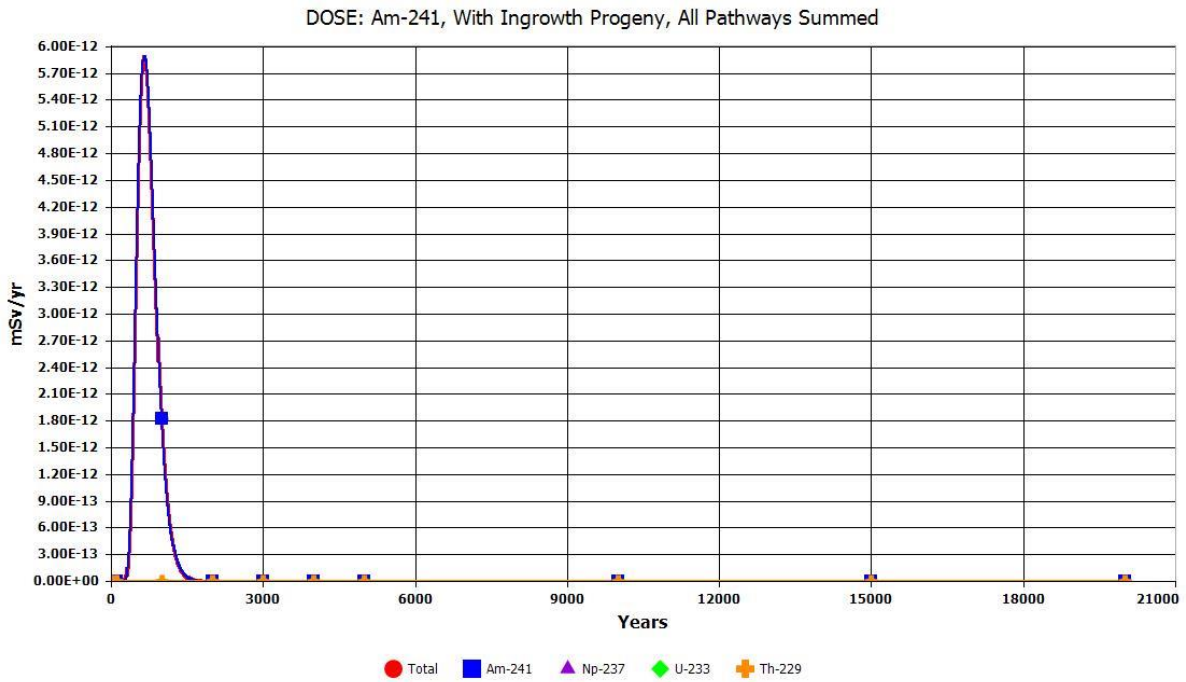
**Γράφημα 1: Συνολική δόση για όλα τα νουκλίδια συναρτήσει του χρόνου από το κλείσιμο της εγκατάστασης.**

Από το **Γράφημα 2**, που περιλαμβάνει και τις διάφορες οδούς έκθεσης, φαίνεται ότι οι οδοί έκθεσης που σχετίζονται με το πόσιμο νερό κατά κύριο λόγο ευθύνονται για την έκθεση των ατόμων. Τόσο στα πρώτα έτη μετά το σφράγισμα, όσο και αργότερα(περί τα 2000 έτη), αυτό είναι που δίνει τη μεγαλύτερη εξατομικευμένη δόση σύμφωνα με το γράφημα.

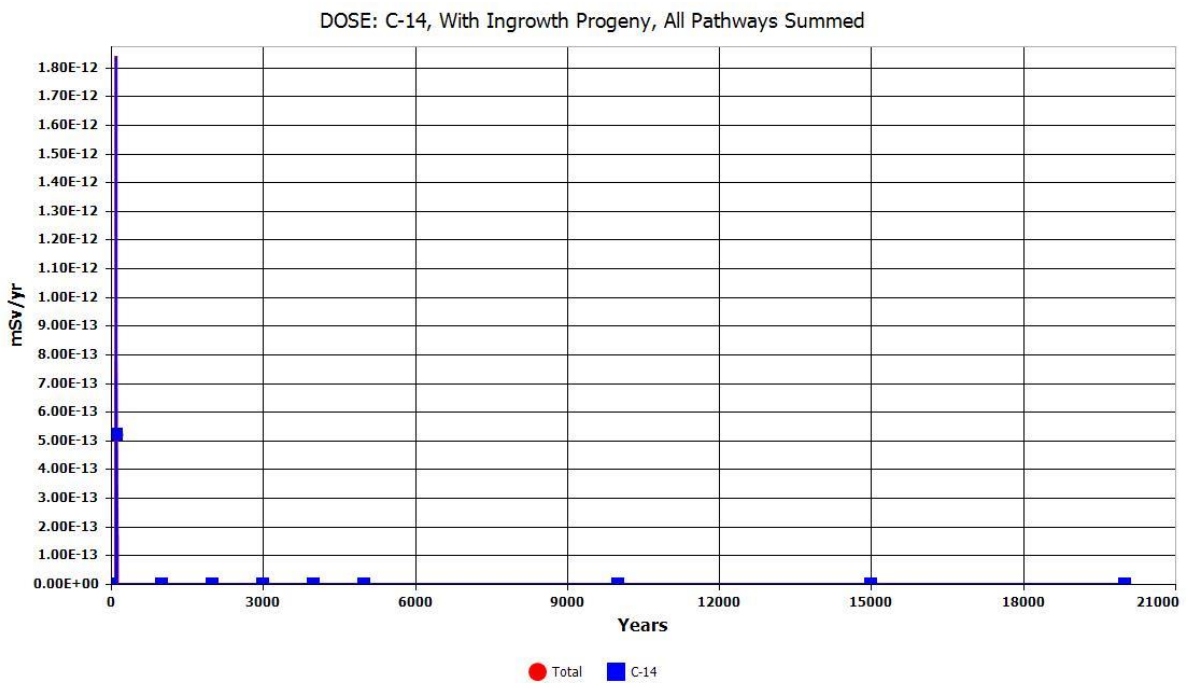


**Γράφημα 2: Συνολική δόση για όλα τα νουκλίδια με διακεκριμένες τιμές για κάθε οδό έκθεσης συναρτήσει του χρόνου από το κλείσιμο της εγκατάστασης.**

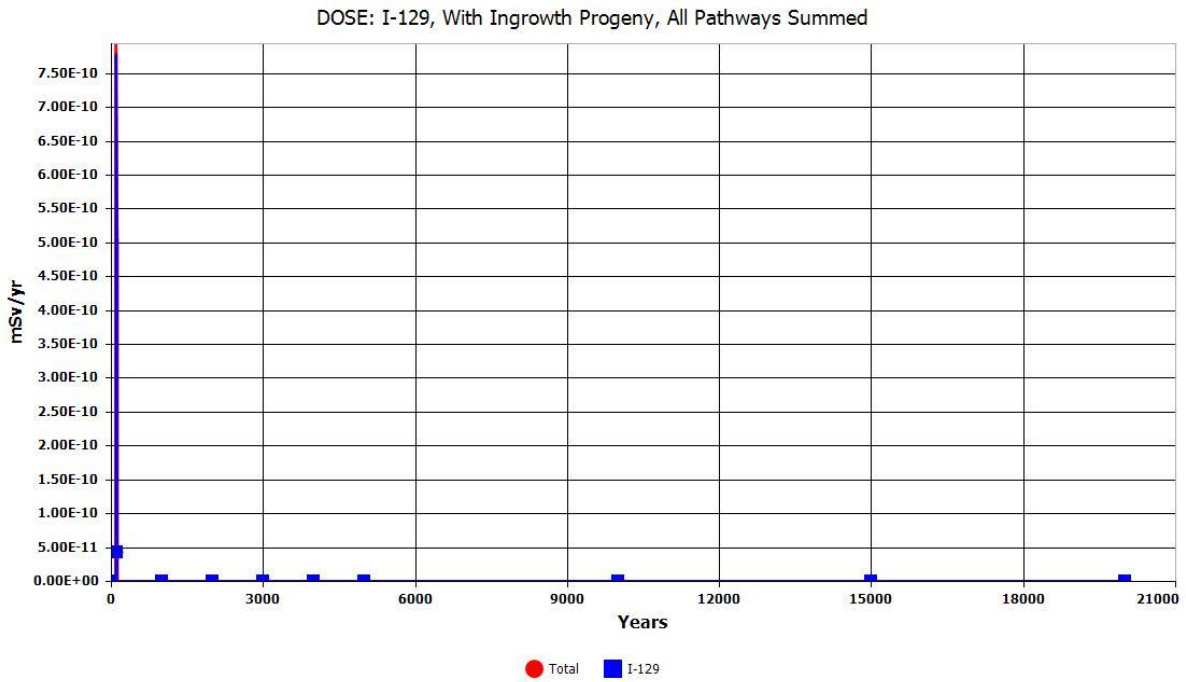
Παρακάτω, παρατίθενται γραφήματα για τα βασικά νουκλίδια που παίζουν ρόλο στη διαμόρφωση της τελικής δόσης.



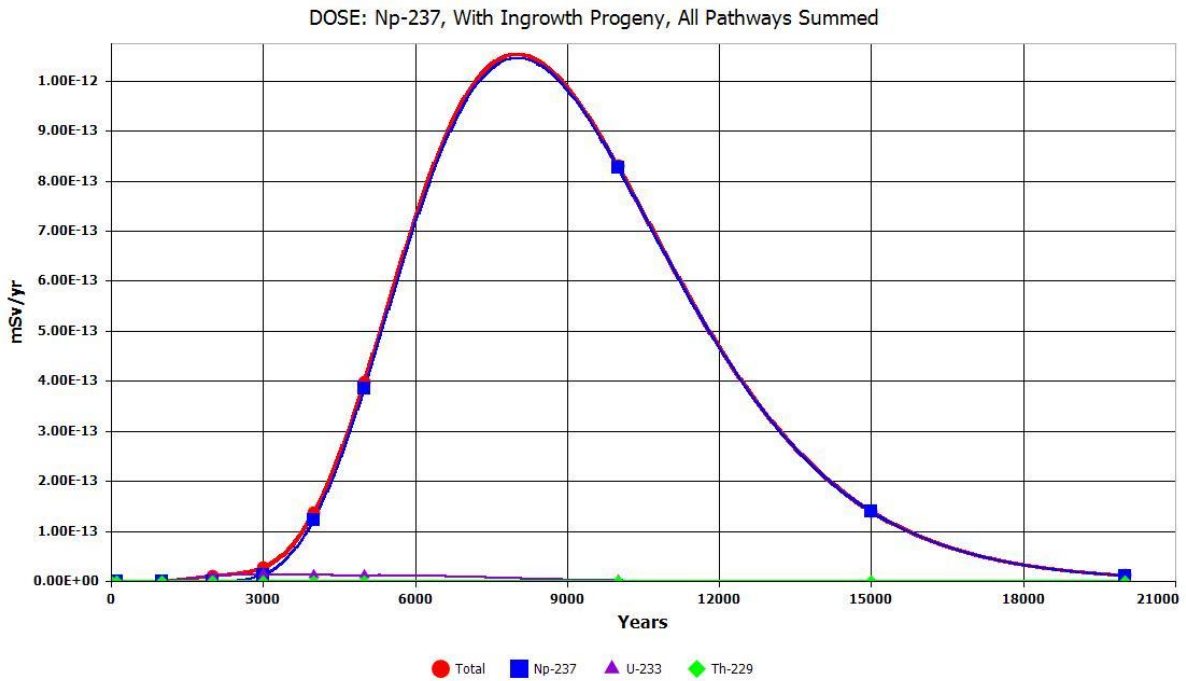
**Γράφημα 3: Συμμετοχή του Am-241 και των θυγατρικών του στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου**



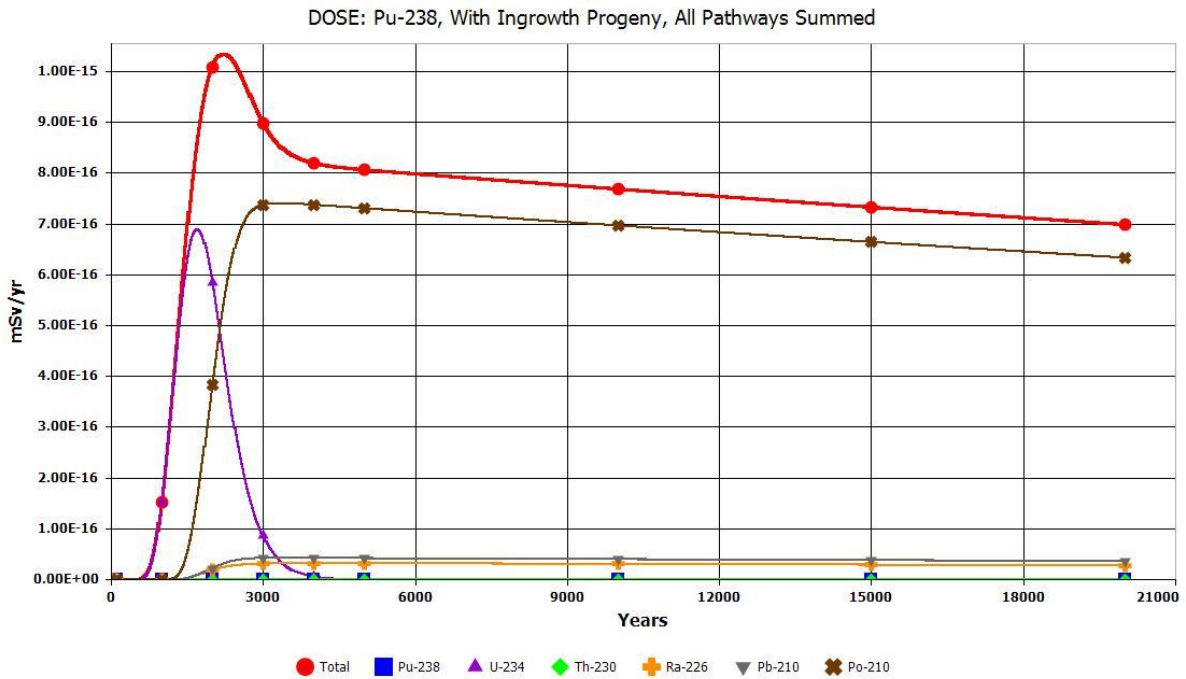
**Γράφημα 4: Συμμετοχή του C-14 στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου**



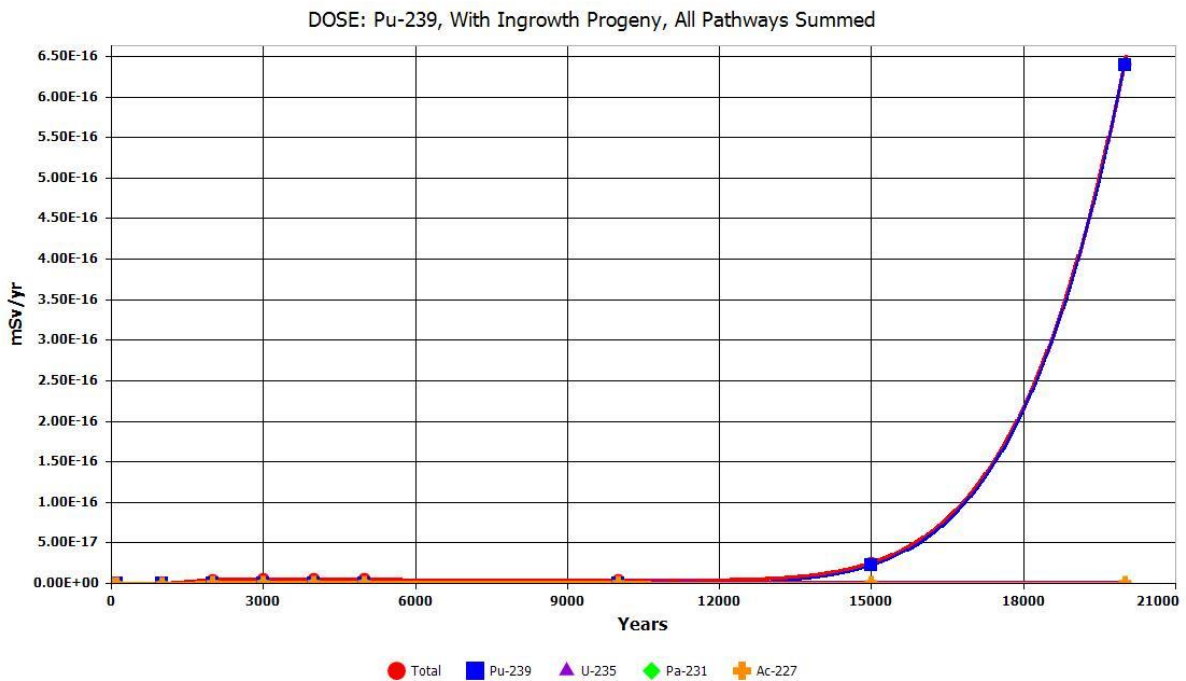
Γράφημα 5: Συμμετοχή του I-129 στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου



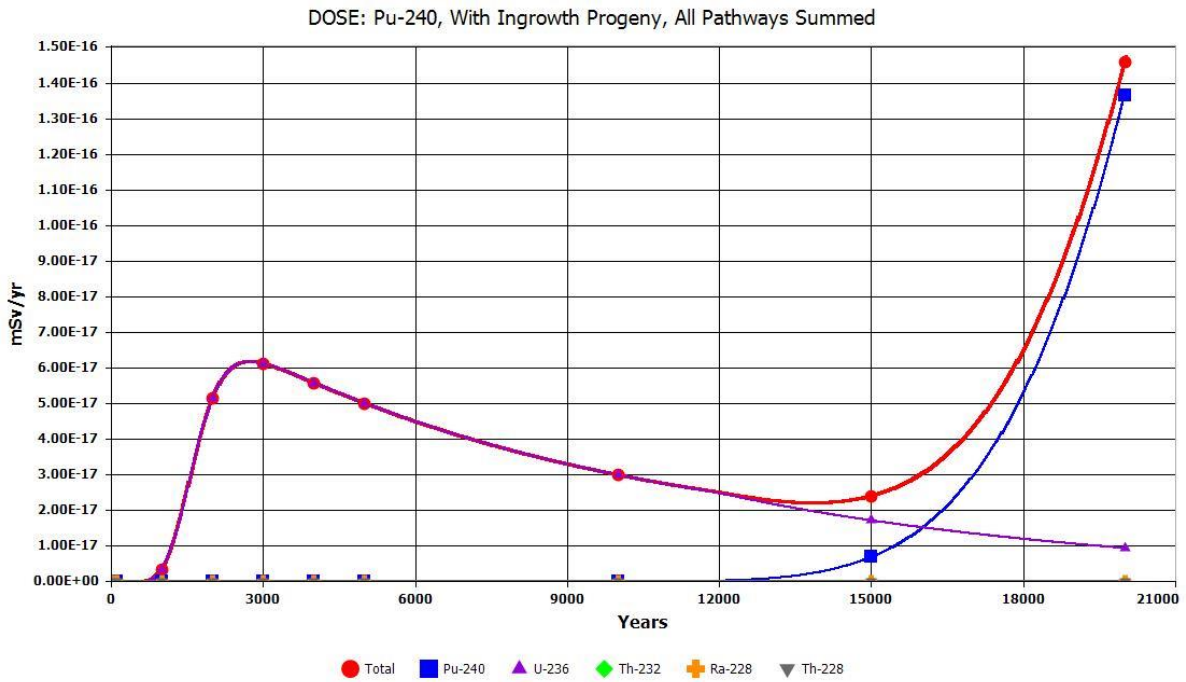
Γράφημα 6: Συμμετοχή του Np-237 και των θυγατρικών του στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου



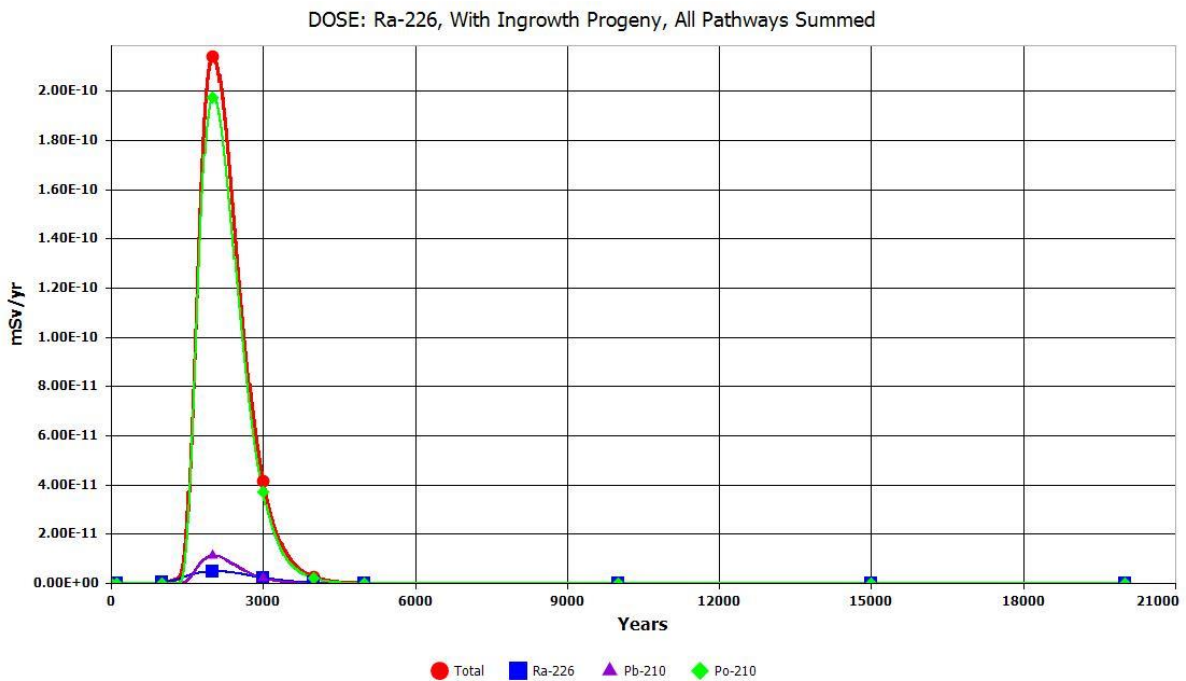
Γράφημα 7: Συμμετοχή του Pu-238 και των θυγατρικών του στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου



Γράφημα 8: Συμμετοχή του Pu-239 και των θυγατρικών του στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου

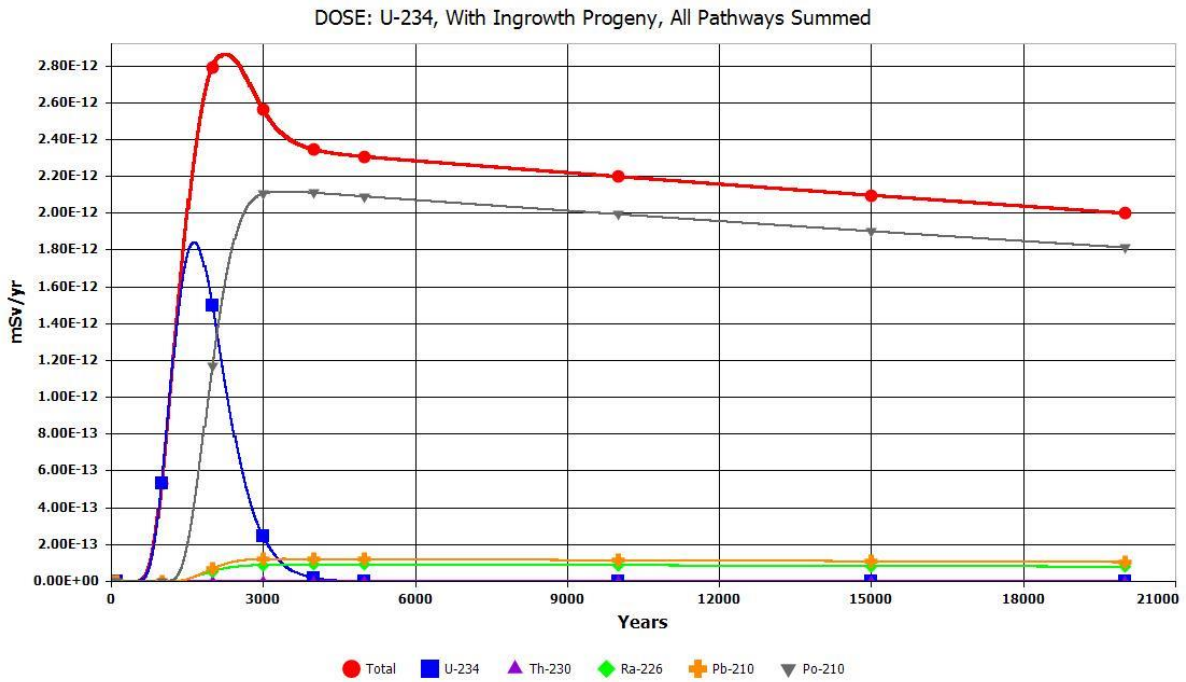


**Γράφημα 9: Συμμετοχή του Pu-240 και των θυγατρικών του στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου**

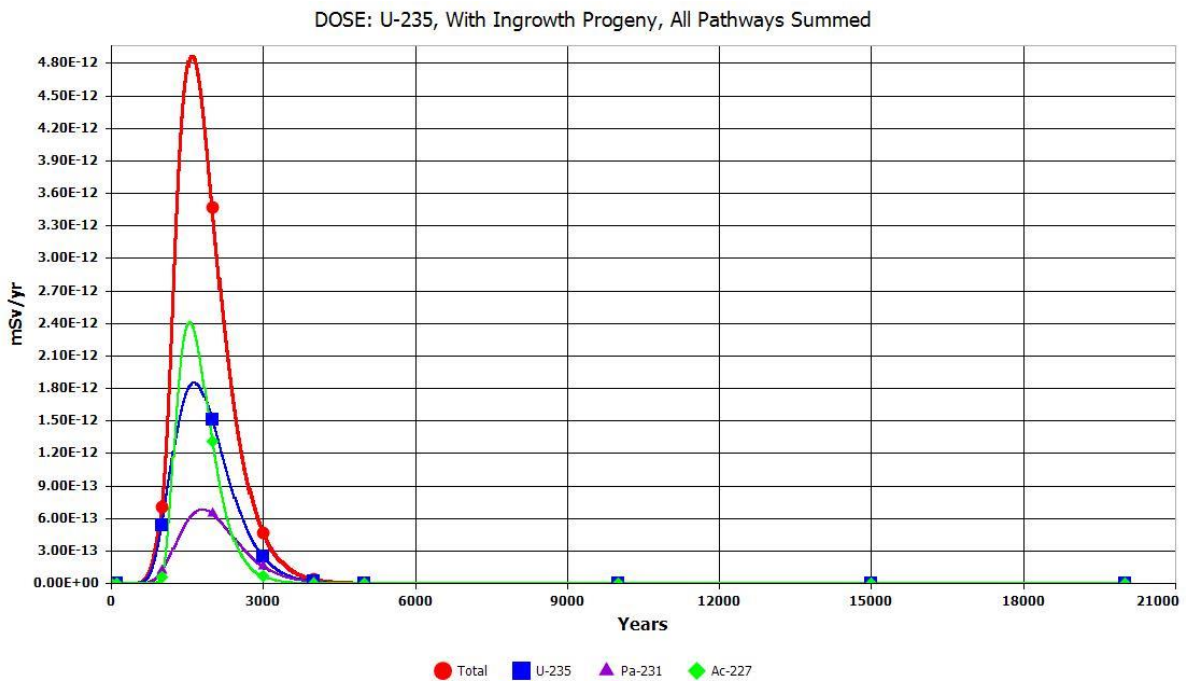


**Γράφημα 10: Συμμετοχή του Ra-226 και των θυγατρικών του στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου**

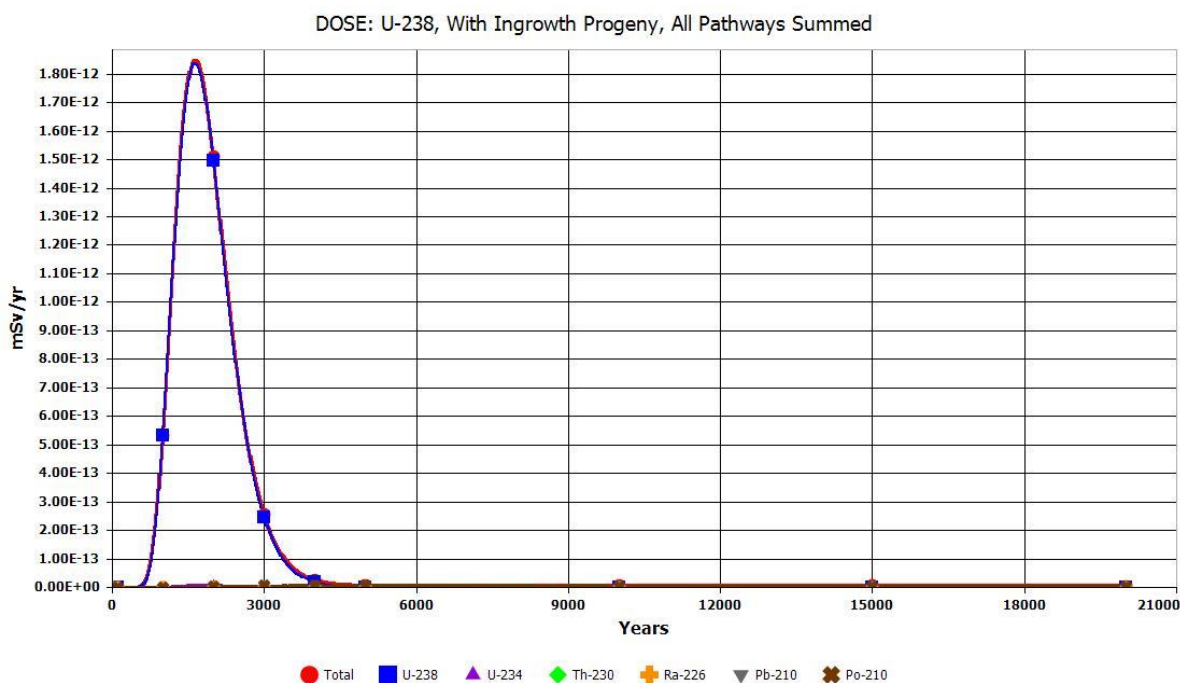




Γράφημα 11: Συμμετοχή του U-234 και των θυγατρικών του στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου



Γράφημα 12: Συμμετοχή του U-235 και των θυγατρικών του στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου



**Γράφημα 13: Συμμετοχή του U-238 και των θυγατρικών του στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου**

Μπορούν να γίνουν κάποιες παρατηρήσεις σχετικά με τη μορφή που έχει το γράφημα για κάθε νουκλίδιο.

Η συμμετοχή των περισσότερων νουκλιδίων στην τελική δόση περιγράφεται με ένα γράφημα μίας κορυφής, μετά την οποία παρατηρείται μείωση της δόσης με τον χρόνο (π.χ. Γραφήματα 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13).

Υπάρχει και το παράδειγμα του Γραφήματος 9, όπου μετά την πρώτη κορυφή εμφανίζεται αύξηση στη δόση. Σε μεγαλύτερο εύρος χρόνου (πέραν αυτού του γραφήματος), αναμένεται να εμφανιστεί και δεύτερη κορυφή, η οποία ακολουθείται επίσης από πτώση της δόσης.

Επίσης, συναντάται και η περίπτωση του Γραφήματος 8, όπου μετά από ένα σεβαστό χρονικό διάστημα μερικών χιλιάδων ετών εμφανίζεται η δόση και η καμπύλη της τείνει προς το να κάνει κορυφή.

Στο Γράφημα 1 (της συνολικής δόσης) παρατηρείται η μορφή δύο κορυφών. Η πρώτη κορυφή αντιστοιχεί στα ραδιονουκλίδια με μεγάλη κινητικότητα μέσα στους πόρους, δηλαδή εκείνα που εμφανίζουν χαμηλή τιμή της σταθεράς  $K_d$ . Η δεύτερη κορυφή αντιστοιχεί στα ραδιονουκλίδια με μεγαλύτερη τιμή της  $K_d$ , τα οποία έχουν μία παραπάνω καθυστέρηση στη συμμετοχή της στην συνολική δόση, εξ' ου και η μεταγενέστερη κορυφή της δόσης. Λόγω του χαμηλότερου ύψους της, μπορούμε να συμπεράνουμε πως στη δεύτερη κατηγορία είτε ανήκει χαμηλός αριθμός ραδιονουκλιδίων, είτε εκείνα που ανήκουν δεν έχουν τη δυνατότητα να δώσουν μεγάλη δόση.

Παρακάτω παρατίθεται μία σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της εργασίας και εκείνων του TECDOC1380 της ΙΑΕΑ.

**Πίνακας 21: Σύγκριση αποτελεσμάτων Ντετερμινιστικής Ανάλυσης και TECDOC1380**

Ραδιονουκλίδιο	Αποτελέσματα εργασίας(Bq/g)	Αποτελέσματα TECDOC1380(Bq/g)	Λόγος Αποτελεσμάτων (ΙΑΕΑ/Παρούσα)
<sup>241</sup> Am	7.942E+10	7E+14	8.82E+03
<sup>14</sup> C	1.672E+11	9E+11	5.382
<sup>41</sup> Ca	3.367E+13	2E+12	5.94E-02
<sup>60</sup> Co	1.494E+15	1E+20	6.69E+04
<sup>134</sup> Cs	2.232E+17	1E+20	448
<sup>137</sup> Cs	3.154E+16	1E+20	3.170E+03
<sup>55</sup> Fe	8.474E+30	1E+20	1.18E-11
<sup>3</sup> H	7.518E+17	7E+11	9.31E-07
<sup>129</sup> I	2.875E+10	4E+08	1.396E-02
<sup>94</sup> Nb	2.232E+13	4E+12	0.1792
<sup>59</sup> Ni	2.538E+15	3E+14	0.1182
<sup>63</sup> Ni	1.706E+37	1E+20	5.86E-18
<sup>237</sup> Np	6.329E+11	1E+11	0.158
<sup>238</sup> Pu	5.181E+14	4E+13	7.72E-02
<sup>239</sup> Pu	9.803E+14	1E+11	1.02E-04
<sup>240</sup> Pu	4.149E+15	3E+11	7.23E-05
<sup>241</sup> Pu	2.688E+12	2E+16	7.440E+03
<sup>226</sup> Ra	2.923E+09	1E+12	342
<sup>228</sup> Ra	3.623E+14	1E+20	2.76E+05
<sup>151</sup> Sm	4.484E+36	1E+20	2.23E-17
<sup>90</sup> Sr	6.097E+17	8E+13	1.312E-04
<sup>99</sup> Tc	5.263E+13	2E+10	3.8E-04
<sup>232</sup> Th	1.436E+14	3E+10	2.088E-04
<sup>234</sup> U	2.212E+11	2E+10	9.04E-02
<sup>235</sup> U	1.300E+11	2E+10	0.1538
<sup>238</sup> U	3.436E+11	2E+11	0.582
<sup>93</sup> Zr	2.347E+12	2E+12	0.852

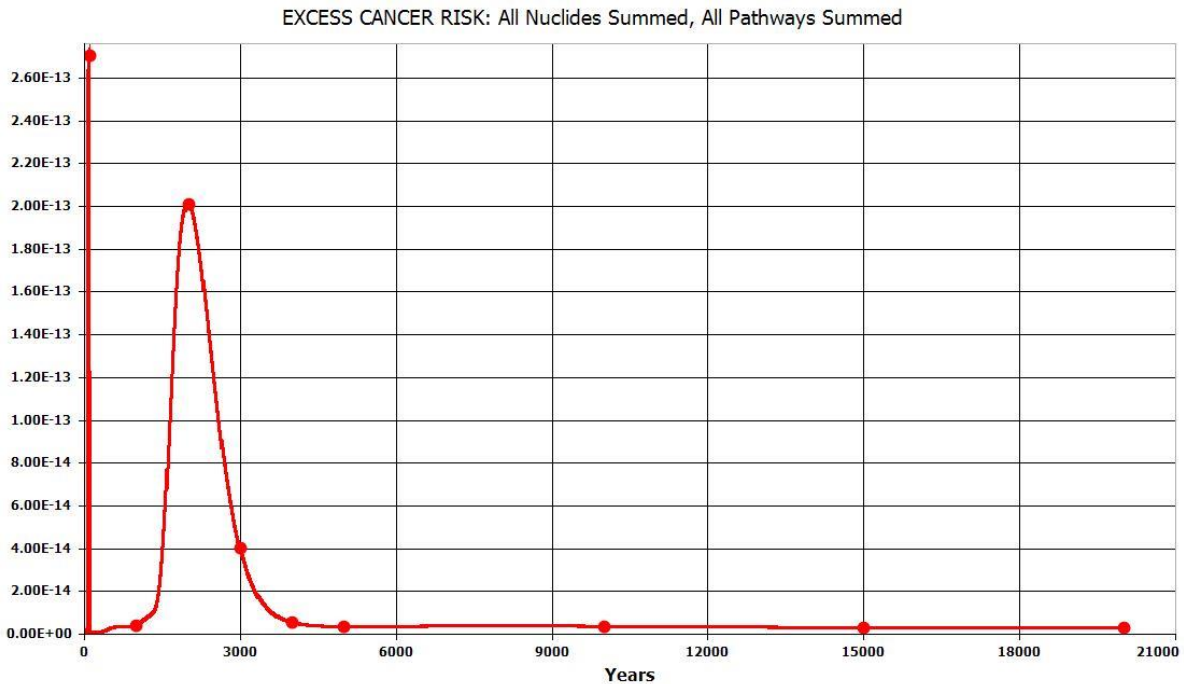
Μέσω των αποτελεσμάτων, μπορεί κανείς να σχηματίσει μία εικόνα της εγκατάστασης που ανταποκρίνεται σε ικανοποιητικό βαθμό στην πραγματικότητα. Η ραδιενέργεια, στην οποία εκτίθενται περίοικοι στην ευρύτερη περιοχή, τόσο για την θεσμική περίοδο διάρκειας 100 ετών, όσο και για μεταγενέστερες περιόδους, είναι πολύ χαμηλή. Σε σύγκριση με τη μέση ετήσια δόση που δέχεται ένα άτομο σήμερα (2mSv), τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι πολύ μικρότερα. Το γεγονός αυτό οφείλεται μεν στη χαμηλή ενεργότητα που διατέθηκε από κάθε νουκλίδιο, αλλά δεν πρέπει να παραβλέψει κανείς και την αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης μεθόδου διαχείρισης των αποβλήτων.

Στην προσομοίωση που έγινε, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα ασφαλούς εκτίμησης του κινδύνου που διατρέχουν οι κάτοικοι της περιοχής, αξιοποιήθηκε η λογική ενός δυσμενούς σεναρίου. Δηλαδή, οι υπολογισμοί αφορούν άτομα που κατοικούν πολύ κοντά στην τοποθεσία της εγκατάστασης διάθεσης, άρα και άτομα που θα λάβουν μεγαλύτερη δόση από εκείνους που κατοικούν πιο μακριά.

Επίσης, μπορεί να γίνει μία διαπίστωση αναφορικά με τις οδούς έκθεσης. Εδώ, λήφθηκαν υπόψη οδοί όπως η κατάποση κρέατος, γάλακτος και φυτικών προϊόντων, η εισπνοή σωματιδίων μέσω του ραδιενεργού πλουμίου που κυκλοφορεί στην ατμόσφαιρα, η άμεση έκθεση λόγω του ραδιορυσασμένου εδάφους πάνω και δίπλα από την εγκατάσταση κ.α.. Ωστόσο, το μεγαλύτερο μέρος της δόσης που δέχεται κάθε άτομο ανάγεται στο πόσιμο νερό, όπως φαίνεται και στο Γράφημα 2. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη βάση σχεδιασμού του εν λόγω σεναρίου, καθώς λαμβάνει χώρα το φαινόμενο του leaching (έκπλυση). Κατά τη χρήση του πηγαδιού για την πρόσληψη πόσιμου νερού, η πρόσληψη δόσης από αυτό είναι προφανής. Από εκεί και πέρα, σε σειρά “ευθύνης”, ακολουθούν οι καταπόσεις λαχανικών και κρέατος, κι αυτές κυρίως λόγω του νερού που βρίσκεται αποθηκευμένο στο εσωτερικό τους. Οι υπόλοιπες οδοί παίζουν σχεδόν μηδαμινό ρόλο στην τελική διαμόρφωση των αποτελεσμάτων.

Εκτός αυτού, η έκθεση ενός ατόμου σε ραδιενέργεια μπορεί να οδηγήσει πολλές φορές σε ανάπτυξη καρκίνου.

Το Γράφημα 14 δείχνει τον κίνδυνο ανάπτυξης καρκίνου για ένα άτομο που δέχεται δόση από την εγκατάσταση. Τα αποτελέσματα αυτά, υπενθυμίζεται, αφορούν εκτιμήσεις ανά μοναδιαία αρχική ενεργότητα διάθεσης.



**Γράφημα 14: Κίνδυνος ανάπτυξης καρκίνου για άτομο που λαμβάνει δόση από την εγκατάσταση συναρτήσει του χρόνου έκθεσης**

Εν γένει, η μέση πιθανότητα ανάπτυξης καρκίνου για ένα άτομο κατά τη διάρκεια της ζωής του κυμαίνεται μεταξύ  $10^{-5}$  και  $10^{-6}$ , σε ένα σενάριο μη-επαγγελματικής έκθεσης, όπου η τιμή της πιθανότητας είναι πολυπαραγοντική. Σύμφωνα με το Γράφημα 14, η πιθανότητα ανάπτυξης καρκίνου για τα άτομα που συμμετέχουν στη συγκεκριμένη προσομοίωση ανέρχεται σε τάξη μεγέθους  $10^{-13}$ , γεγονός που συνδέεται άμεσα και με τη μικρή τιμή της δόσης που υπολογίστηκε προηγουμένως. Συγκριτικά με τη μέση πιθανότητα, η τιμή αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για μια πρόχειρη εκτίμηση των επιπτώσεων με βάση κάποιο πραγματικό απόθεμα.

## 4.2 Αποτελέσματα της Ανάλυσης Αβεβαιότητας(Uncertainty/Probabilistic Analysis Results)

Στην Ανάλυση Αβεβαιότητας, εντοπίζονται σημαντικές διαφορές συγκριτικά με την Ντετερμινιστική.

Στο σενάριο της ανάλυσης αβεβαιότητας, έγιναν 27 προσομοιώσεις (μία για κάθε ραδιονουκλίδιο που διατέθηκε). Κι εδώ μελετάται η ίδια εγκατάσταση διάθεσης όλων των νουκλιδίων, αλλά, εν προκειμένω, μεμονωμένα για κάθε ένα τους.

Αντί η ανάλυση να περιοριστεί σε μία περιγραφή του ευνοϊκότερου (best-case) ή του δυσμενέστερου (worst-case) σεναρίου, μέσω της εισαγωγής της αβεβαιότητας, υπάρχει η δυνατότητα ανάλυσης κάθε περίπτωσης μεταξύ τους. Η ανάλυση αυτή λαμβάνει χώρα με βάση την κατανομή της πιθανότητας για καθεμία από τις περιπτώσεις αυτές, ενώ απαιτείται και ο υπολογισμός του χρόνου υπολογισμού για την συγκεκριμένη κατανομή, ο οποίος αναμένεται να είναι μεγαλύτερος από εκείνον στην Ντετερμινιστική Ανάλυση. Επίσης, βασίζεται σε μοντέλα διασποράς ή σε πειραματικές διασπορές.

Όπως και προηγουμένως, ο κορμός της εργασίας ανάγεται στη σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με εκείνα του TECDOC1380. Οι παράμετροι είναι ίδιες με εκείνες της προηγούμενης ανάλυσης, καθώς είναι απαραίτητη πάλι η όσο το δυνατόν ακριβέστερη σύγκριση των δύο σεναρίων. Πέρα από αυτές, ωστόσο, για την πλήρη περιγραφή και την περάτωση της ανάλυσης, απαιτείται και ο προσδιορισμός της από στατιστικής πλευράς.

Η κάθε μεταβλητή ορίζεται στατιστικά μέσω της μέσης τιμής της (Mean Value), της απόκλισής της (Standard Deviation) και των άνω-κάτω ορίων (Upper-Lower Quantile), των οποίων οι τιμές λαμβάνονται από εξωτερική πηγή (NUREG/CR-7267). Η κατανομή της καθεμιάς χρησιμοποιείται για τη δημιουργία κάποιων θεωρητικά πιθανών εκβάσεων για το συγκεκριμένο σενάριο.

Η συσχέτιση κατάταξης (Input Rank Correlation), όπως αυτή φαίνεται στον Πίνακα 20, συμβάλλει στη μέτρηση της ισχύος και της κατεύθυνσης της σχέσης μεταξύ δύο ταξινομημένων μεταβλητών. Ουσιαστικά, δίνει το μέτρο της μονοτονίας μεταξύ των μεταβλητών, δηλαδή το πόσο καλά θα μπορούσε να αναπαρασταθεί η σχέση μεταξύ τους χρησιμοποιώντας μία μονοτονική συνάρτηση. Δεικνύεται από τον συντελεστή συσχέτισης  $R^2$ , ο οποίος λαμβάνεται ίσος με 0.9999 για κάθε ζεύγος μεταβλητών, ώστε η συσχέτιση μεταξύ τους να είναι η βέλτιστη.

Στον Πίνακα 24, μπορεί κανείς να αναγνωρίσει τα αποτελέσματα του τεχνικού εγγράφου, της ανάλυσης και της σύγκρισής τους με αυτά της εργασίας. Εν γένει, συναντάται ως αναμενόμενη κάποια απόκλιση μεταξύ των δύο, η οποία οφείλεται τόσο στις μεταβλητές που λήφθηκαν ως defaults από το λογισμικό ή ως inputs του χρήστη, όσο και στο ίδιο το λογισμικό, καθώς δεν είναι γνωστή η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων του TECDOC1380, και πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη μία ασφαλιστική δικλείδα λόγω των σφαλμάτων του. Συγκεκριμένα, λόγω του μεγαλύτερου μέγιστου χρόνου αναφοράς στην προκείμενη ανάλυση (20.000 έτη μετά το πέρας της θεσμικής περιόδου), παρατηρούνται χαμηλότερα επίπεδα ραδιενέργειας ανά μονάδα μάζας, δεδομένων και των διασπάσεων που λαμβάνουν χώρα σε αυτό το χρονικό διάστημα.

Εκτός αυτού, άξια αναφοράς είναι και η διαφορά μεταξύ της μέγιστης δόσης για κάθε νοκλίδιο στην Ντετερμινιστική Ανάλυση και στην Ανάλυση Αβεβαιότητας. Μάλιστα, στην

δεύτερη παρατηρείται γενικά μεγαλύτερη δόση ανά μονάδα μάζας κατά μερικές τάξεις μεγέθους. Και πάλι, ωστόσο, οι δόσεις αποδεικνύονται πολύ μικρές συγκριτικά με τη μέση δόση που λαμβάνει ένα άτομο σε ετήσια βάση (2-6mSv).

Στον Πίνακα 22 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης αβεβαιότητας για κάθε νουκλίδιο χωριστά. Για κάθε νουκλίδιο δίνονται η μέγιστη κορυφή της ετήσιας δόσης και η χρονική στιγμή που αυτή εμφανίζεται, η συγκέντρωση που προέκυψε από τις προσομοιώσεις, η συγκέντρωση που αναγράφεται στο τεχνικό έγγραφο που αντιστοιχεί σε 1mSv/έτος, ο λόγος των δύο συγκεντρώσεων, η μέση<sup>8</sup> και η διάμεση<sup>9</sup> τιμή των αποτελεσμάτων, και η κορυφή του αντίστοιχου διαγράμματος στην ντετερμινιστική προσομοίωση.

---

<sup>8</sup> Η μέση τιμή είναι το ολοκλήρωμα μίας συνεχούς συνάρτησης μίας ή περισσότερων μεταβλητών σε ένα δεδομένο εύρος μελέτης, διαιρεμένο με το εύρος αυτό.

<sup>9</sup> Η διάμεση τιμή είναι η μέση τιμή μιας ομάδας αριθμών ταξινομημένων κατά μέγεθος. Είναι ο αριθμός που βρίσκεται ακριβώς στη μέση, ώστε το 50% των αριθμών να είναι πάνω από αυτή και το υπόλοιπο 50% κάτω από αυτή.

Πίνακας 22: Αποτελέσματα της ανάλυσης αβεβαιότητας

Νουκλίδιο	Μέγιστη Δόση(mSv/έτος)	Χρονική στιγμή Μέγιστης Δόσης(έτος)	Συγκέντρωση (Bq/g)	Συγκέντρωση 1380(Bq/g)	Λόγος	Μέση τιμή	Διάμεση τιμή	Ντετερμινιστική Κορυφή
<sup>241</sup> Am	4.19E-11	231	2.39E+10	7.00E+14	2.93E+04	8.39E-13	1.69E-17	1.26E-11
<sup>14</sup> C	4.7E-12	103	2.13E+11	9.00E+11	4.23E+00	5.78E-14	0	5.98E-12
<sup>41</sup> Ca	5.72E-14	218	1.75E+13	2.00E+12	1.14E-01	1.22E-14	2.59E-15	2.97E-14
<sup>60</sup> Co	6.69E-16	9.78	1.49E+15	1.00E+20	6.69E+04	6.69E-16	6.69E-16	6.69E-16
<sup>134</sup> Cs	4.48E-18	9.78	2.23E+17	1.00E+20	4.48E+02	4.48E-18	4.48E-18	4.48E-18
<sup>137</sup> Cs	2.95E-15	125	3.39E+14	1.00E+20	2.95E+05	5.89E-17	2.53E-17	3.17E-17
<sup>55</sup> Fe	9.17E-28	148	1.09E+27	1.00E+20	9.17E-08	1.83E-29	9.93E-33	1.18E-31
<sup>3</sup> H	1.2E-18	144	8.33E+17	7.00E+11	8.4E-07	1.24E-19	5.54E-23	1.33E-18
<sup>129</sup> I	3.67E-11	100	2.72E+10	4.00E+08	1.47E-02	1.12E-12	1.94E-18	3.49E-11
<sup>94</sup> Nb	1.98E-14	132	5.05E+13	4.00E+12	7.92E-02	3.96E-16	1.9E-16	4.48E-14
<sup>59</sup> Ni	1.85E-15	5290	5.41E+14	3.00E+14	5.55E-01	1.7E-16	3.13E-22	3.94E-16
<sup>63</sup> Ni	2.08E-16	237	4.81E+15	1.00E+20	2.08E+04	4.17E-18	0	5.86E-38
<sup>237</sup> Np	3.63E-12	156	2.75E+11	1.00E+11	3.63E-01	8.03E-13	2.18E-13	1.58E-12
<sup>238</sup> Pu	1.88E-14	340	5.32E+13	4.00E+13	7.52E-01	7.85E-16	4.56E-17	1.93E-15
<sup>239</sup> Pu	1.03E-12	739	9.71E+11	1.00E+11	1.03E-01	6.72E-14	4.35E-18	1.02E-15
<sup>240</sup> Pu	7.85E-13	948	1.27E+12	3.00E+11	2.36E-01	1.86E-14	2.52E-17	2.41E-16
<sup>241</sup> Pu	5.74E-13	487	1.74E+12	2.00E+16	1.15E+04	2.87E-14	4.28E-18	3.72E-13
<sup>226</sup> Ra	2.4E-10	2950	4.17E+09	1.00E+12	2.40E+02	5.45E-12	1.59E-15	3.42E-10
<sup>228</sup> Ra	2.76E-15	9.78	3.62E+14	1.00E+20	2.76E+05	2.76E-15	2.76E-15	2.76E-15
<sup>151</sup> Sm	3.39E-16	156	2.95E+15	1.00E+20	3.39E+04	6.79E-18	0	2.23E-37
<sup>90</sup> Sr	3.27E-13	129	3.06E+12	8.00E+13	2.62E+01	6.59E-15	3.08E-21	1.64E-18
<sup>99</sup> Tc	1.9E-14	112	5.26E+13	2.00E+10	3.80E-04	1.76E-15	9.61E-20	1.9E-14
<sup>232</sup> Th	7.59E-12	20000	1.32E+11	3.00E+10	2.28E-01	8.49E-13	6.95E-15	6.96E-15
<sup>234</sup> U	4.02E-11	20000	2.49E+10	2.00E+10	8.04E-01	2.72E-12	9.91E-14	4.52E-12
<sup>235</sup> U	8.82E-12	2790	1.13E+11	2.00E+10	1.76E-01	7.19E-13	3.12E-14	7.69E-12
<sup>238</sup> U	5.47E-12	206	1.83E+11	2.00E+11	1.09E+00	3.76E-13	1.22E-14	2.91E-12



<sup>93</sup> Zr	4.12E-13	13200	2.43E+12	2.00E+12	8.24E-01	8.17E-14	2.04E-14	4.26E-13
------------------	----------	-------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Ερχόμενοι στη σύγκριση των αποτελεσμάτων με το TECDOC1380, εύκολα παρατηρεί κανείς μέσω του Πίνακα 22, πως οι διαφορές μεταξύ των δύο μελετών είναι εμφανείς. Ομοίως με την προηγούμενη ανάλυση, αυτές οι διαφορές οφείλονται κυρίως στα του χρήστη του λογισμικού, καθώς εισήχθησαν και μεταβλητές που δεν αναγράφονταν στο έγγραφο. Από εκεί και πέρα, μπορούν να γίνουν κάποιες σημειώσεις σχετικά με τη συμπεριφορά της εγκατάστασης και των ραδιονουκλιδίων μέσα σε αυτή.

Αρχικά, τα ραδιονουκλίδια βρίσκονται εντός της εγκατάστασης διάθεσης. Μέσω των οδών έκθεσης που παρατίθενται στο κεφάλαιο 3.1, το καθένα από αυτά διαφεύγει και φτάνει στο νερό του πηγαδιού. Η ταχύτητα, με την οποία διαφεύγει το κάθε νουκλίδιο εξαρτάται από τη σταθερά ισορροπίας  $K_d$ . Εάν αυτή η σταθερά παίρνει χαμηλή τιμή, το νουκλίδιο μεταφέρεται γρήγορα στο νερό που αφορά την εγκατάσταση. Όπως φαίνεται από τα Γραφήματα 7, 10, 22, 43 και 46, νουκλίδια που δίνουν τη δόση τους σχετικά νωρίς είναι τα <sup>14</sup>C, <sup>129</sup>I, <sup>232</sup>Th, <sup>137</sup>Cs, <sup>55</sup>Fe. Σε αντίθετη περίπτωση, για υψηλές τιμές της  $K_d$ , έχουμε αργότερη μεταφορά του νουκλιδίου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα <sup>237</sup>Np, <sup>239</sup>Pu και <sup>59</sup>Ni, τα οποία φαίνονται στα Γραφήματα 13, 16 και 55 αντίστοιχα.

Έπειτα, σημαντικός παράγοντας για τη διαμόρφωση της τελικής δόσης είναι και ο χρόνος ημιζωής του κάθε ραδιονουκλιδίου. Αν ο χρόνος ημιζωής του είναι μικρός, μέχρι να φτάσει στο νερό της εγκατάστασης, η ενεργότητά του θα έχει μειωθεί κατά σημαντικό ποσοστό και δεν θα παίζει σημαντικό ρόλο στην τελική δόση. Τέτοια νουκλίδια είναι τα <sup>232</sup>Th, <sup>137</sup>Cs και <sup>63</sup>Ni, των οποίων οι δόσεις δίνονται στα Γραφήματα 22, 43 και 58 αντίστοιχα. Αντίθετα, αν έχουμε μεγάλο χρόνο ημιζωής, η ενεργότητα δεν θα έχει προλάβει να εξασθενήσει σημαντικά μέχρι την έλευση του νουκλιδίου στο νερό, καθιστώντας τη συμμετοχή του στην τελική δόση σημαντική. Τέτοια παραδείγματα απεικονίζονται στα Γραφήματα 4, 10 και 19, για τα αντίστοιχα νουκλίδια <sup>241</sup>Am, <sup>129</sup>I και <sup>226</sup>Ra.

Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης διαφαίνεται μεγαλύτερη ενεργότητα σε σχέση με το τεχνικό έγγραφο. Συμβαίνει λόγω της τυχόν ύπαρξης του συγκεκριμένου νουκλιδίου ως θυγατρικού σε άλλα νουκλίδια, είτε λόγω του πολύ μεγάλου χρόνου ημιζωής του, όπου και δεν προλαβαίνει να υπάρξει κάποιο σημαντικό ποσοστό διάσπασης. Για να παρακαμφθεί αυτή η “ανωμαλία”, αυξήθηκε ο αριθμός των σημείων αναφοράς μέσα στο χρονικό πλέγμα. Τα σημεία αυτά αφέθηκαν ίσα με 2048 για τα υπόλοιπα νουκλίδια που δεν παρουσίασαν αυτό το πρόβλημα, και σε άξονα γραμμικό. Εν προκειμένω, απαιτήθηκε αύξηση των σημείων στα 8192 σε γραμμικό άξονα επίσης, ώστε να υπάρχει άρτια διάκριση μεταξύ των τιμών στους χρόνους αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη.

Εν γένει, λόγω των μικρότερων και πιο συμπυκνώνων χρόνων αναφοράς της μελέτης στο τεχνικό έγγραφο, τα αποτελέσματα της προκείμενης μελέτης αναμένεται να αναδείξουν ποσότητες ραδιενέργειας μεγαλύτερες αναφορικά με TECDOC1380.

Όσον αφορά τα γραφήματα, αυτά είναι τα πιο “άμεσα” αποτελέσματα της ανάλυσης, καθώς μπορούν να δώσουν μία ξεκάθαρη εικόνα του ρόλου του κάθε νουκλιδίου στη διαμόρφωση της τελικής δόσης.

Για κάθε νουκλίδιο, δίνονται 3 γραφήματα.

1) Το Γράφημα της Συνολικής Δόσης (Total Dose) λόγω του νουκλιδίου και των θυγατρικών του συναρτήσει χρόνου, όπου λαμβάνεται υπόψη κάθε οδός έκθεσης που παρατίθεται στο Κεφάλαιο 3.1. Ο στόχος του συγκεκριμένου διαγράμματος δεικνύει τη συμμετοχή του νουκλιδίου και των θυγατρικών του στην ανάλυση, άρα και στη δόση που θα λάβει το άτομο, καθώς και τη χρονική στιγμή που θα μεγιστοποιηθεί αυτή. Τα γραφήματα αυτά είναι τα 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 42, 45, 48, 51, 54, 57, 60, 63, 66, 69, 72, 75, 78, 81, 84, 87, 90, 93.

2) Το Γράφημα της Διάμεσης Τιμής της δόσης που οφείλεται στο κάθε νουκλίδιο (Median Value), συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιστάσεις μετρήσεων. Βάσει της διαδικασίας εύρεσής της, η οποία περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3, η διάμεση τιμή δεικνύει την κεντρική τιμή της δόσης του νουκλιδίου. Έτσι, μπορεί να γίνει μία στατιστική ανάλυση των δόσεων σε βάθος χρόνου και να συγκριθούν με την κεντρική αυτή τιμή. Τα γραφήματα αυτά είναι τα 16, 19, 22, 25, 28, 31, 34, 37, 40, 43, 46, 49, 52, 55, 58, 61, 64, 67, 70, 73, 76, 79, 82, 85, 88, 91, 94.

3) Το Γράφημα της Μέσης τιμής <sup>10</sup>της δόσης που οφείλεται στο κάθε νουκλίδιο (Mean Value), συναρτήσει του χρόνου και για τις τρεις περιστάσεις μετρήσεων. Η μέση τιμή χρησιμοποιείται για να δώσει μία μέση ενδεικτική περιγραφή του σεναρίου, ώστε να μπορεί κανείς να κάνει γρήγορους υπολογισμούς χωρίς να χρειαστεί να εισέλθει σε βάθος στην ανάλυση. Τα γραφήματα αυτά είναι τα 17, 20, 23, 26, 29, 32, 35, 38, 41, 44, 47, 50, 53, 56, 59, 62, 65, 68, 71, 74, 77, 80, 83, 86, 89, 92, 95.

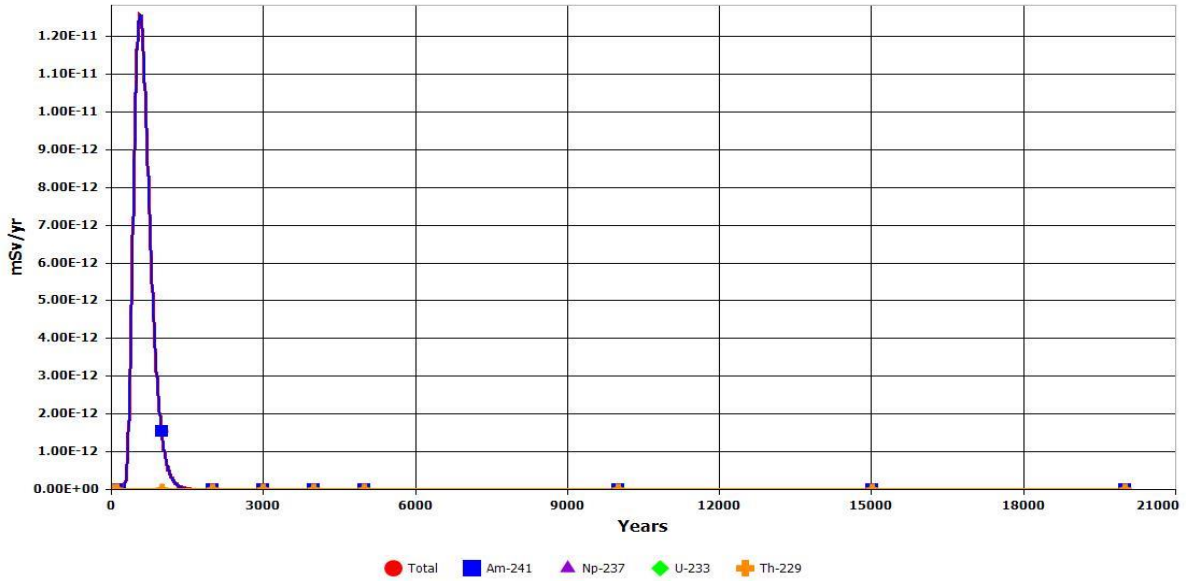
Παρακάτω, παρατίθενται τα γραφήματα των νουκλιδίων που συμμετέχουν σε σημαντικότερο βαθμό στη συνολική δόση. Τα υπόλοιπα, μπορεί κανείς να τα αναζητήσει στο παράρτημα.

---

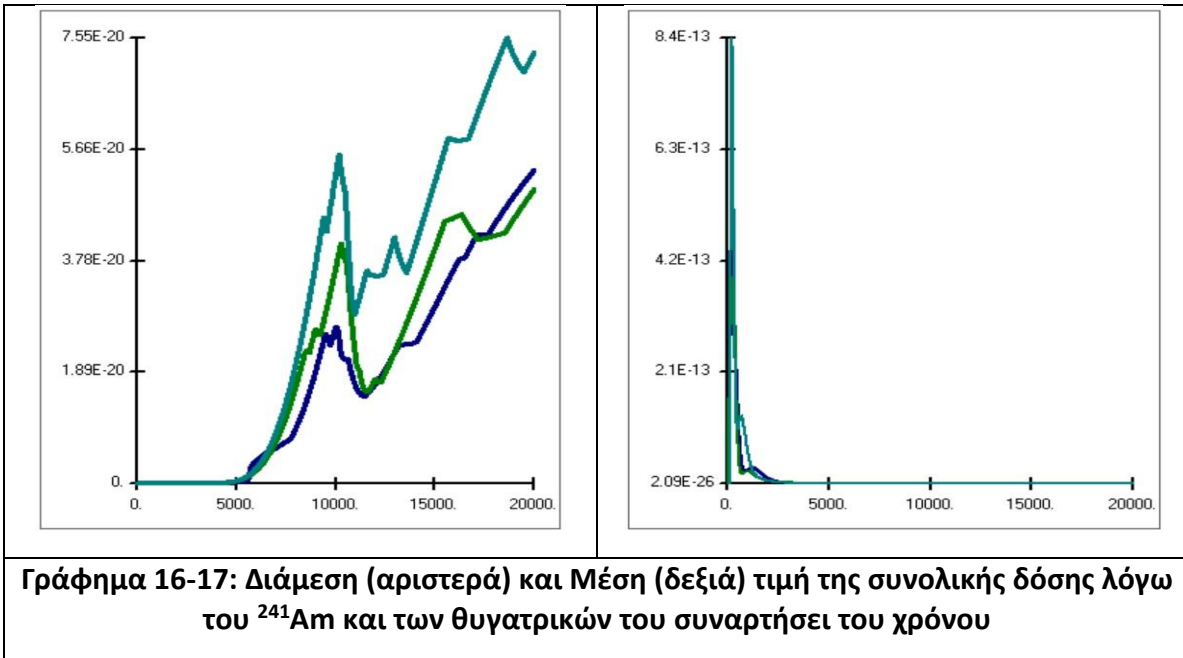
<sup>10</sup> Συγκρίνοντας τη Μέση και τη Διάμεση τιμή, μπορεί κανείς να έχει μία ιδέα της κατανομής της δόσης.

**<sup>241</sup>Am**

DOSE: Am-241, With Ingrowth Progeny, All Pathways Summed

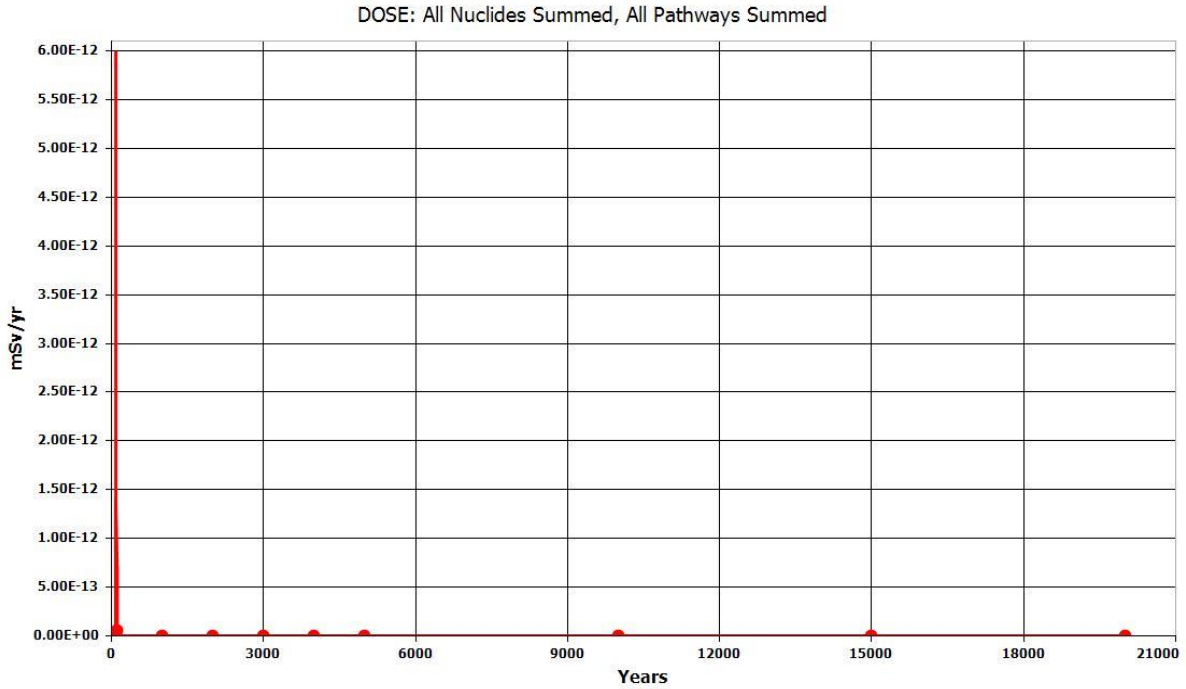


Γράφημα 15: Συνολική δόση λόγω του <sup>241</sup>Am και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου

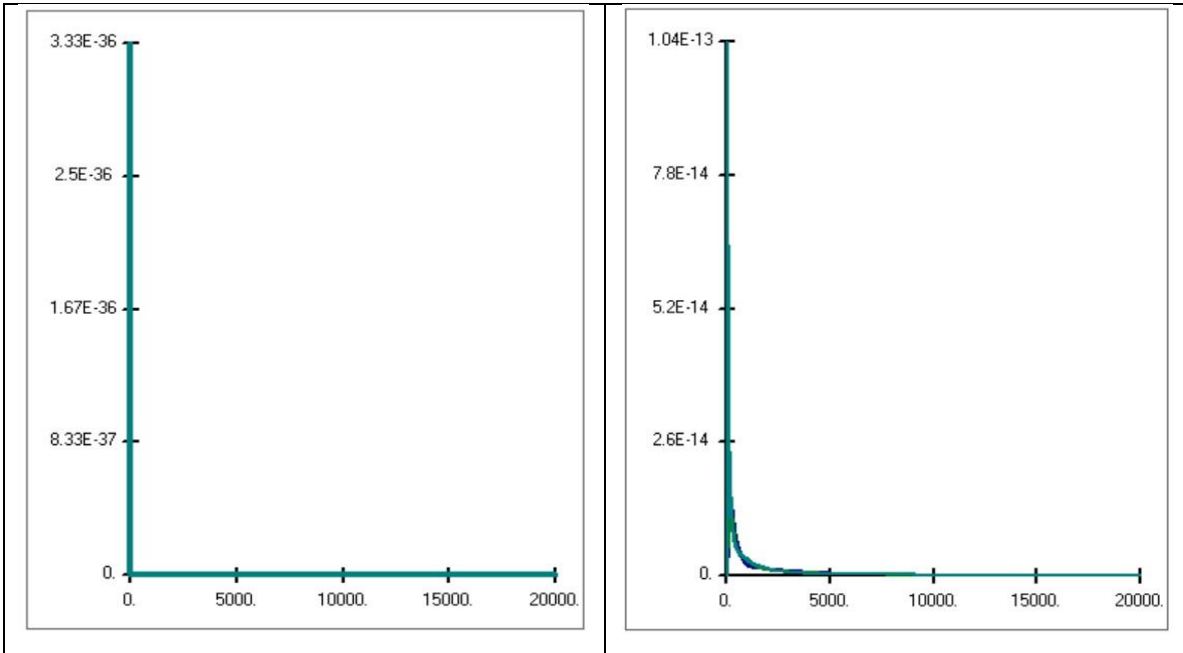


Γράφημα 16-17: Διάμεση (αριστερά) και Μέση (δεξιά) τιμή της συνολικής δόσης λόγω του <sup>241</sup>Am και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου

**<sup>14</sup>C**



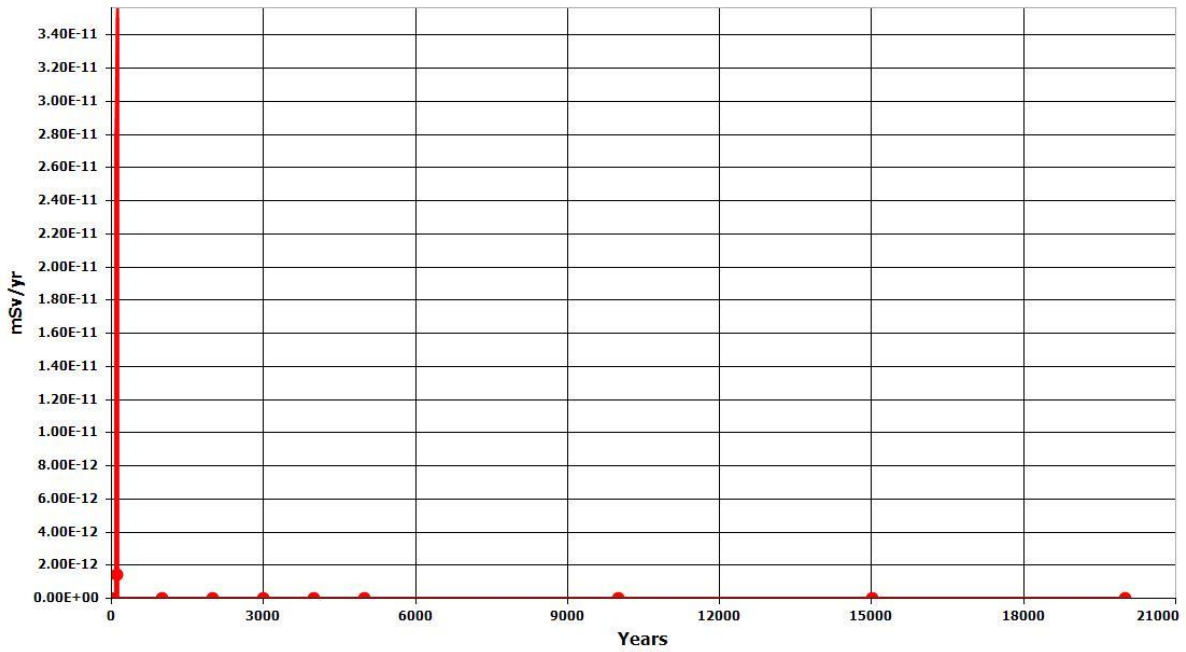
Γράφημα 18: Συνολική δόση λόγω <sup>14</sup>C συναρτήσει του χρόνου



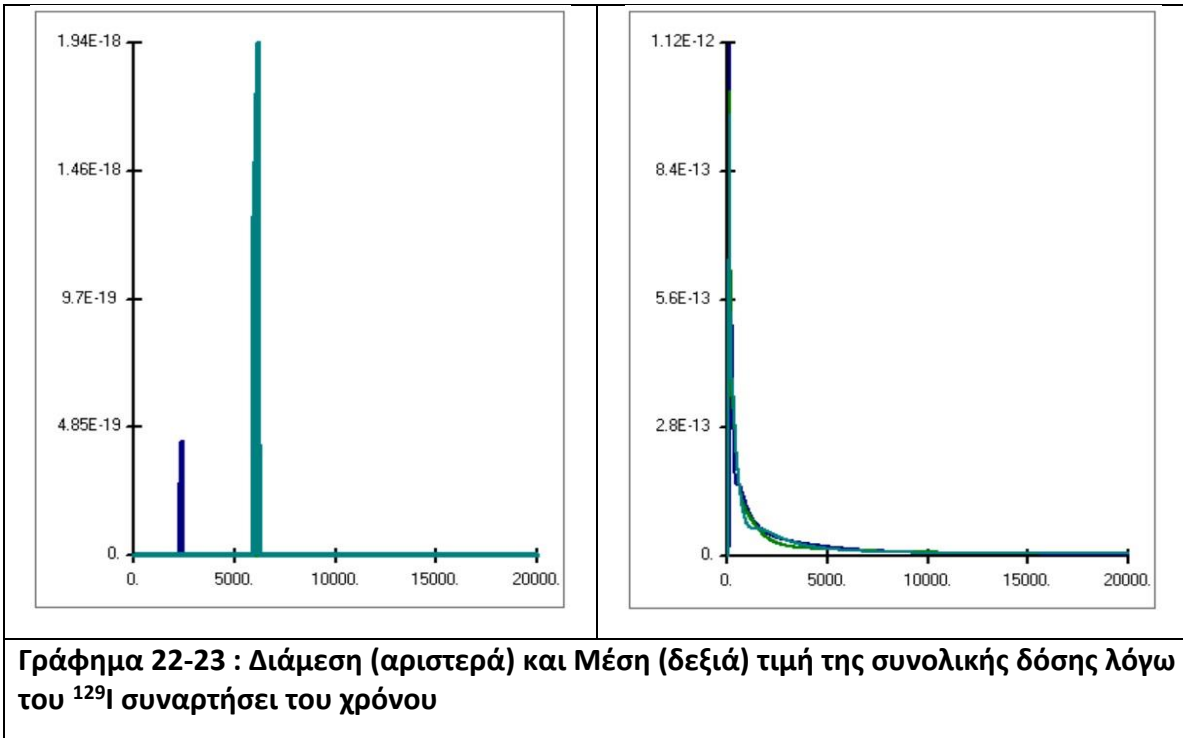
Γράφημα 19-20: Διάμεση (αριστερά) και Μέση (δεξιά) τιμή της συνολικής δόσης λόγω του <sup>14</sup>C συναρτήσει του χρόνου

129I

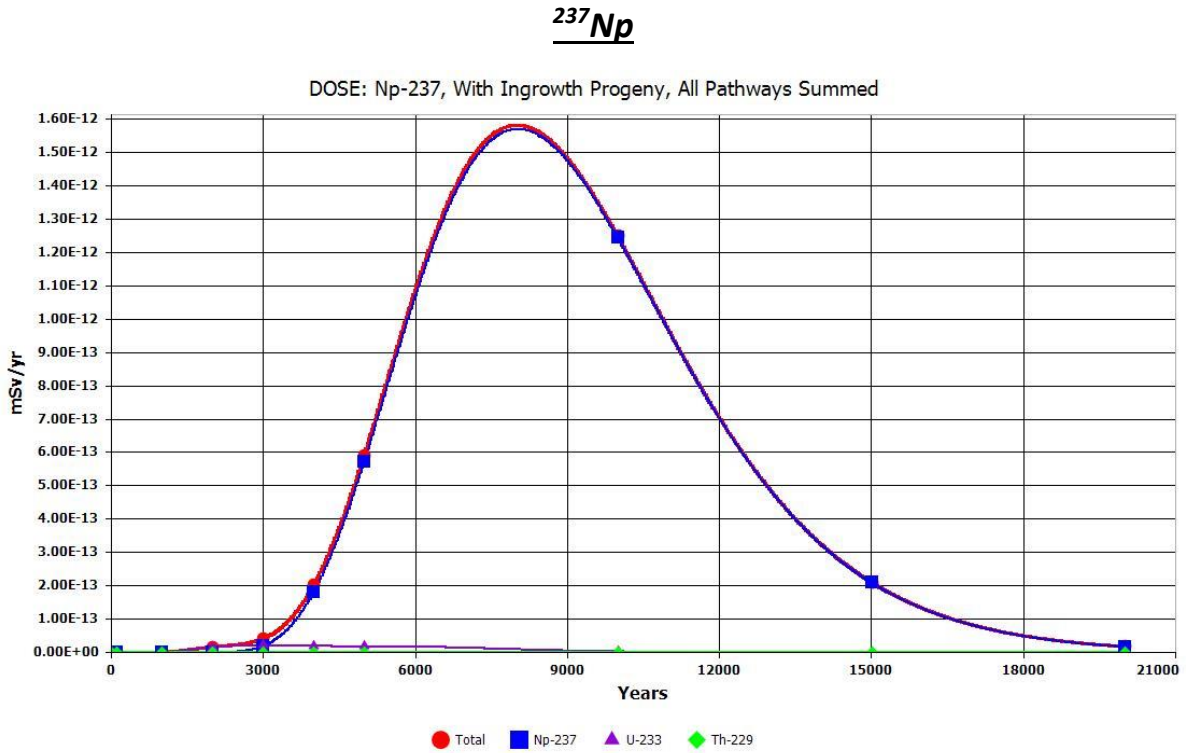
DOSE: All Nuclides Summed, All Pathways Summed



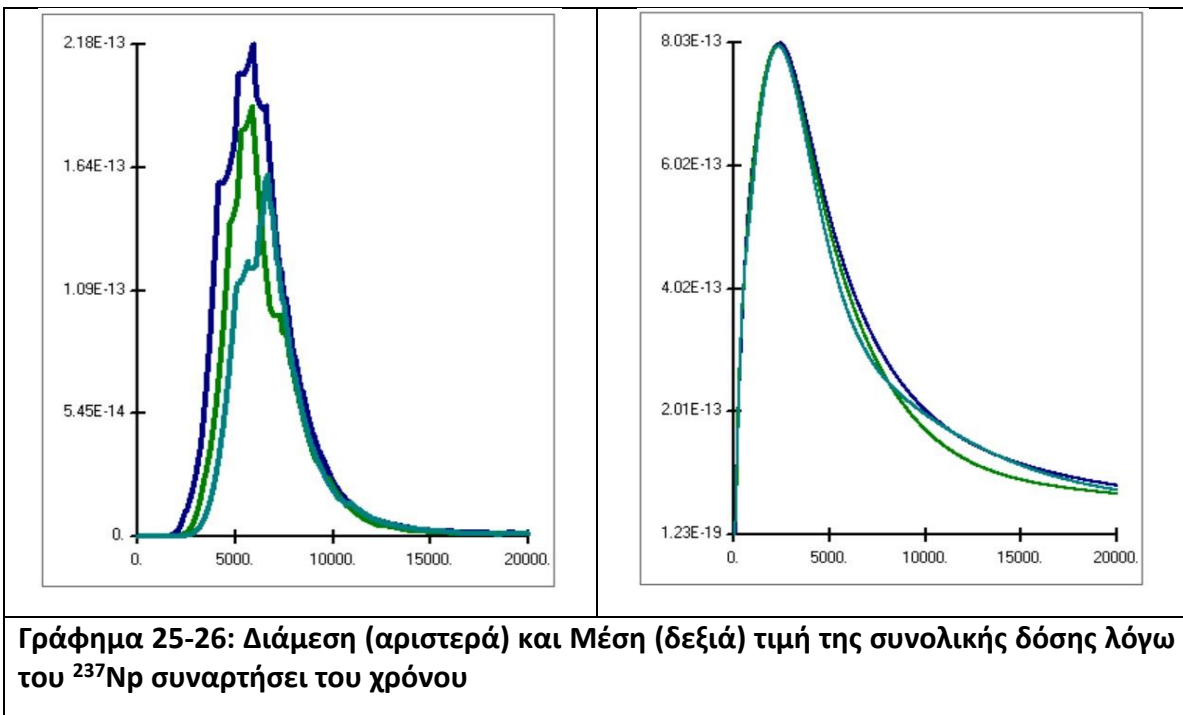
Γράφημα 21: Συνολική δόση λόγω του <sup>129</sup>I συναρτήσει του χρόνου



Γράφημα 22-23 : Διάμεση (αριστερά) και Μέση (δεξιά) τιμή της συνολικής δόσης λόγω του <sup>129</sup>I συναρτήσει του χρόνου



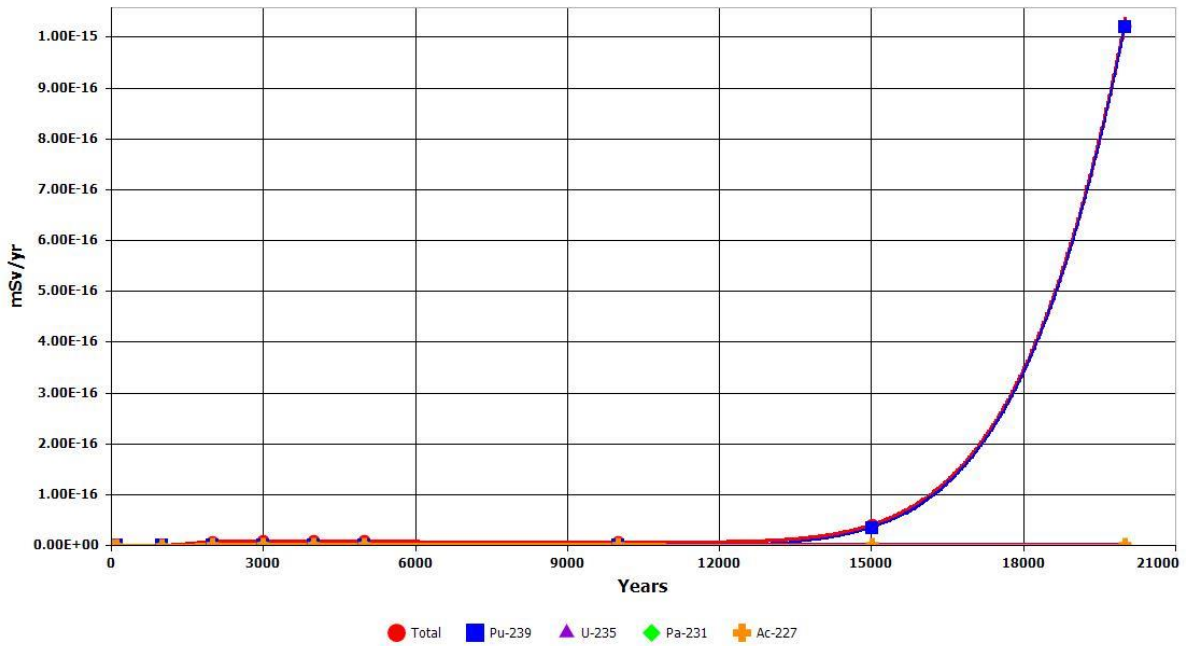
Γράφημα 24: Συνολική δόση λόγω του  $^{237}\text{Np}$  και των θυγατρικών του συναρτήσεϊ του χρόνου



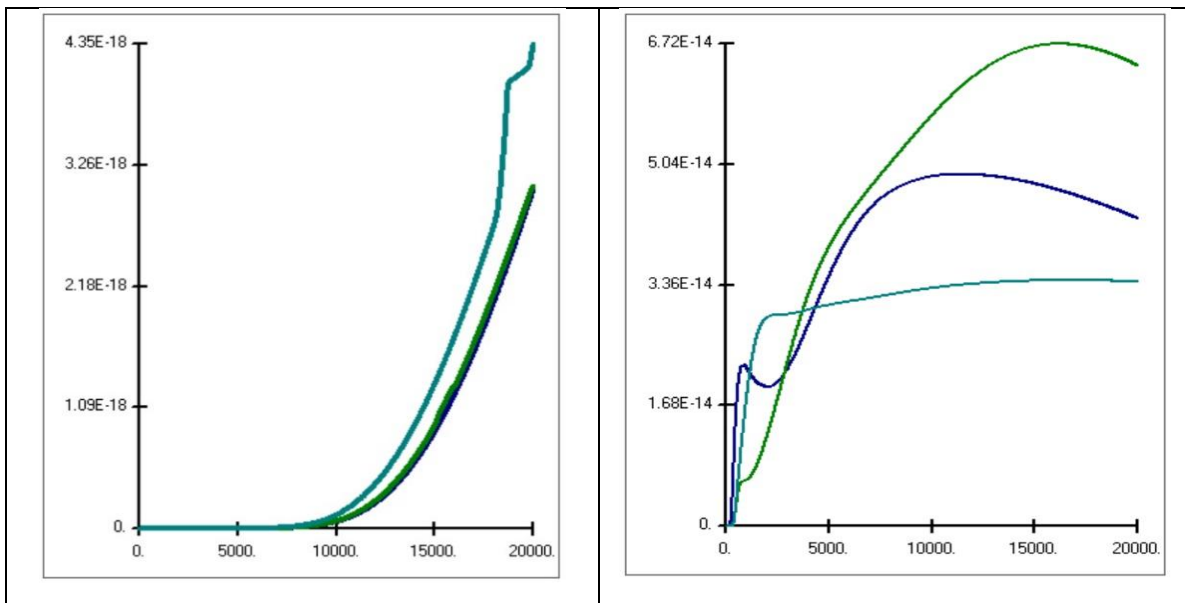
Γράφημα 25-26: Διάμεση (αριστερά) και Μέση (δεξιά) τιμή της συνολικής δόσης λόγω του  $^{237}\text{Np}$  συναρτήσεϊ του χρόνου

**$^{239}\text{Pu}$**

DOSE: Pu-239, With Ingrowth Progeny, All Pathways Summed



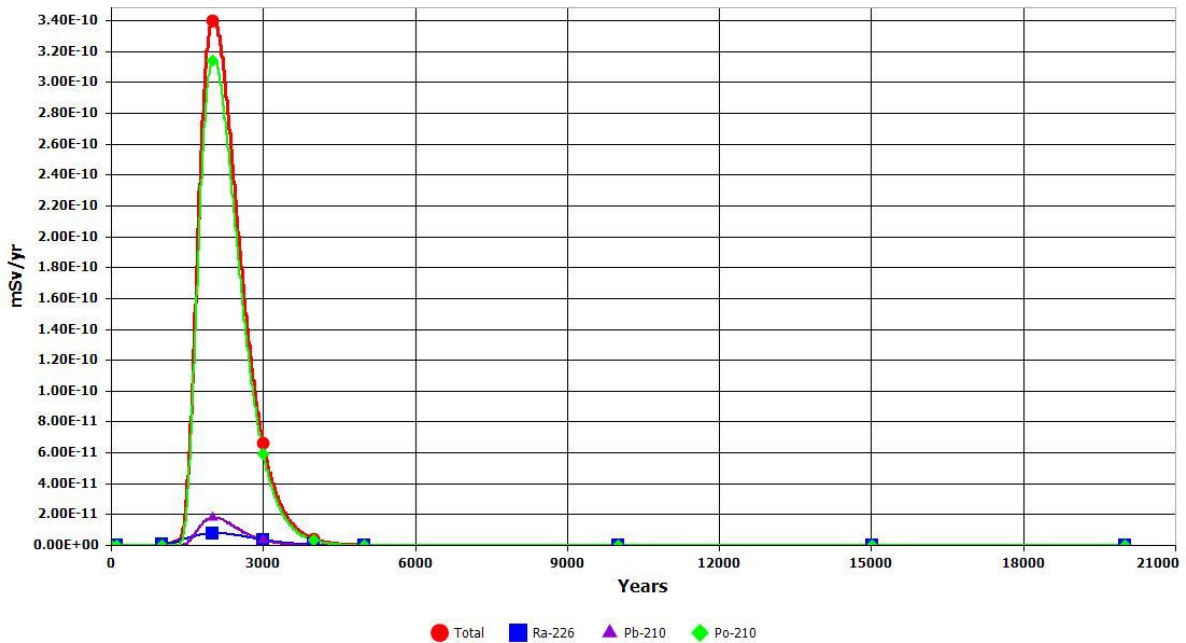
**Γράφημα 27: Συνολική δόση λόγω του  $^{239}\text{Pu}$  και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου**



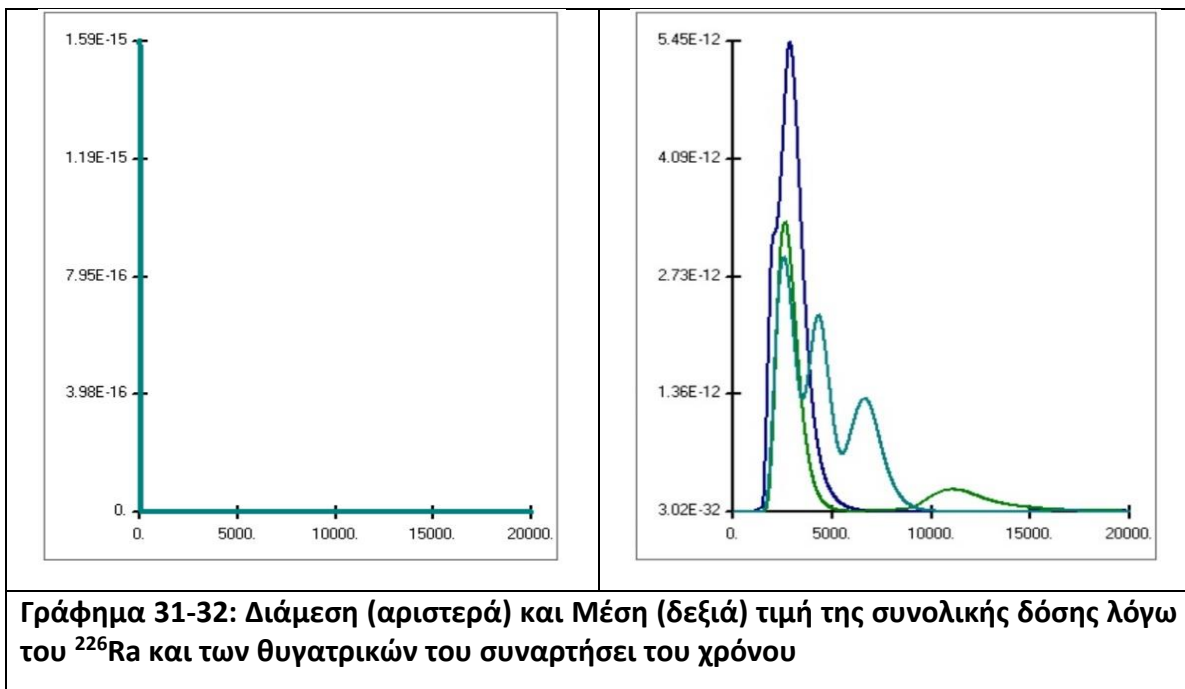
**Γράφημα 28-29: Διάμεση (αριστερά) και Μέση (δεξιά) τιμή της συνολικής δόσης λόγω του  $^{239}\text{Pu}$  και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου**

$^{226}\text{Ra}$

DOSE: Ra-226, With Ingrowth Progeny, All Pathways Summed

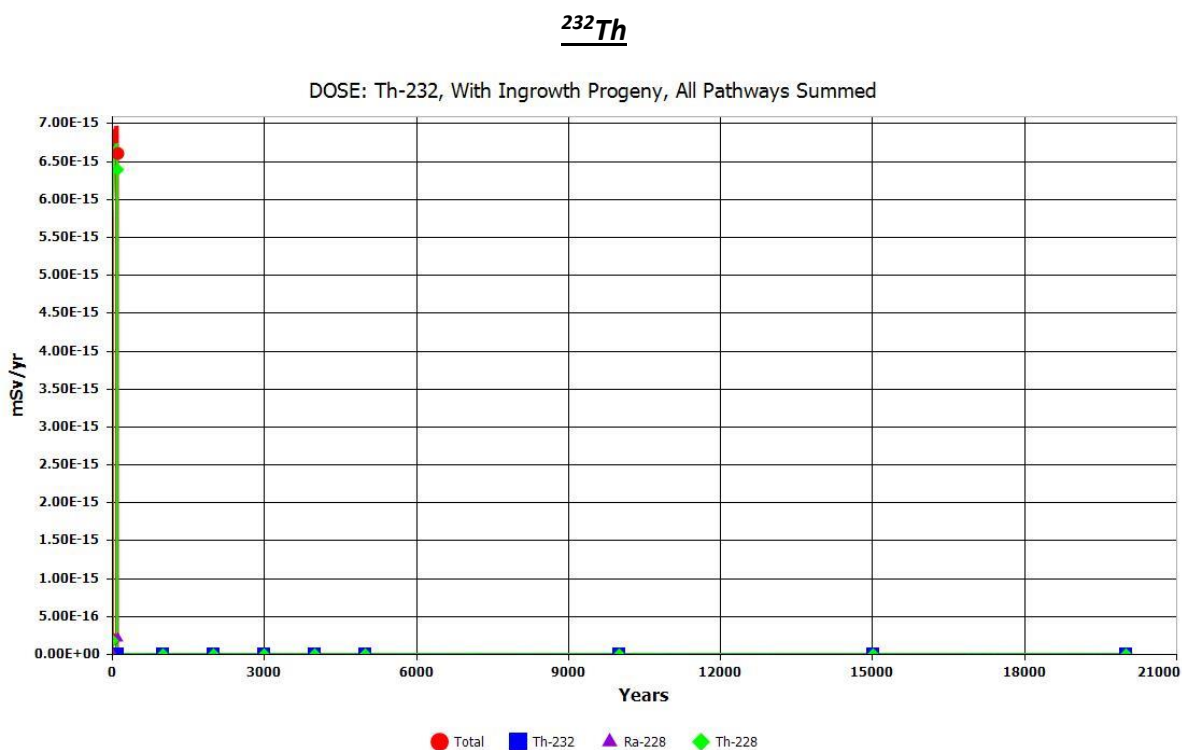


Γράφημα 30: Συνολική δόση λόγω του  $^{226}\text{Ra}$  και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου

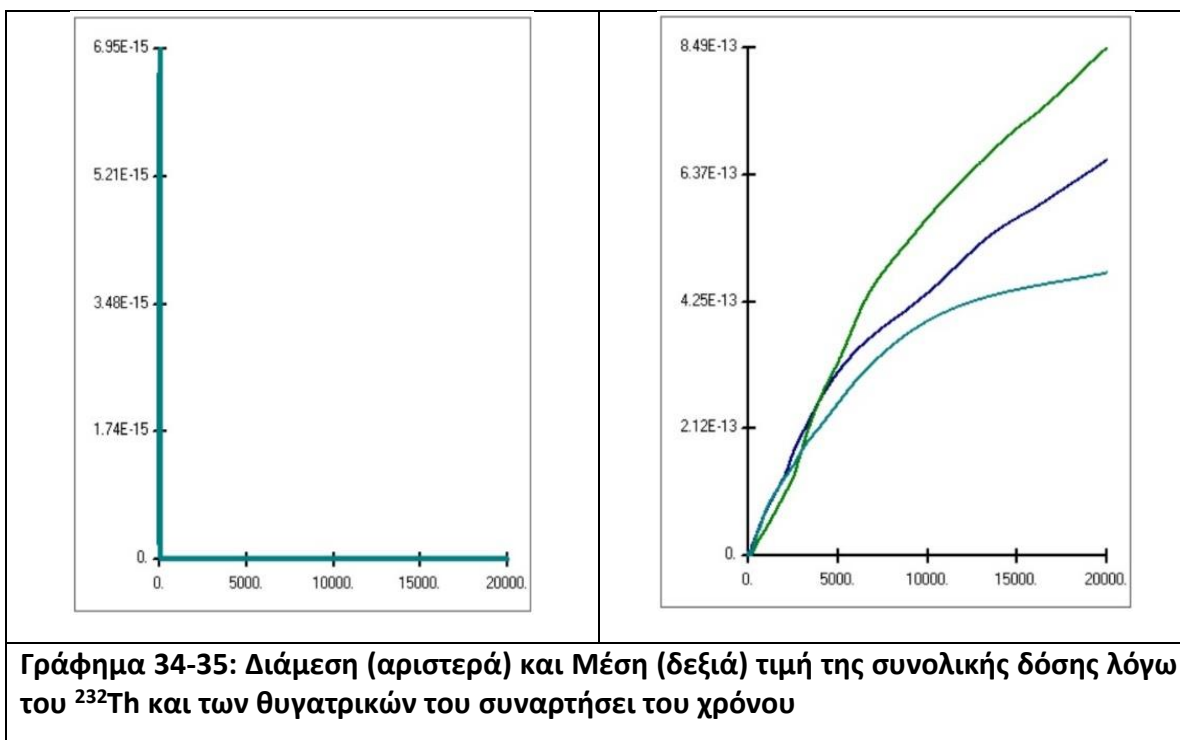


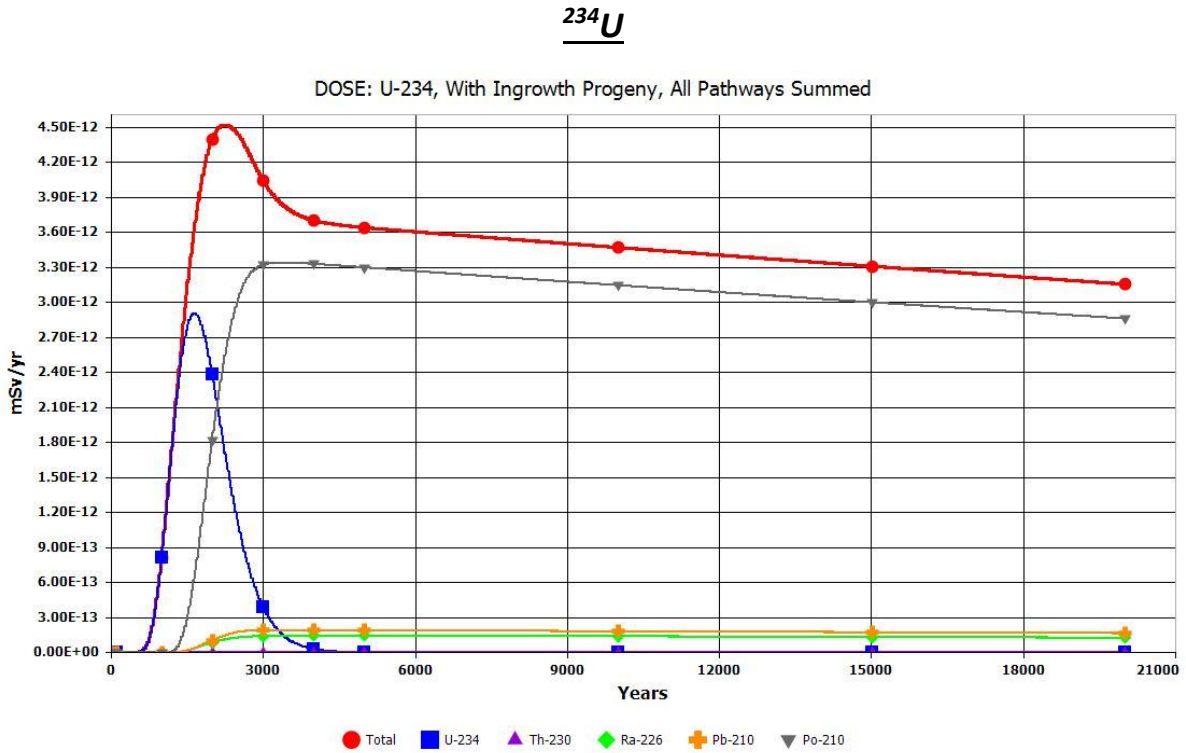
Γράφημα 31-32: Διάμεση (αριστερά) και Μέση (δεξιά) τιμή της συνολικής δόσης λόγω του  $^{226}\text{Ra}$  και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου



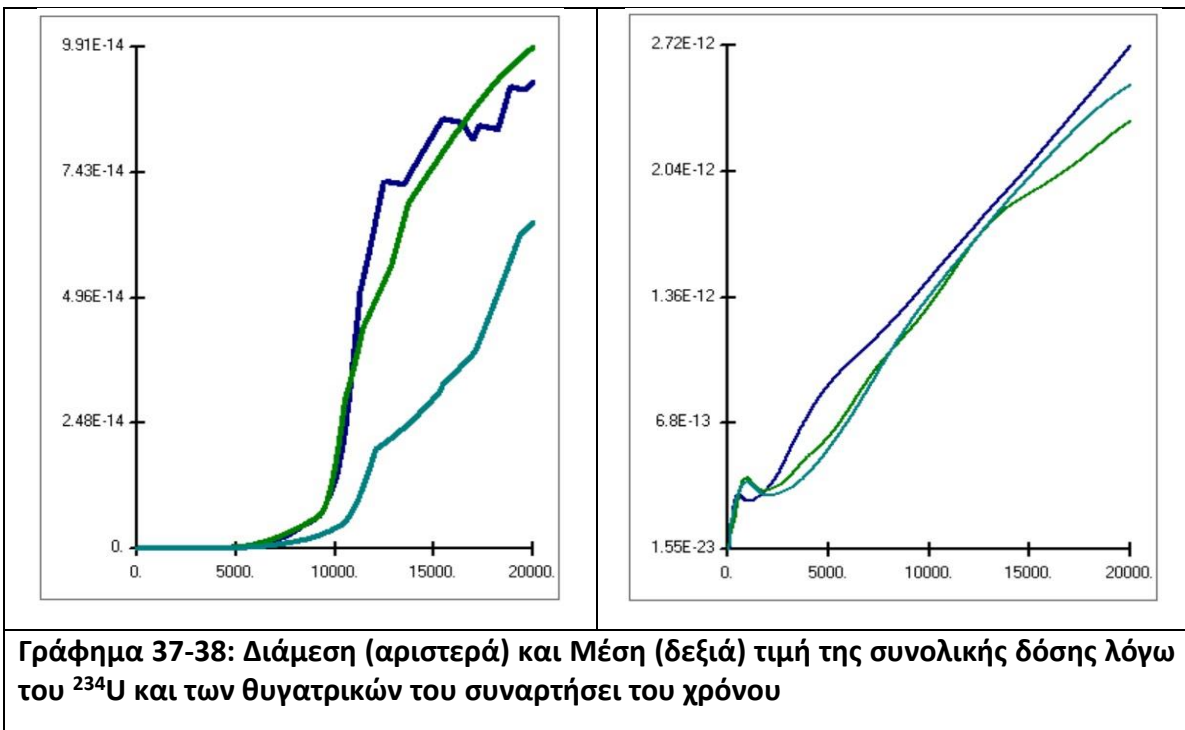


Γράφημα 33: Συνολική δόση λόγω του  $^{232}\text{Th}$  και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου



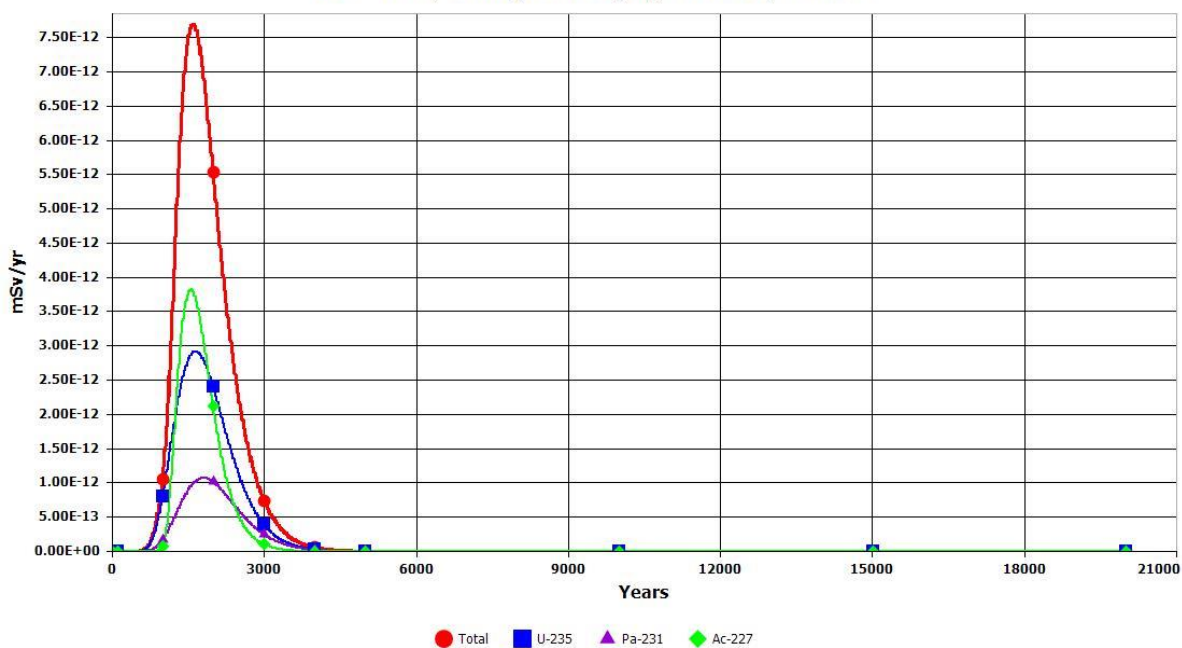


Γράφημα 36: Συνολική δόση λόγω του  $^{234}\text{U}$  και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου

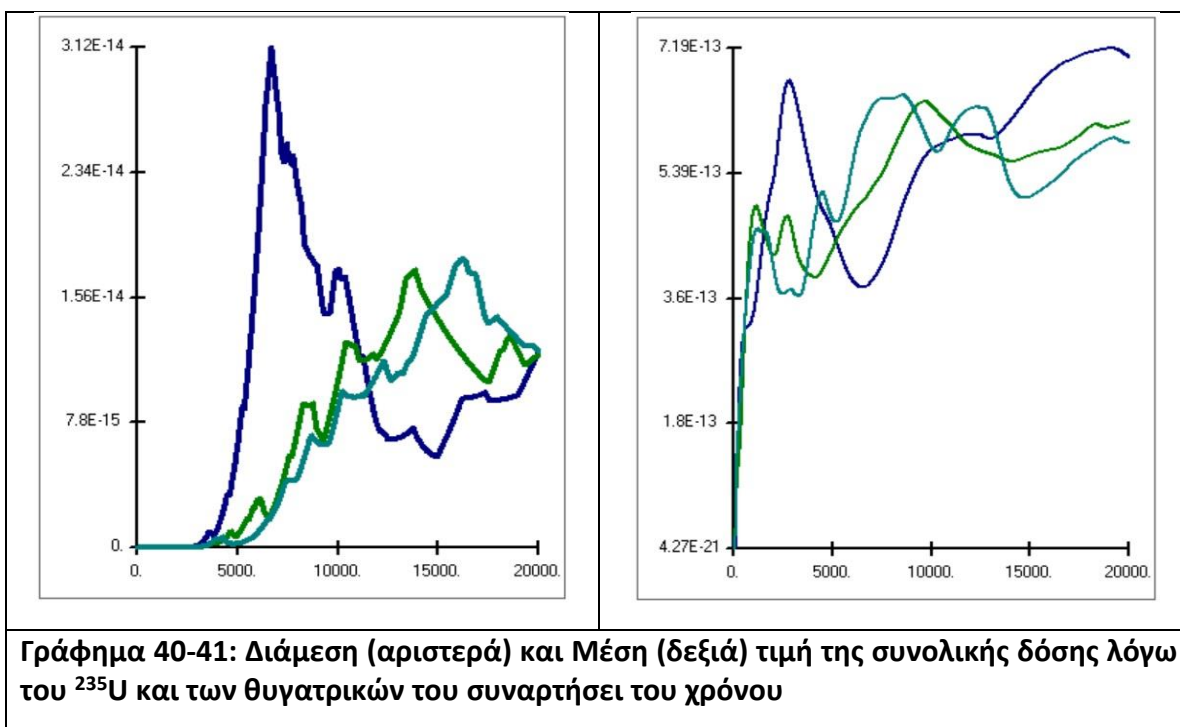


$^{235}\text{U}$

DOSE: U-235, With Ingrowth Progeny, All Pathways Summed



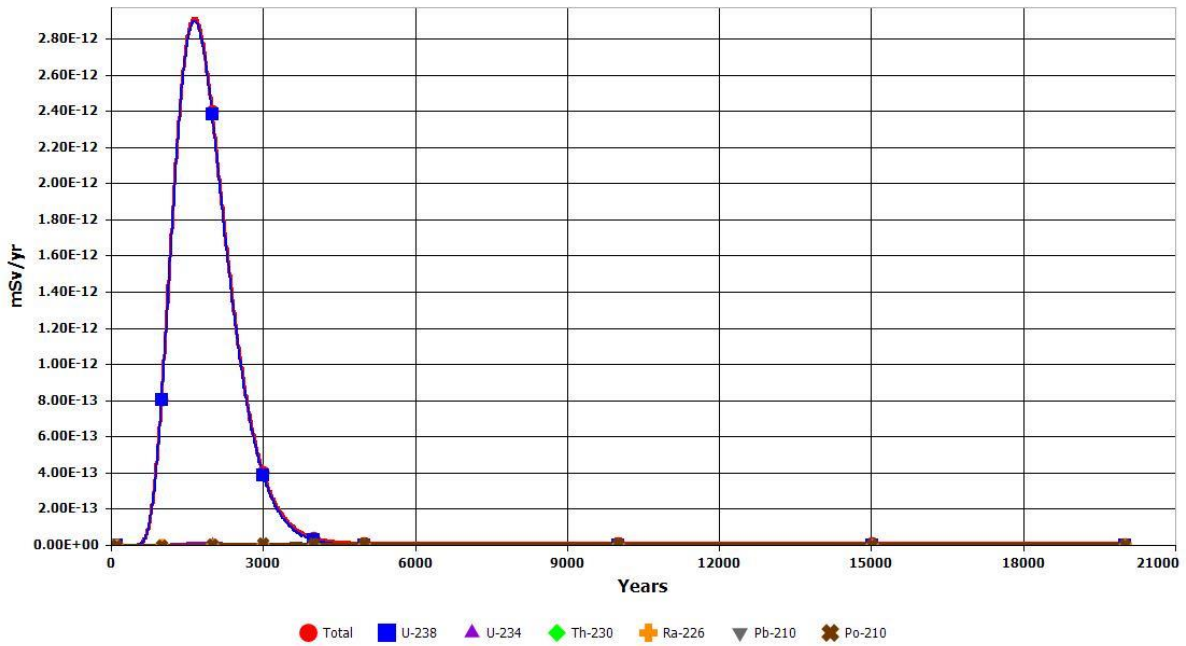
Γράφημα 39: Συνολική δόση λόγω του  $^{235}\text{U}$  και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου



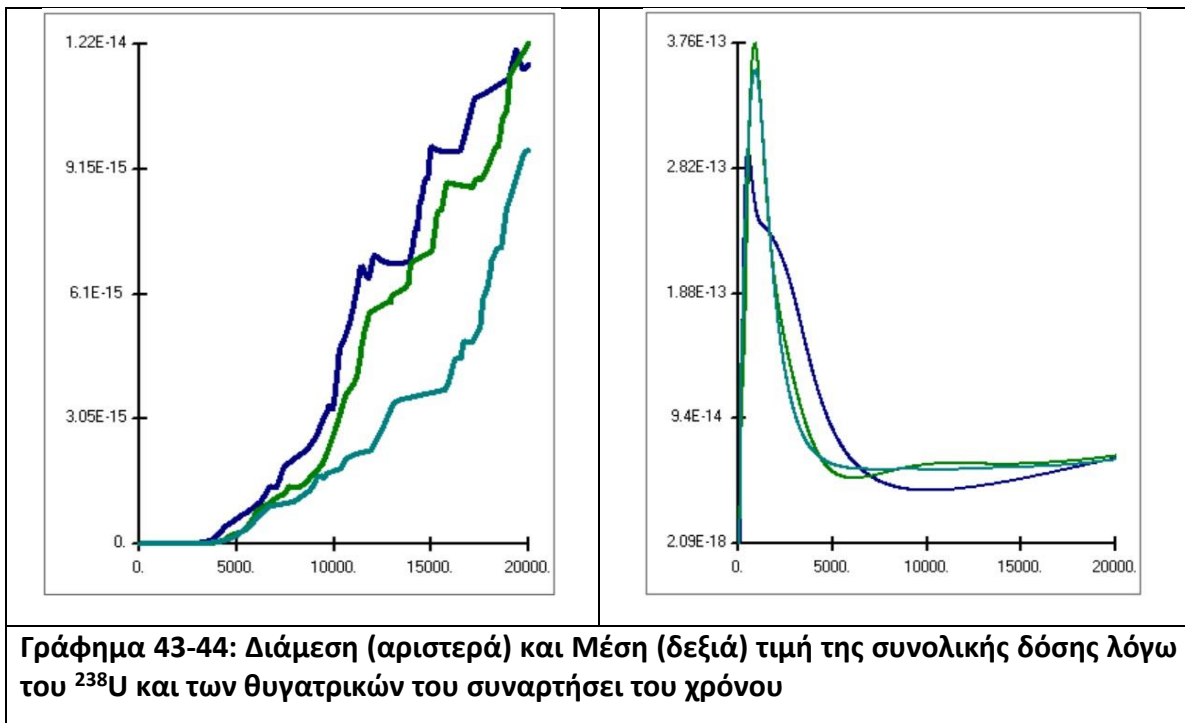
Γράφημα 40-41: Διάμεση (αριστερά) και Μέση (δεξιά) τιμή της συνολικής δόσης λόγω του  $^{235}\text{U}$  και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου

$^{238}\text{U}$

DOSE: U-238, With Ingrowth Progeny, All Pathways Summed



Γράφημα 42: Συνολική δόση λόγω του  $^{238}\text{U}$  και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου



Γράφημα 43-44: Διάμεση (αριστερά) και Μέση (δεξιά) τιμή της συνολικής δόσης λόγω του  $^{238}\text{U}$  και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου

## 5. Συμπεράσματα

Η προκείμενη διπλωματική εργασία είναι μία προσπάθεια προσομοίωσης μίας εγκατάστασης διάθεσης ραδιενεργών αποβλήτων και η εκτίμηση των επιπτώσεων που μπορούν να υπάρξουν σε άτομα που κατοικούν πλησίον της. Οι στόχοι της ανάγονται στην κατανόηση της λειτουργίας μίας τέτοιας εγκατάστασης και στην όσο το δυνατόν ακριβέστερη πρόβλεψη της δόσης και του κινδύνου που αφορούν στα άτομα που κατοικούν πλησίον της. Βάσει αντίστοιχης μελέτης που παρατίθεται στο τεχνικό έγγραφο TECDOC1380 της ΙΑΕΑ, μπορεί να γίνει η σύγκριση μεταξύ εκείνων των αποτελεσμάτων και αυτών που δίνονται παραπάνω. Προφανώς, οι αρχικές συνθήκες και, γενικότερα, οι μεταβλητές που περιγράφουν τα δύο συστήματα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν ίδιες, ώστε η σύγκριση να μπορέσει να δώσει μία καθαρή οπτική σχετικά με την αλληλεπίδραση της εγκατάστασης τόσο με τον άνθρωπο, όσο και με το περιβάλλον της.

Με τη βοήθεια του λογισμικού RESRAD-OFFSITE, η πληθώρα παραγόντων που περιγράφουν ένα τέτοιο σενάριο δεν στάθηκε εμπόδιο και υπήρξε η δυνατότητα αρκετά λεπτομερούς προσδιορισμού των συνθηκών που συμβαδίζουν με το θεωρητικό σενάριο.

Από εκεί και πέρα, έλαβαν χώρα δύο αναλύσεις, μία **Ντετερμινιστική Ανάλυση (Deterministic Analysis)** και μία **Ανάλυση Αβεβαιότητας (Uncertainty Analysis)**.

### 5.1 Συμπεράσματα Ντετερμινιστικής Ανάλυσης (Deterministic Analysis Conclusions)

Εν γένει, μια **Ντετερμινιστική Ανάλυση** αποσκοπεί στην απόδειξη της ανεκτικότητας της εγκατάστασης σε εντοπισμένα σφάλματα/ κινδύνους που βρίσκονται εντός της “βάσης σχεδιασμού”, καθορίζοντας, έτσι, τα όρια της ασφαλούς λειτουργίας της. Εδώ, η βάση σχεδιασμού στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό είτε στο TECDOC1380, είτε στις μεταβλητές που είναι προεπιλεγμένες στο λογισμικό RESRAD-OFFSITE.

Εδώ, με την Ντετερμινιστική Ανάλυση δόθηκε μία πρώτη εκτίμηση της συμπεριφοράς της εγκατάστασης βάσει των παραμέτρων που εισήχθησαν στο Κεφάλαιο 3.1. Τα αποτελέσματά της, όπως αυτά φαίνονται στα Γραφήματα 1 και 2, δεικνύουν τη συνολική δόση που προκύπτει από την προσομοίωση του σεναρίου.

Η συμμετοχή του κάθε νουκλιδίου, όπως αυτή φαίνεται στα Γραφήματα 3 έως 13, περιγράφει τη συμπεριφορά του καθενός, η οποία καθορίζεται τόσο από τις συνθήκες του προβλήματος, όσο και από τα χαρακτηριστικά του ίδιου του νουκλιδίου.

Εκτός αυτού, αξίζει να γίνει μία αναφορά και στη φυσική σημασία των αποτελεσμάτων. Τα νουκλίδια με τη σημαντικότερη συνεισφορά ανά Bq διάθεσης είναι τα  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{234}\text{U}$ . Τα νουκλίδια όπως τα  $^{241}\text{Am}$  και  $^{226}\text{Ra}$ , τα οποία έχουν την κορυφή της δόσης που δίνουν σχετικά νωρίς (περί τα 1000 με 2000 έτη), όπως παρατηρείται στα Γραφήματα 3 και 10, εμφανίζουν την μεγαλύτερη δόση από όλα τα υπόλοιπα. Συγκριτικά μεγάλη δόση, αλλά με πολύ νωρίτερη κορυφή (Γράφημα 5), είναι το  $^{129}\text{I}$ . Σε κάθε ένα από τα 3 αυτά νουκλίδια, η πτώση μετά την κορυφή πέφτει σχετικά απότομα. Αντίθετα, η δόση του  $^{234}\text{U}$ , μετά την κορυφή που εμφανίζει περί τα 2500 έτη, εμφανίζει μία γραμμική πτώση σε σχέση με τον χρόνο (Γράφημα 11). Η πτώση αυτή, ωστόσο, παρατηρεί κανείς πως είναι σχετικά αργή και υπάρχει στατιστικά σημαντική δόση πέραν των 21000 ετών. Τέλος, άλλο ένα νουκλίδιο που παρουσιάζει σημαντική συνεισφορά στη συνολική δόση είναι το  $^{237}\text{Np}$ . Βάσει του Γραφήματος 6, η κορυφή της δόσης παρατηρείται περί τα 7500-8000 έτη, ενώ διακρίνεται και μία σχετική συμμετρία για εκατέρωθεν της κορυφής αυτής. Για όλα αυτά τα νουκλίδια, η έκθεση γίνεται μέσω των οδών που παρατίθενται στο Κεφάλαιο 3.4. Οι κυριότερες εξ' αυτών που συμβάλλουν σημαντικά στη διαμόρφωση της τελικής δόσης είναι το πόσιμο νερό, τα βρώσιμα φρούτα, λαχανικά (υδατογενή) και το κρέας.

## 5.2 Συμπεράσματα Ανάλυσης Αβεβαιότητας (Conclusions of Uncertainty Analysis)

Με την Ανάλυση Αβεβαιότητας, έγινε σαφές το δυσμενέστερο σενάριο, καθώς υπολογίστηκε η μέγιστη δόση. Η περιγραφή του σεναρίου μας δίνει μία πολύ καλή εκτίμηση της συμπεριφοράς της εγκατάστασης υπό τις συνθήκες του συγκεκριμένου σεναρίου. Βάσει της πιθανολογικής φύσης της ανάλυσης, μπορούν, επίσης, να παρουσιαστούν και όλα τα σενάρια μεταξύ του χειριστού και του βέλτιστου δυνατού σεναρίου.

Η ανάλυση για κάθε νουκλίδιο συνέβαλε στην αναγνώριση της συμμετοχής του καθενός στην τελική δόση. Η συμμετοχή αυτή ποικίλλει ανάλογα με τη φύση του νουκλιδίου (θυγατρικά, σταθερά  $K_d$ ), τις συγκεντρώσεις που διατίθενται, τις οδούς έκθεσης που επιλέχθηκαν κ.α.. Ανάλογα, λοιπόν, με τη συμμετοχή του κάθε νουκλιδίου στη διαμόρφωση της τελικής δόσης, αυξάνεται και η σημαντικότητά του.

Κι εδώ, ωστόσο, η μέγιστη ετήσια δόση από κάποιο νουκλίδιο δεν υπερβαίνει την τάξη μεγέθους των  $1\text{E}-10\text{ mSv}$ , όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 4.2. Όπως παρατηρείται στο κεφάλαιο αυτό, τα νουκλίδια που δίνουν τη μεγαλύτερη μέγιστη δόση είναι τα εξής:  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ . Από εκεί και πέρα, μπορεί να γίνει μία διαπίστωση σχετικά με τη διακύμανση των αποτελεσμάτων (δόση ανά Bq). Παρατηρείται πως από την ελάχιστη στη μέγιστη τιμή, η διαφορά είναι περί των 5-6 τάξεων μεγέθους, ποσό που χαρακτηρίζεται διόλου ευκαταφρόνητο. Τέλος, βάσει και του

αρχικού στόχου της εργασίας, αξίζει να γίνει αναφορά και στη σύγκριση μεταξύ των δύο ομάδων αποτελεσμάτων. Βάσει του Πίνακα 22, παρατηρείται πως τα αποτελέσματα της εργασίας είναι εν γένει αρκετά κοντά σε εκείνα του ΔΟΑΕ. Κάποια διαφορά μεταξύ των δύο είναι λογική και αναμενόμενη, βάσει των αρχικών συνθηκών που χρησιμοποιήθηκαν εδώ και φυσικά της χρήσης του λογισμικού. Πιο συγκεκριμένα, όμως, ο λόγος που υπολογίστηκε και παρατίθεται στον Πίνακα 22 είναι για την πλειονότητα των νουκλιδίων θετικός, δηλαδή η Συγκέντρωση που υπολόγισε ο ΔΟΑΕ είναι γενικά μεγαλύτερος από εκείνη που υπολογίστηκε στα πλαίσια της εργασίας. Συνεπώς, μπορεί να γίνει η παραδοχή πως έγινε μία υποεκτίμηση της δόσης ανά Βq. Αυτό σημαίνει πως υπάρχει αρκετό περιθώριο για διάθεση μεγαλύτερων ποσοτήτων και ενεργοτήτων των συγκεκριμένων νουκλιδίων στη συγκεκριμένη εγκατάσταση υπό τις προαναφερθείσες συνθήκες.

### **5.3 Συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας**

---

Συνοψίζοντας, ραδιενεργά απόβλητα παράγονται και αποθηκεύονται στις περισσότερες χώρες του κόσμου, από πολλές και διάφορες διεργασίες δευτερογενούς τομέα. Συνεπώς, η διαχείρισή τους αποτελεί ένα μείζον θέμα για κάθε κράτος, τόσο για λόγους ασφαλείας των κατοίκων του, όσο και για την προστασία των εγκαταστάσεών του.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της εργασίας με εκείνα του TECDOC1380, παρατηρεί κανείς πως τα αποτελέσματα διαφέρουν. Η διαφορά αυτή δεικνύει την μεγάλη σημασία που μπορεί να έχουν οι παράμετροι, οι παραδοχές και το μοντέλο που χρησιμοποιούνται για τέτοια ανάλυση. Φαίνεται επίσης ότι η ντετερμινιστική ανάλυση με βάση κάποιες αντιπροσωπευτικές-μέσες τιμές ενδέχεται να δώσει αποτελέσματα που μπορεί να είναι σημαντικά μακριά από τη μέγιστη πιθανή έκθεση. Ως εκ τούτου, θεωρείται ως καταλληλότερη προσέγγιση η ανάλυση αβεβαιότητας, με όσο, ωστόσο, μικρότερο εύρος διακύμανσης των παραμέτρων βάσει πραγματικών στοιχείων και μελετών για την περιοχή και τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της.

## 6. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Τα ραδιονουκλίδια που διατίθενται στην εγκατάσταση και ο χρόνος ημιζωής τους.....	14
Πίνακας 2: Βασικοί συντελεστές μεταφοράς νουκλιδίων.....	26
Πίνακας 3: Συντελεστές μεταφοράς νουκλιδίου.....	28
Πίνακας 4: Χρόνοι αποθήκευσης βρώσιμων/πόσιμων συστατικών.....	29
Πίνακας 5: Διάταξη της εγκατάστασης.....	29
Πίνακας 6: Μεταβλητές Πρωτογενούς Ρύπανσης.....	30
Πίνακας 7: Μεταβλητές Καλύμματος από χώμα πάνω από την PCZ.....	31
Πίνακας 8: Μεταβλητές Γεωργικών, Κτηνοτροφικών περιοχών και της Κατοικίας.....	32
Πίνακας 9: Μεταβλητές Χρήσης Νερού.....	33
Πίνακας 10: Διάβρωση σε τοποθεσίες της εγκατάστασης.....	34
Πίνακας 11: Μεταβλητές Ακόρεστης Ζώνης.....	35
Πίνακας 12: Μεταβλητές Κορεσμένης Ζώνης.....	35
Πίνακας 13: Υδραυλικές Μεταβλητές της Κορεσμένης Ζώνης.....	35
Πίνακας 14: Ρυθμοί Κατανάλωσης.....	36
Πίνακας 15: Παράγοντες Χλωρίδας.....	36
Πίνακας 16: Καταναλώσεις Ζώων.....	37
Πίνακας 17: Παράγοντες Προσλήψεων Ζώων.....	37
Πίνακας 18: Κλάσματα Χρόνου Ανθρώπινης Συμπεριφοράς.....	38
Πίνακας 19: Στατιστικά Στοιχεία των Μεταβλητών της Ανάλυσης Αβεβαιότητας.....	39
Πίνακας 20: Συσχετίσεις Μεταβλητών.....	40
Πίνακας 21: Σύγκριση Αποτελεσμάτων Ντετερμινιστικής Ανάλυσης και TECDOC1380.....	51
Πίνακας 22: Αποτελέσματα της Ανάλυσης Αβεβαιότητας.....	56



## 7. Κατάλογος Εικόνων

<b>Εικόνα 1:</b> Ταξινόμηση Ραδιενεργών Αποβλήτων σε σχέση με τον χρόνο ημιζωής τους.....	5
<b>Εικόνα 2:</b> Αναπαράσταση πρωτογενούς ρύπανσης και κορεσμένων ζωνών.....	19
<b>Εικόνα 3:</b> Κινητοί και Ακίνητοι Πόροι.....	20
<b>Εικόνα 4:</b> Σχηματική αναπαράσταση των οδών έκθεσης στον RESRAD-OFFSITE.....	24

## 8. Κατάλογος Γραφημάτων

<b>Γράφημα 1:</b> Συνολική δόση για όλα τα νουκλίδια συναρτήσει του χρόνου έκθεσης (Deterministic Analysis).....	43
<b>Γράφημα 2:</b> Συνολική δόση για όλα τα νουκλίδια με διακεκριμένες τιμές για κάθε οδό έκθεσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης (Deterministic Analysis).....	44
<b>Γράφημα 3:</b> Συμμετοχή του $^{241}\text{Am}$ και των θυγατρικών του στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου.....	45
<b>Γράφημα 4:</b> Συμμετοχή του $^{14}\text{C}$ στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου.....	45
<b>Γράφημα 5:</b> Συμμετοχή του $^{129}\text{I}$ στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου.....	46
<b>Γράφημα 6:</b> Συμμετοχή του $^{237}\text{Np}$ και των θυγατρικών του στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου.....	46
<b>Γράφημα 7:</b> Συμμετοχή του $^{238}\text{Pu}$ και των θυγατρικών του στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου.....	47
<b>Γράφημα 8:</b> Συμμετοχή του $^{239}\text{Pu}$ και των θυγατρικών του στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου.....	47
<b>Γράφημα 9:</b> Συμμετοχή του $^{240}\text{Pu}$ και των θυγατρικών του στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου.....	48
<b>Γράφημα 10:</b> Συμμετοχή του $^{226}\text{Ra}$ και των θυγατρικών του στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου.....	48
<b>Γράφημα 11:</b> Συμμετοχή του $^{234}\text{U}$ και των θυγατρικών του στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου.....	49
<b>Γράφημα 12:</b> Συμμετοχή του $^{235}\text{U}$ και των θυγατρικών του στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου.....	49
<b>Γράφημα 13:</b> Συμμετοχή του $^{238}\text{U}$ και των θυγατρικών του στη συνολική δόση συναρτήσει του χρόνου.....	50
<b>Γράφημα 14:</b> Κίνδυνος ανάπτυξης καρκίνου για άτομο που λαμβάνει δόση από την εγκατάσταση συναρτήσει του χρόνου έκθεσης (Deterministic Analysis).....	53
<b>Γράφημα 15:</b> Συνολική δόση λόγω $^{241}\text{Am}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	59
<b>Γράφημα 16:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{241}\text{Am}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	59

<b>Γράφημα 17:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{241}\text{Am}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	59
<b>Γράφημα 18:</b> Συνολική δόση λόγω $^{14}\text{C}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	60
<b>Γράφημα 19:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{14}\text{C}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	60
<b>Γράφημα 20:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{14}\text{C}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	60
<b>Γράφημα 21:</b> Συνολική δόση λόγω $^{129}\text{I}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	61
<b>Γράφημα 22:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{129}\text{I}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	61
<b>Γράφημα 23:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{129}\text{I}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	61
<b>Γράφημα 24:</b> Συνολική δόση λόγω $^{237}\text{Np}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	62
<b>Γράφημα 25:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{237}\text{Np}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	62
<b>Γράφημα 26:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{237}\text{Np}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	62
<b>Γράφημα 27:</b> Συνολική δόση λόγω $^{239}\text{Pu}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	63
<b>Γράφημα 28:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{239}\text{Pu}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	63
<b>Γράφημα 29:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{239}\text{Pu}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	63
<b>Γράφημα 30:</b> Συνολική δόση λόγω $^{226}\text{Ra}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	64
<b>Γράφημα 31:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{226}\text{Ra}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	64
<b>Γράφημα 32:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{226}\text{Ra}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	64
<b>Γράφημα 33:</b> Συνολική δόση λόγω $^{232}\text{Th}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	65
<b>Γράφημα 34:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{232}\text{Th}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	65
<b>Γράφημα 35:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{232}\text{Th}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	65

<b>Γράφημα 36:</b> Συνολική δόση λόγω $^{234}\text{U}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	66
<b>Γράφημα 37:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{234}\text{U}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	66
<b>Γράφημα 38:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{234}\text{U}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	66
<b>Γράφημα 39:</b> Συνολική δόση λόγω $^{235}\text{U}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	67
<b>Γράφημα 40:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{235}\text{U}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	67
<b>Γράφημα 41:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{235}\text{U}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	67
<b>Γράφημα 42:</b> Συνολική δόση λόγω $^{238}\text{U}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	68
<b>Γράφημα 43:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{238}\text{U}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	68
<b>Γράφημα 44:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{238}\text{U}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	68
<b>Γράφημα 45:</b> Συνολική δόση λόγω $^{41}\text{Ca}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	83
<b>Γράφημα 46:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{41}\text{Ca}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	83
<b>Γράφημα 47:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{41}\text{Ca}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	83
<b>Γράφημα 48:</b> Συνολική δόση λόγω $^{60}\text{Co}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	84
<b>Γράφημα 49:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{60}\text{Co}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	84
<b>Γράφημα 50:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{60}\text{Co}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	84
<b>Γράφημα 51:</b> Συνολική δόση λόγω $^{134}\text{Cs}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	85
<b>Γράφημα 52:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{134}\text{Cs}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	85
<b>Γράφημα 53:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{134}\text{Cs}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	85
<b>Γράφημα 54:</b> Συνολική δόση λόγω $^{137}\text{Cs}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	86

<b>Γράφημα 55:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{137}\text{Cs}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	86
<b>Γράφημα 56:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{137}\text{Cs}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	86
<b>Γράφημα 57:</b> Συνολική δόση λόγω $^{55}\text{Fe}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	87
<b>Γράφημα 58:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{55}\text{Fe}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	87
<b>Γράφημα 59:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{55}\text{Fe}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	87
<b>Γράφημα 60:</b> Συνολική δόση λόγω $^3\text{H}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	88
<b>Γράφημα 61:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^3\text{H}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	88
<b>Γράφημα 62:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^3\text{H}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	88
<b>Γράφημα 63:</b> Συνολική δόση λόγω $^{94}\text{Nb}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	89
<b>Γράφημα 64:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{94}\text{Nb}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	89
<b>Γράφημα 65:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{94}\text{Nb}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	89
<b>Γράφημα 66:</b> Συνολική δόση λόγω $^{59}\text{Ni}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	90
<b>Γράφημα 67:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{59}\text{Ni}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	90
<b>Γράφημα 68:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{59}\text{Ni}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	90
<b>Γράφημα 69:</b> Συνολική δόση λόγω $^{63}\text{Ni}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	91
<b>Γράφημα 70:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{63}\text{Ni}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	91
<b>Γράφημα 71:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{63}\text{Ni}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	91
<b>Γράφημα 72:</b> Συνολική δόση λόγω $^{238}\text{Pu}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	92
<b>Γράφημα 73:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{238}\text{Pu}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	92

<b>Γράφημα 74:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{238}\text{Pu}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	92
<b>Γράφημα 75:</b> Συνολική δόση λόγω $^{240}\text{Pu}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	93
<b>Γράφημα 76:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{240}\text{Pu}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	93
<b>Γράφημα 77:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{240}\text{Pu}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	93
<b>Γράφημα 78:</b> Συνολική δόση λόγω $^{241}\text{Pu}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	94
<b>Γράφημα 79:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{241}\text{Pu}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	94
<b>Γράφημα 80:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{241}\text{Pu}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	94
<b>Γράφημα 81:</b> Συνολική δόση λόγω $^{228}\text{Ra}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	95
<b>Γράφημα 82:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{228}\text{Ra}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	95
<b>Γράφημα 83:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{228}\text{Ra}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	95
<b>Γράφημα 84:</b> Συνολική δόση λόγω $^{151}\text{Sm}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	96
<b>Γράφημα 85:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{151}\text{Sm}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	96
<b>Γράφημα 86:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{151}\text{Sm}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	96
<b>Γράφημα 87:</b> Συνολική δόση λόγω $^{90}\text{Sr}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	97
<b>Γράφημα 88:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{90}\text{Sr}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	97
<b>Γράφημα 89:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{90}\text{Sr}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	97
<b>Γράφημα 90:</b> Συνολική δόση λόγω $^{99}\text{Tc}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	98
<b>Γράφημα 91:</b> Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του $^{99}\text{Tc}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	98
<b>Γράφημα 92:</b> Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω $^{99}\text{Tc}$ και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....	98

**Γράφημα 93:** Συνολική δόση λόγω  $^{93}\text{Zr}$  και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....99

**Γράφημα 94:** Διάμεση τιμή της συνολικής δόσης λόγω του  $^{93}\text{Zr}$  και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....99

**Γράφημα 95:** Μέση τιμή της συνολικής δόσης λόγω  $^{93}\text{Zr}$  και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου.....99

## 9.Βιβλιογραφία – Κατάλογος Αναφορών

IAEA, Technical Document 1097 - *Maintenance of records for radioactive waste disposal*, Βιέννη, Ιούλιος 1999

IAEA και OECD-NEA, *Geological Disposal of Radioactive Waste*, Βιέννη, 2006

IAEA και Πρόγραμμα Περιβάλλοντος Ηνωμένων Εθνών(UN Environment Programme), *Radiation Protection of the Public and the Environment*, Βιέννη, 2018

IAEA και Διεθνής Οργάνωση Εργασίας(ILO), *Occupational Radiation Protection*, Βιέννη, 2018

IAEA, Technical Document 1380 - *Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities*, Βιέννη, Δεκέμβριος 2003

IAEA, Technical Reports Series No. 472 - *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments*, Βιέννη, Ιανουάριος 2010

IAEA, Technical Reports Series No. 364 - *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments*, Βιέννη, Νοέμβριος 2008

IAEA, *Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities Volume 1 : Review and enhancement of safety assessment approaches and tools*, Βιέννη, Ιούλιος 2004

IAEA, *Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, Volume 2 : Test Cases*, Βιέννη, Ιούλιος 2004

IAEA, *Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste*, Βιέννη, 2014

IAEA, *The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste*, Βιέννη, 2012

E. Gnanapragasam, J.-J. Cheng, D. LePoire, S. Kamboj, και C. Wang, *User's Manual for RESRAD - OFFSITE Code Version 4*, U.S.NRC – Εθνικό Εργαστήριο Argonne, Λεμόντ, Σικάγο, Φεβρουάριος 2020

S. Kamboj, E. Gnanapragasam, J.-J. Cheng, D. LePoire, C. Wang, B. Biber και C. Yu, *Default Parameter Values in RESRAD-ONSITE V7.2, RESRAD-BUILD V3.5, and RESRAD-OFFSITE V4.0*



*Computer Codes*, U.S.NRC – Εθνικό Εργαστήριο Argonne , Λεμόντ, Σικάγο, Φεβρουάριος 2020

J.-J. Cheng, S. Kamboj, E. Gnanapragasam, and C. Yu, Benchmarking the New RESRAD-OFFSITE Source Term Model with DUST-MS and GoldSim – 13377, Εθνικό Εργαστήριο Argonne, WM2013 Συνέδριο, Φοίνιξ, Αριζόνα, ΗΠΑ, Φεβρουάριος 2013

J. Vives i Batlle, L. Sweeck, J. Wannjin, H. Vandenhove, *Environmental risks of radioactive discharges from a low-level radioactive waste disposal site at Dessel, Belgium*, Belgian Nuclear Research Centre (SCK-CEN), Boeretang, Βέλγιο, Ιούνιος 2016

P. Poškas, R. Kilda, A. Šimonis, H. Jouhara, R. Poškas, *Disposal of very low-level radioactive waste: Lithuanian case on the approach and long-term safety aspects*, Λιθουανικό Ινστιτούτο Ενέργειας, Εργαστήριο Πυρηνικής Μηχανικής, Κάουνας, Λιθουανία, Πανεπιστήμιο Brunel του Λονδίνου, Ινστιτούτο Ενεργειακού Μέλλοντος, Κολλέγιο Μηχανικής, Σχεδιαστικές και Φυσικές Επιστήμες, Uxbridge, Ηνωμένο Βασίλειο, Φεβρουάριος 2019

Elizabeth M. Pontedeiro, Paulo F. Heilbron, Jesus Perez-Guerrero, Jian Su, Martinus Th. van Genuchten, *Reassessment of the Goiânia radioactive waste repository in Brazil using HYDRUS-1D*, Τμήμα Πυρηνικής Μηχανικής, Ομοσπονδιακό Πανεπιστήμιο του Ρίο Ντε Τζανέιρο(UFRJ), Ρίο Ντε Τζανέιρο, Βραζιλία, Τμήμα Επιστημών της Γης, Πανεπιστήμιο της Ουτρέχτης, Ουτρέχτη, Ολλανδία, Βραζιλιάνικη Επιτροπή Πυρηνικής Ενέργειας(CNEN), Ρίο Ντε Τζανέιρο, Βραζιλία, Κέντρο για Περιβαλλοντικές Μελέτες(CEA), Πανεπιστήμιο του São Paulo(UNESP), Ρίο Κλάρο, Βραζιλία, Αύγουστος 2017

<https://ukinventory.nda.gov.uk/about-radioactive-waste/how-do-we-manage-radioactive-waste/>, Τελευταία επίσκεψη: 14 Ιουνίου 2022

<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx>, Τελευταία επίσκεψη: 14 Ιουνίου 2022

<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-waste/storage-and-disposal-of-radioactive-waste.aspx>, Τελευταία επίσκεψη: 17 Ιουνίου 2022

<https://eeae.gr/%CE%B1%CF%83%CF%86%CE%AC%CE%BB%CE%B5%CE%B9%CE%B1-%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CF%8E%CE%BD/%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CF%87%CE%B5%CE%AF%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B7-%CF%81%CE%B1%CE%B4%CE%B9%CE%B5%CE%BD%CE%B5%CF%81%CE%B3%CF%8E%CE>

[%BD-%CE%B1%CF%80%CE%BF%CE%B2%CE%BB%CE%AE%CF%84%CF%89%CE%BD,](#)  
Τελευταία επίσκεψη: 24 Ιουνίου 2022

<https://eeae.gr/%CE%B1%CF%83%CF%86%CE%AC%CE%BB%CE%B5%CE%B9%CE%B1-%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CF%8E%CE%BD/%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CF%87%CE%B5%CE%AF%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B7-%CF%81%CE%B1%CE%B4%CE%B9%CE%B5%CE%BD%CE%B5%CF%81%CE%B3%CF%8E%CE%BD-%CE%B1%CF%80%CE%BF%CE%B2%CE%BB%CE%AE%CF%84%CF%89%CE%BD/15-%CE%B5%CF%81%CF%89%CF%84%CE%AE%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CE%B1%CF%80%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AE%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82-%CE%B3%CE%B9%CE%B1-%CF%84%CE%B7-%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CF%87%CE%B5%CE%AF%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B7-%CF%84%CF%89%CE%BD-%CF%81%CE%B1%CE%B4%CE%B9%CE%B5%CE%BD%CE%B5%CF%81%CE%B3%CF%8E%CE%BD-%CE%B1%CF%80%CE%BF%CE%B2%CE%BB%CE%AE%CF%84%CF%89%CE%BD-%CF%83%CF%84%CE%B7-%CF%87%CF%8E%CF%81%CE%B1>, Τελευταία επίσκεψη: 24 Ιουνίου 2022

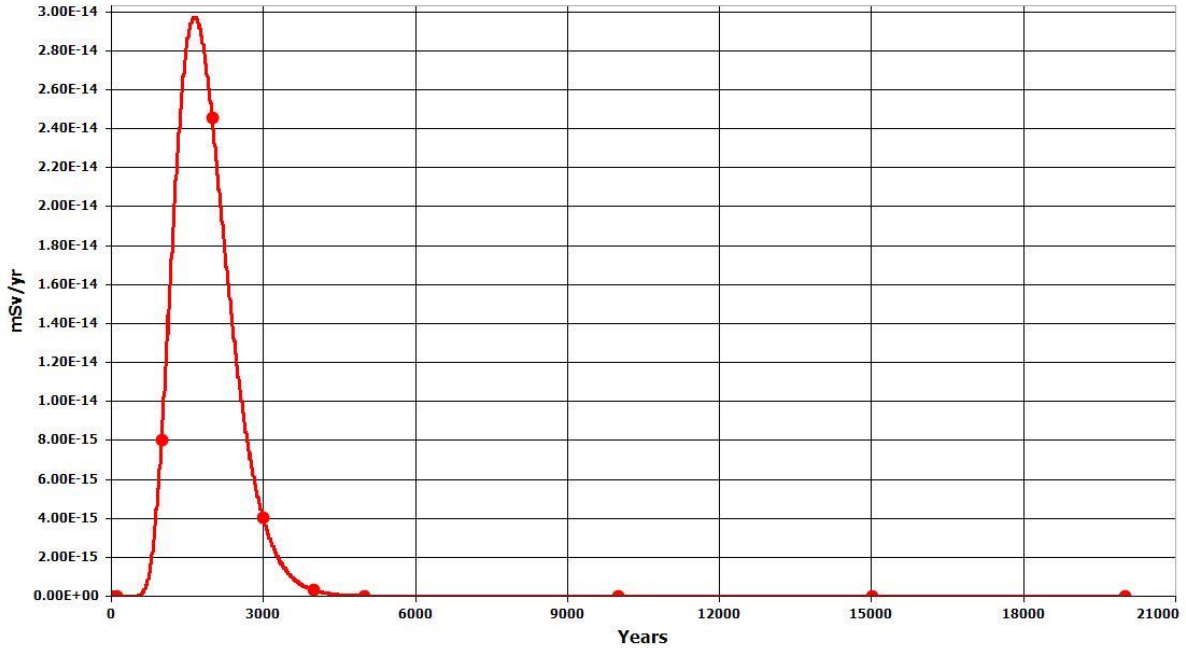
[https://en.wikipedia.org/wiki/Radioactive\\_waste#cite\\_note-84](https://en.wikipedia.org/wiki/Radioactive_waste#cite_note-84), Τελευταία επίσκεψη: 5 Σεπτεμβρίου 2022

<https://web.archive.org/web/20100710055339/http://www.issues.org/22.4/peterson.html>, Τελευταία επίσκεψη: 10 Σεπτεμβρίου 2022

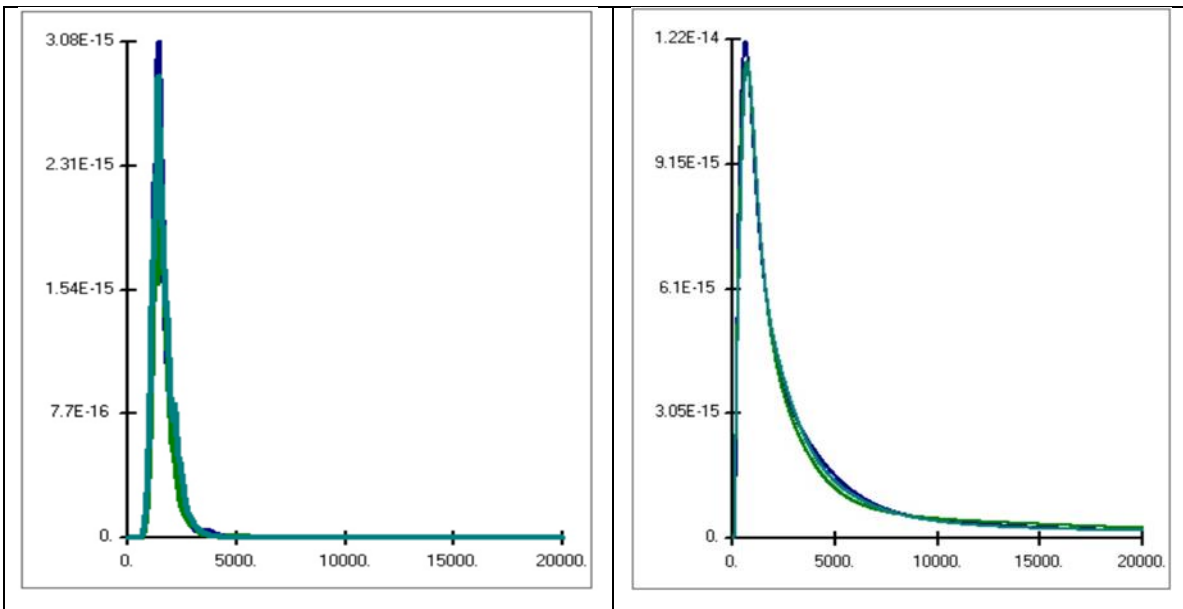
## 10. Παράρτημα

<sup>41</sup>Ca

DOSE: All Nuclides Summed, All Pathways Summed

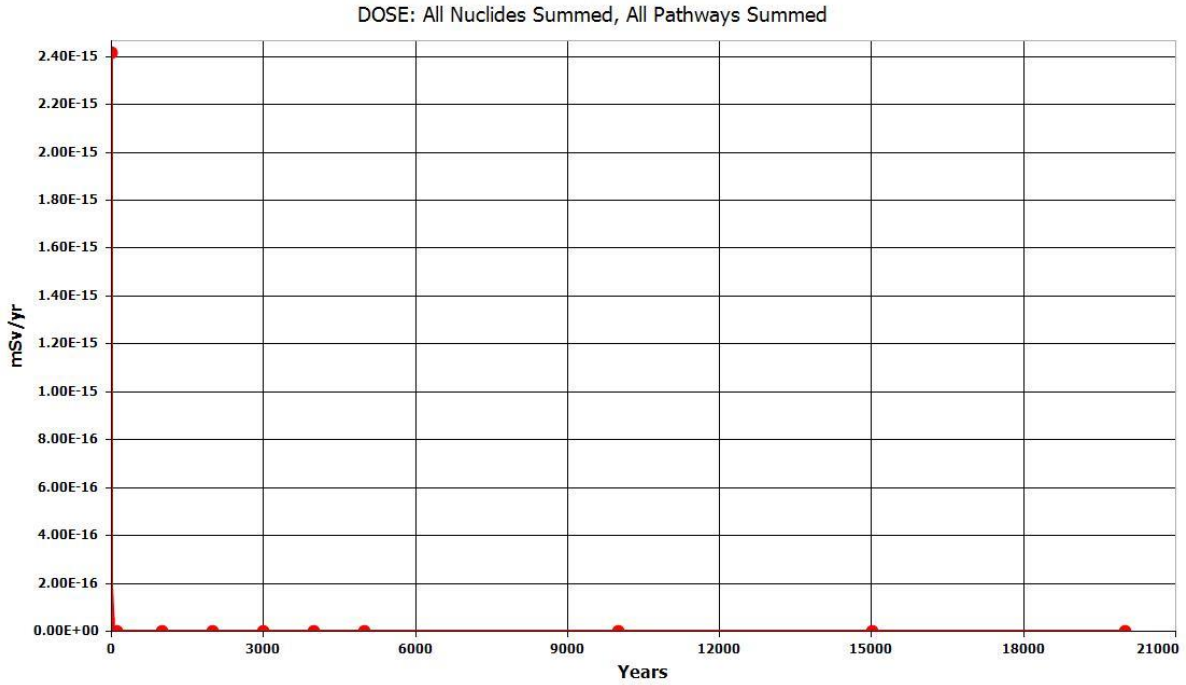


Γράφημα 45: Συνολική δόση λόγω του <sup>41</sup>Ca συναρτήσει του χρόνου

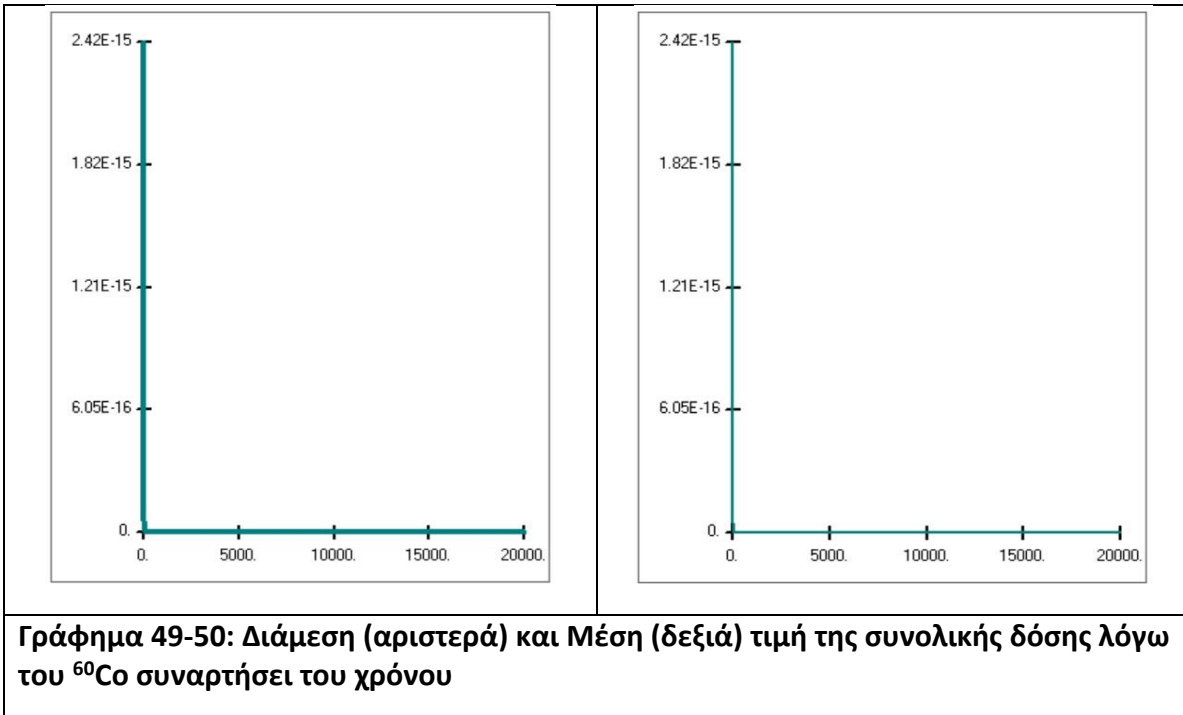


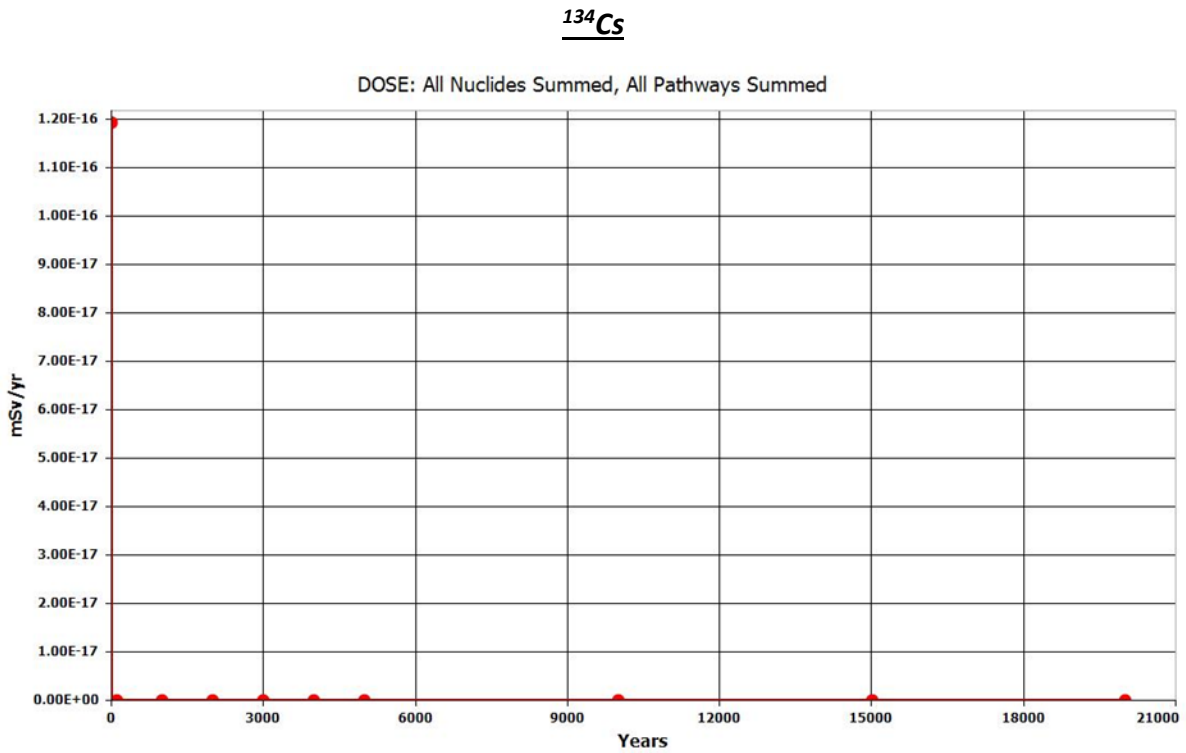
Γράφημα 46-47: Διάμεση (αριστερά) και Μέση (δεξιά) τιμή της συνολικής δόσης λόγω του <sup>41</sup>Ca συναρτήσει του χρόνου

$^{60}\text{Co}$

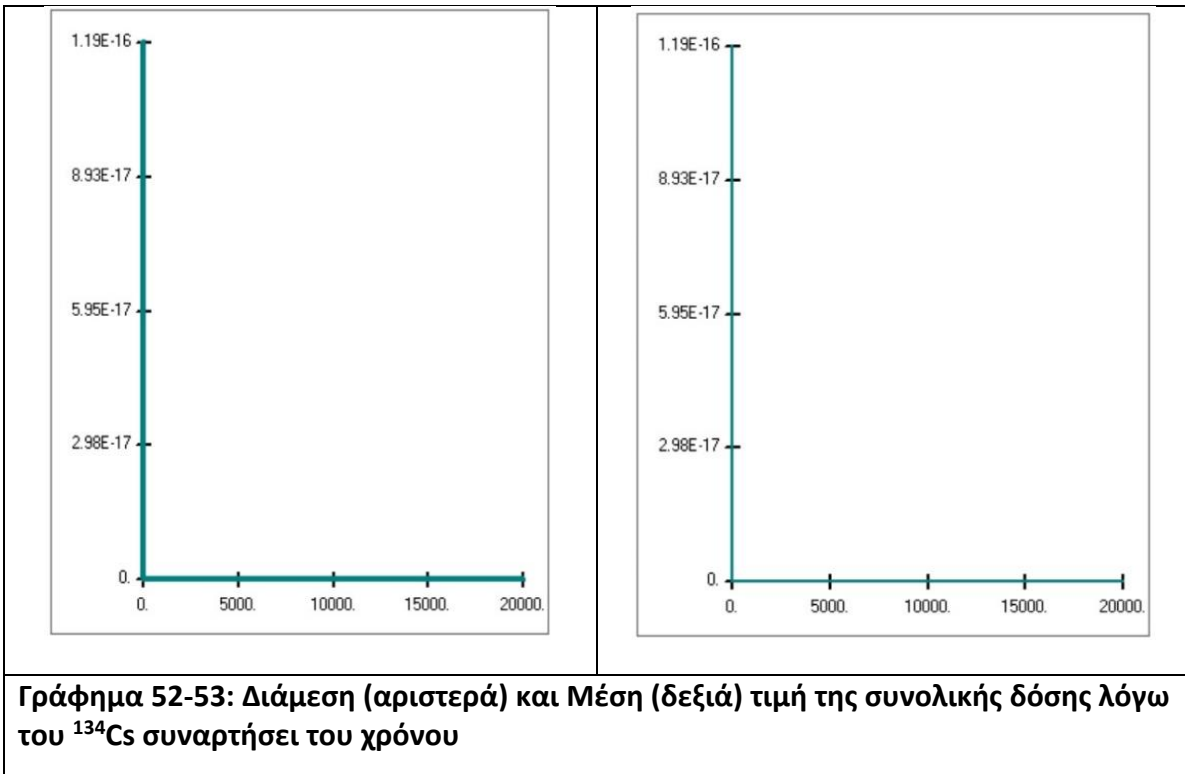


Γράφημα 48: Συνολική δόση λόγω του  $^{60}\text{Co}$  συναρτήσει του χρόνου



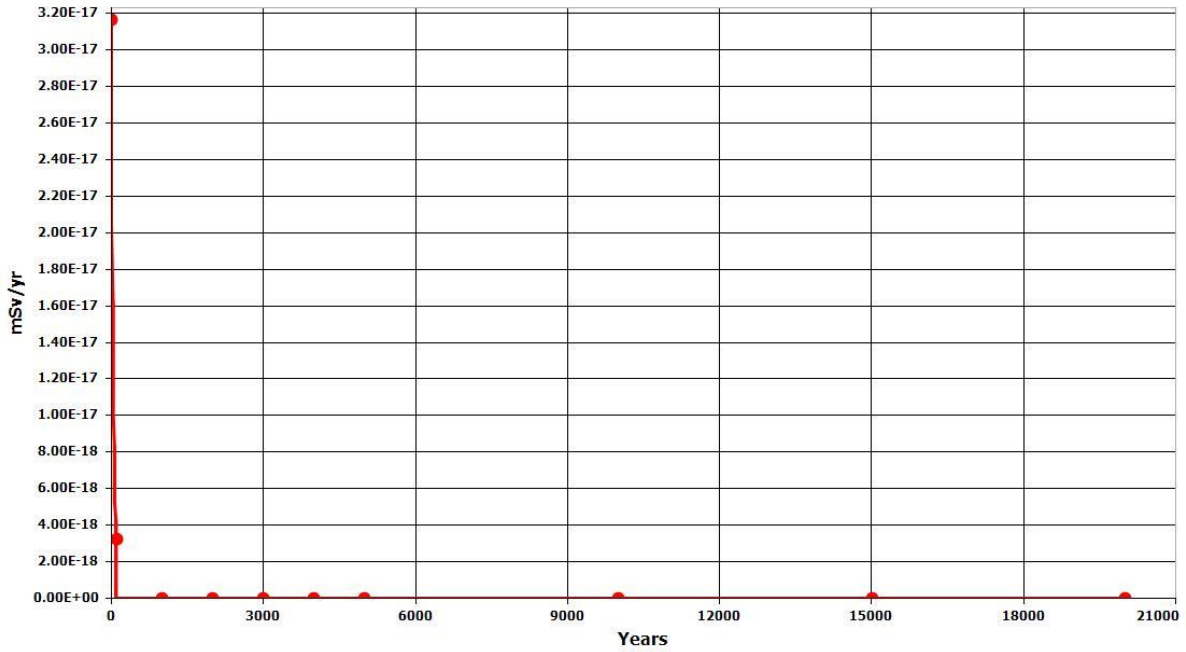


Γράφημα 51: Συνολική δόση λόγω του <sup>134</sup>Cs συναρτήσει του χρόνου

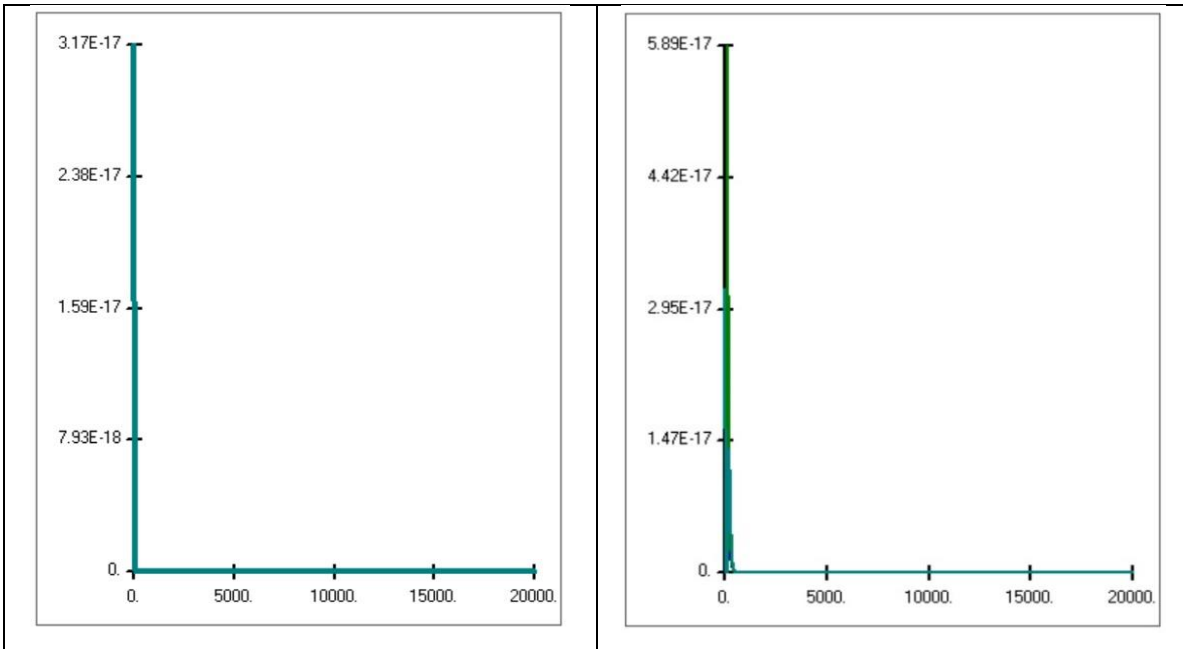


**<sup>137</sup>Cs**

DOSE: All Nuclides Summed, All Pathways Summed

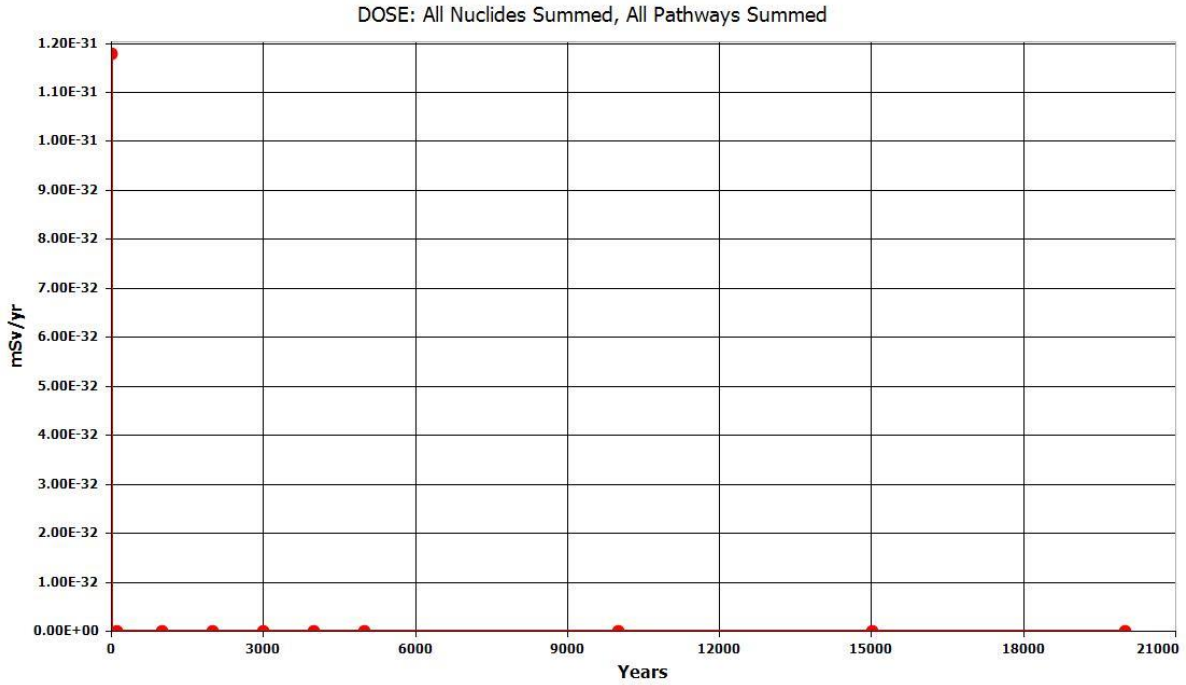


Γράφημα 54: Συνολική δόση λόγω του <sup>137</sup>Cs συναρτήσει του χρόνου

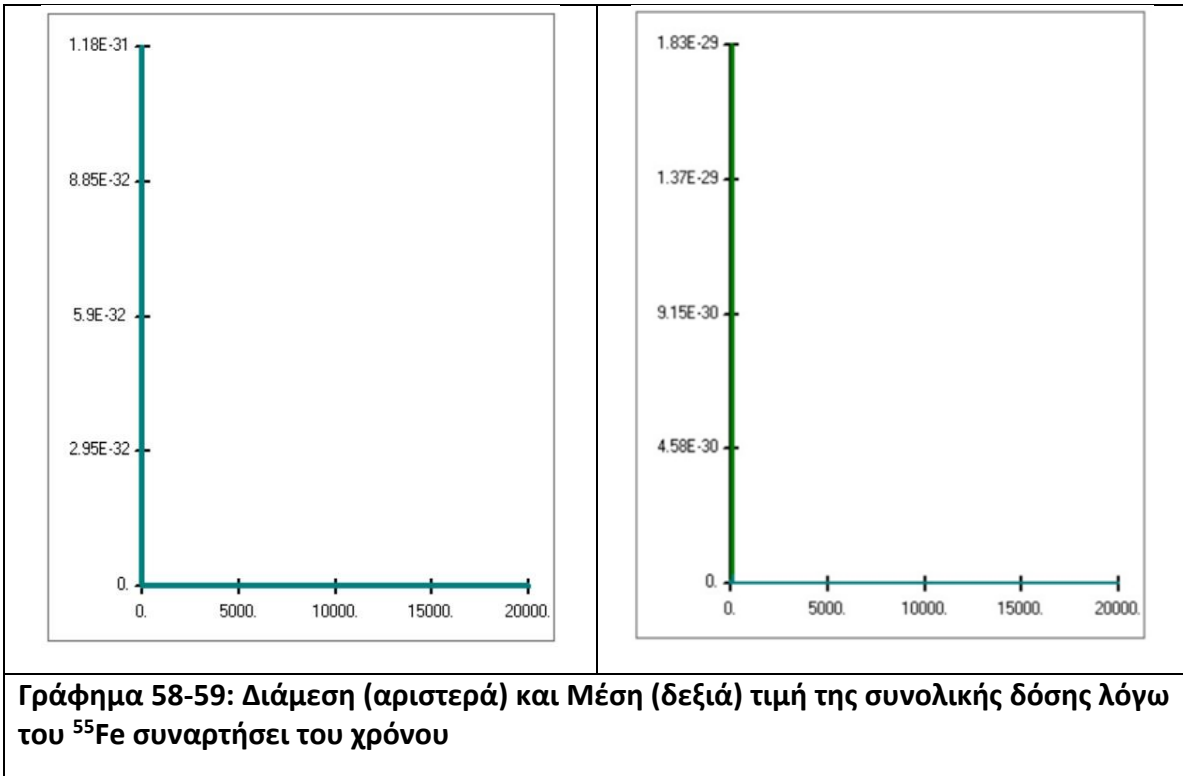


Γράφημα 55-56: Διάμεση (αριστερά) και Μέση (δεξιά) τιμή της συνολικής δόσης λόγω του <sup>137</sup>Cs συναρτήσει του χρόνου

<sup>55</sup>Fe

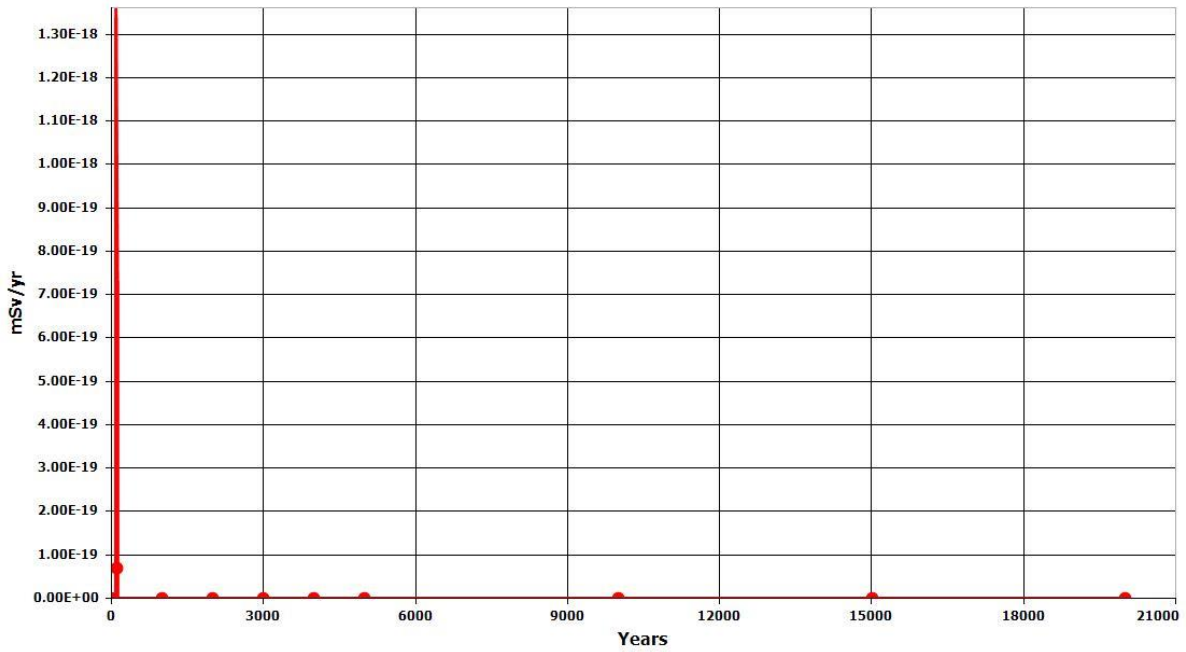


Γράφημα 57: Συνολική δόση λόγω του <sup>55</sup>Fe συναρτήσει του χρόνου

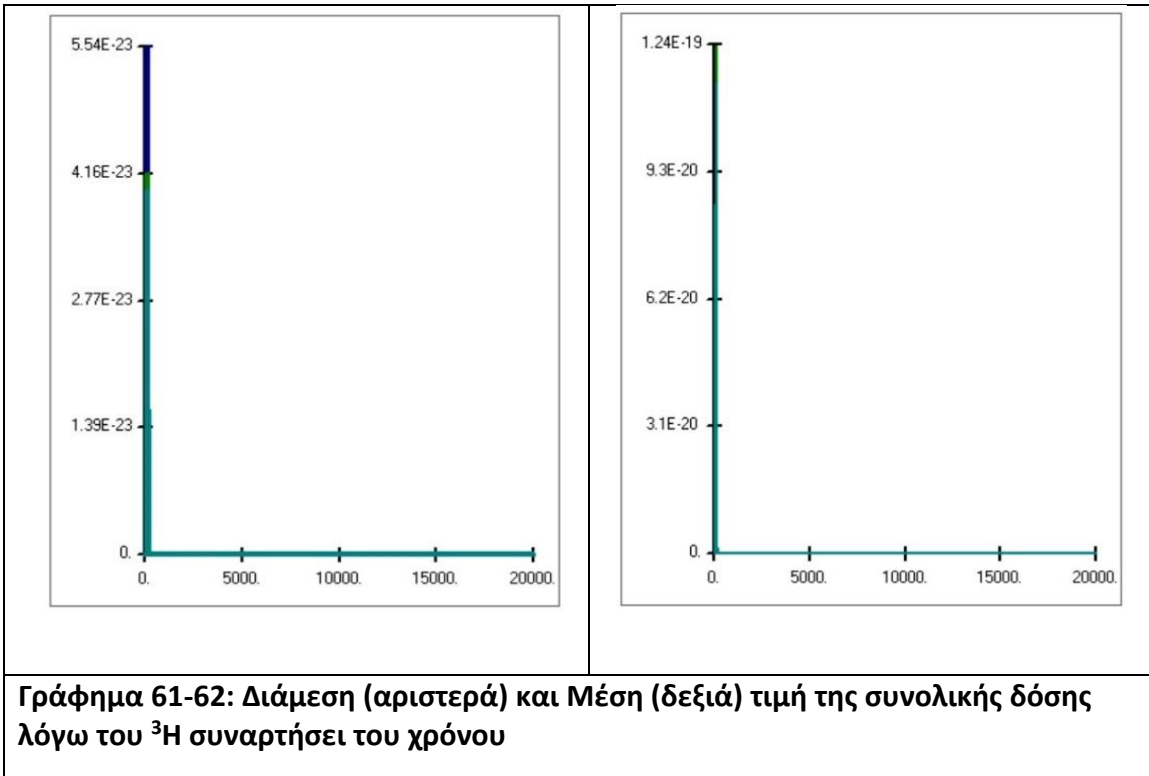


**$^3\text{H}$**

DOSE: All Nuclides Summed, All Pathways Summed



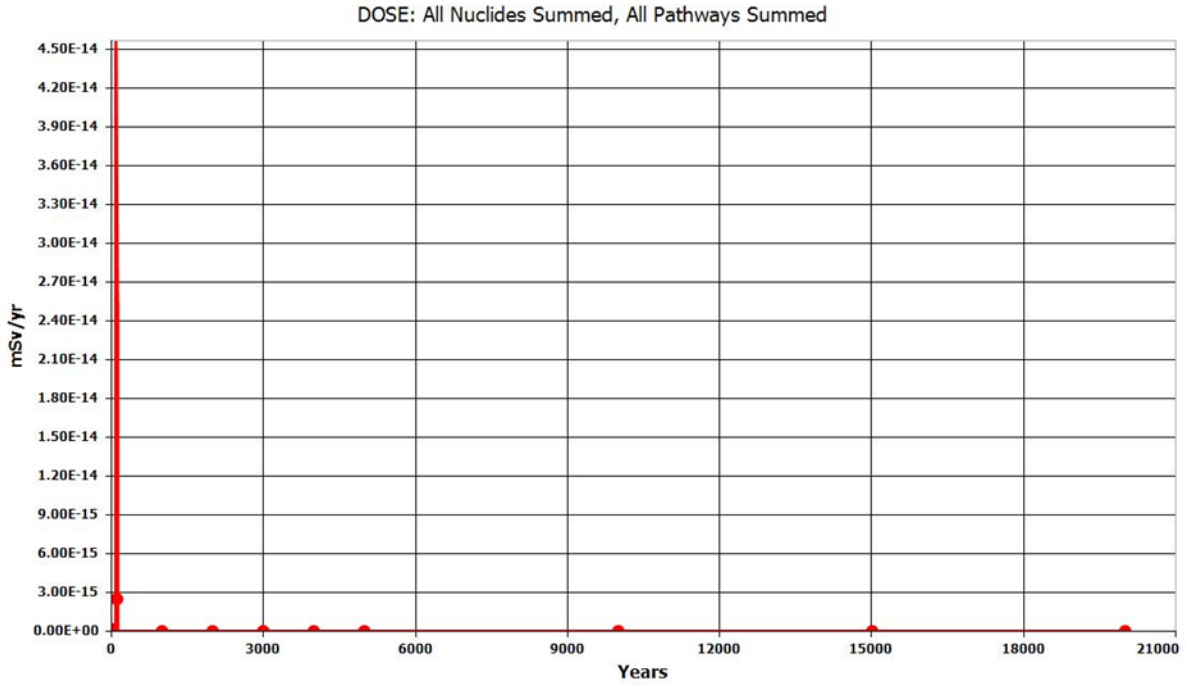
Γράφημα 60: Συνολική δόση λόγω του  $^3\text{H}$  συναρτήσει του χρόνου



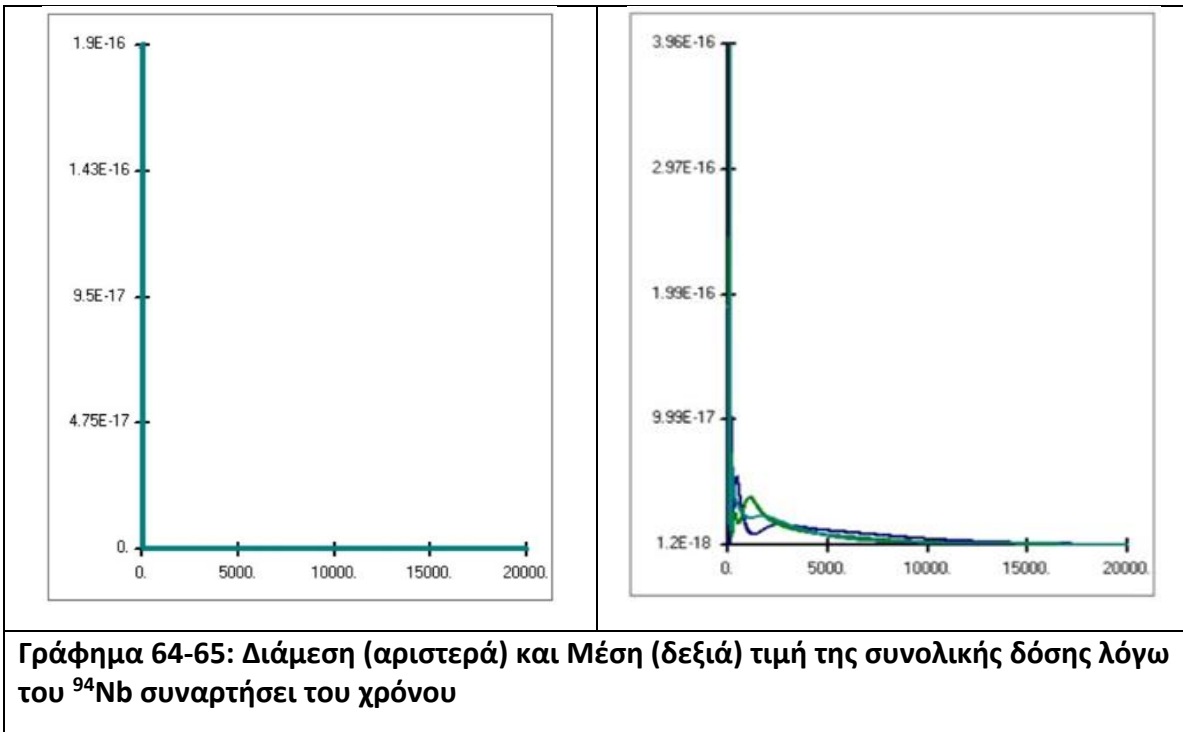
Γράφημα 61-62: Διάμεση (αριστερά) και Μέση (δεξιά) τιμή της συνολικής δόσης λόγω του  $^3\text{H}$  συναρτήσει του χρόνου



**<sup>94</sup>Nb**

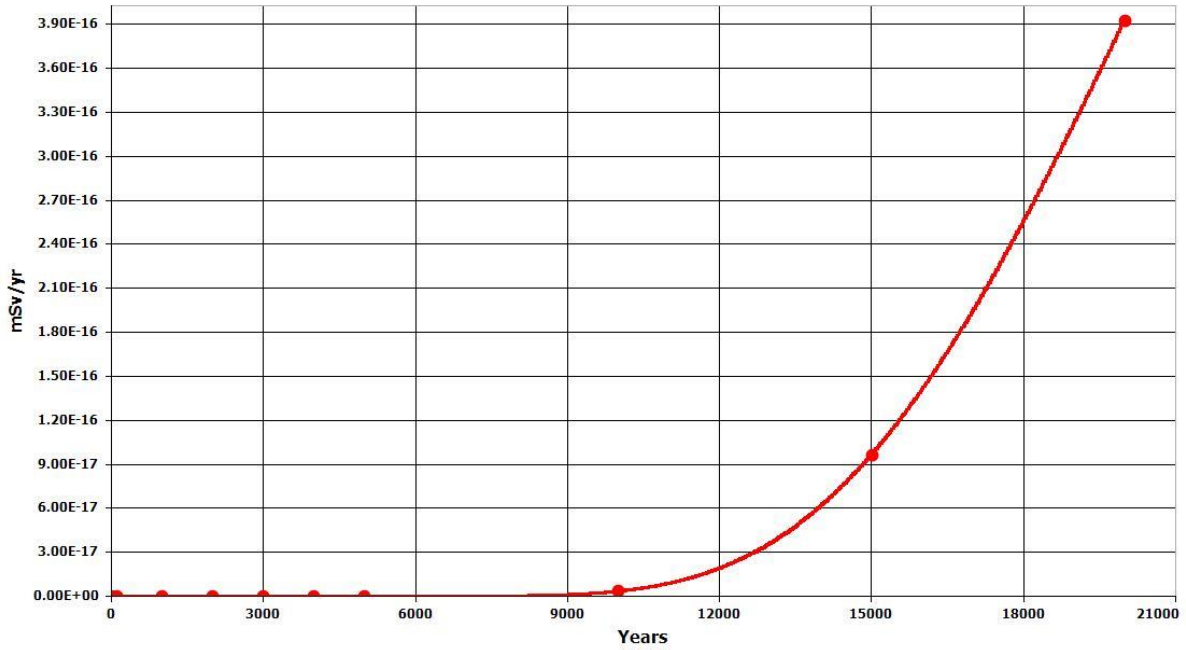


Γράφημα 63: Συνολική δόση λόγω του <sup>94</sup>Nb συναρτήσει του χρόνου

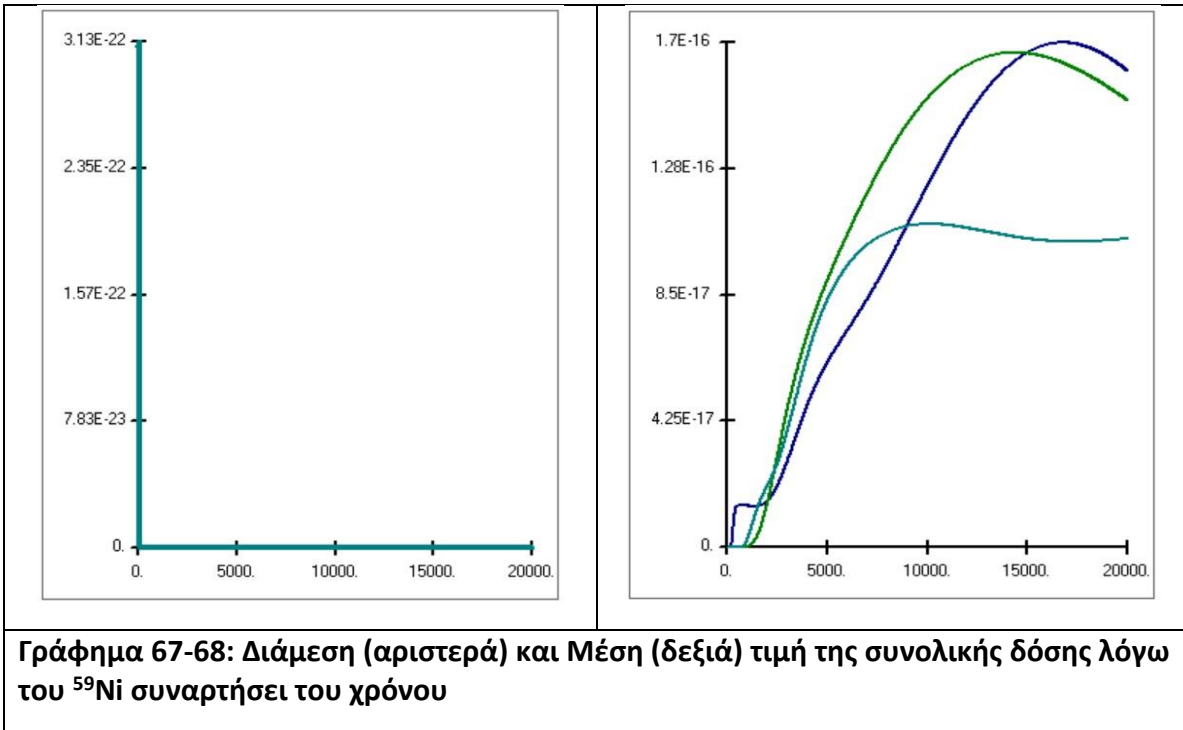


**<sup>59</sup>Ni**

DOSE: All Nuclides Summed, All Pathways Summed

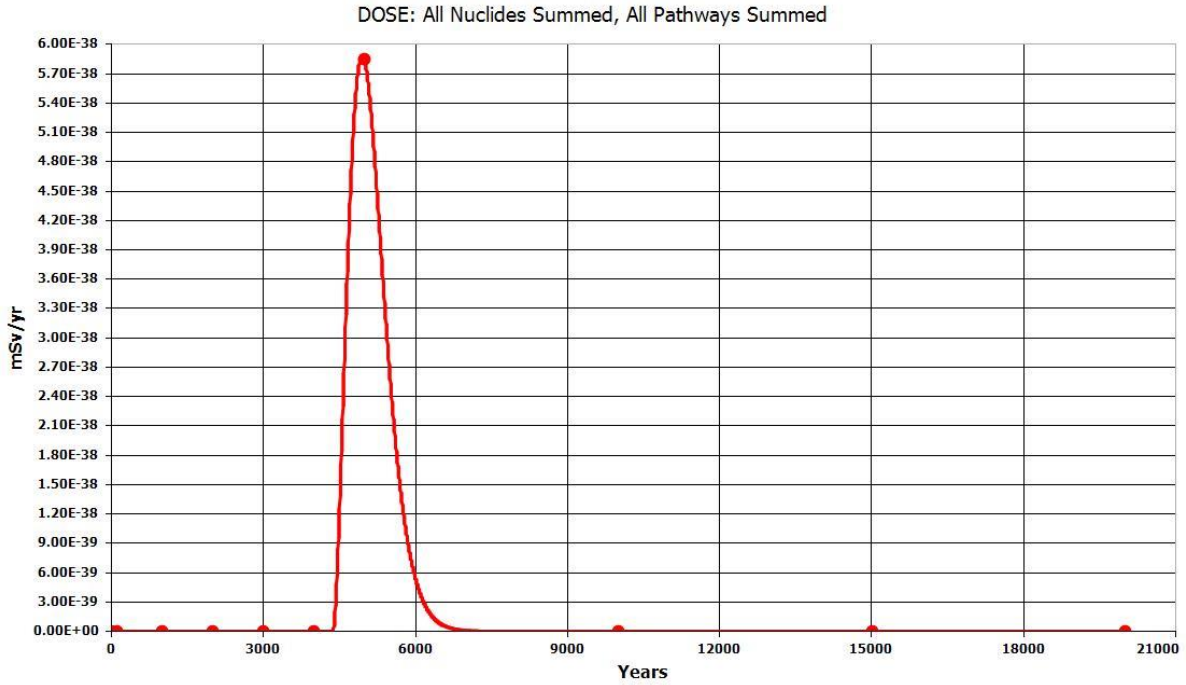


**Γράφημα 66: Συνολική δόση λόγω του <sup>59</sup>Ni συναρτήσει του χρόνου**

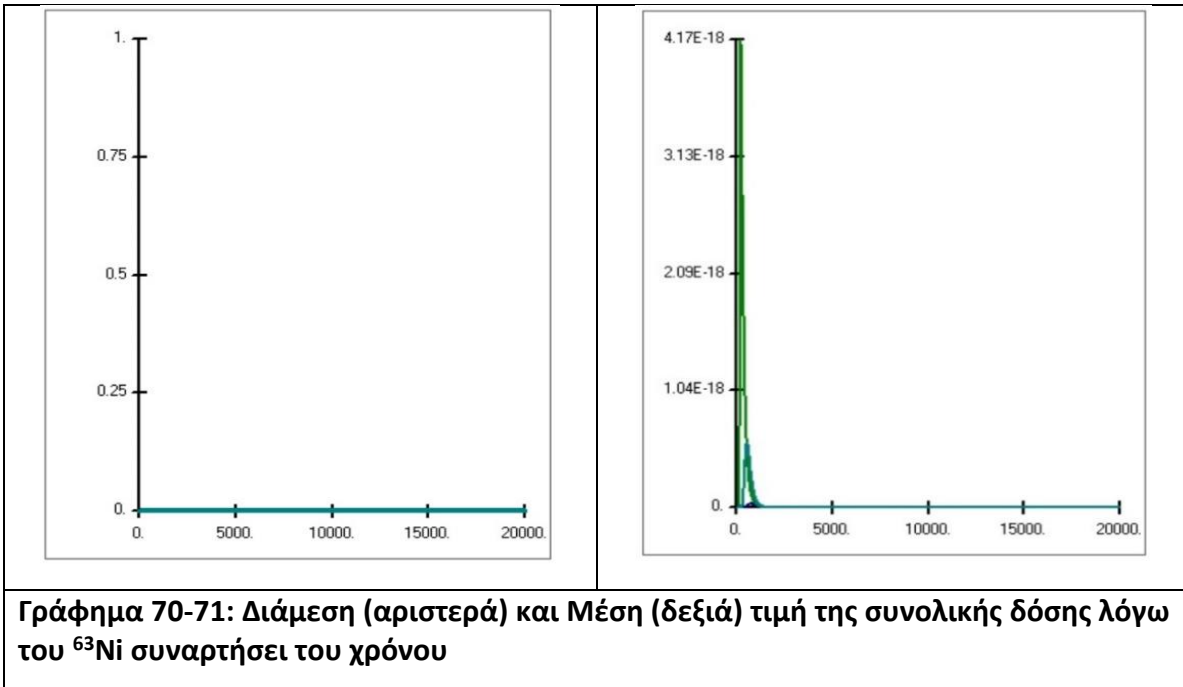


**Γράφημα 67-68: Διάμεση (αριστερά) και Μέση (δεξιά) τιμή της συνολικής δόσης λόγω του <sup>59</sup>Ni συναρτήσει του χρόνου**

**<sup>63</sup>Ni**

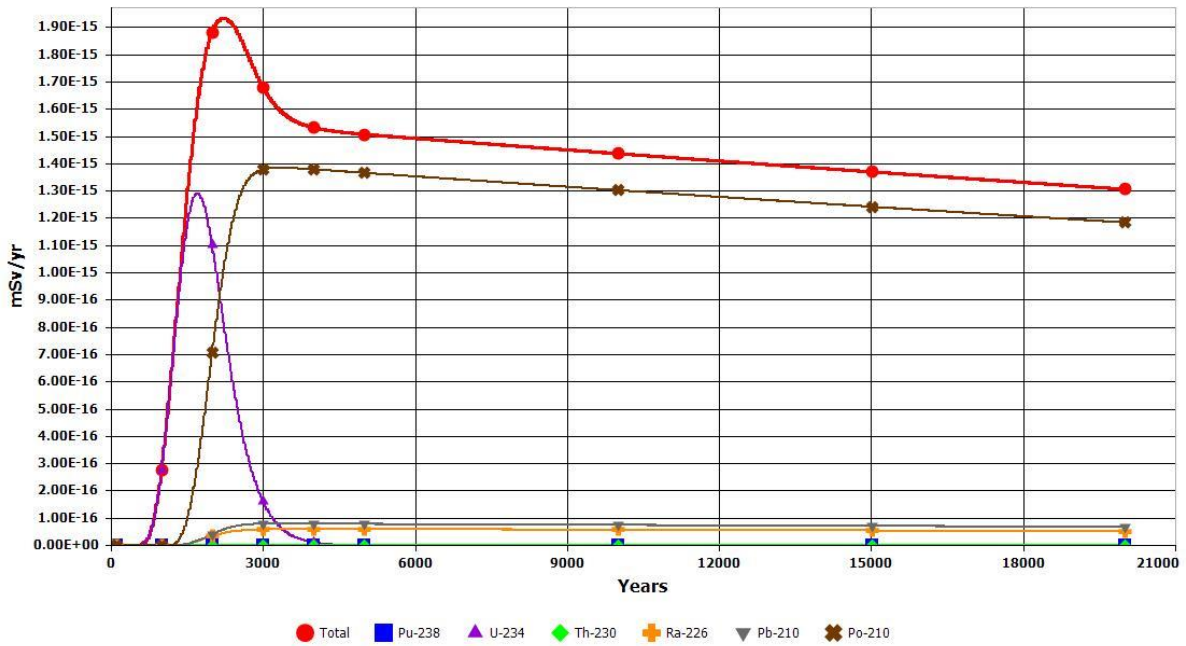


Γράφημα 69: Συνολική δόση λόγω του <sup>63</sup>Ni συναρτήσει του χρόνου

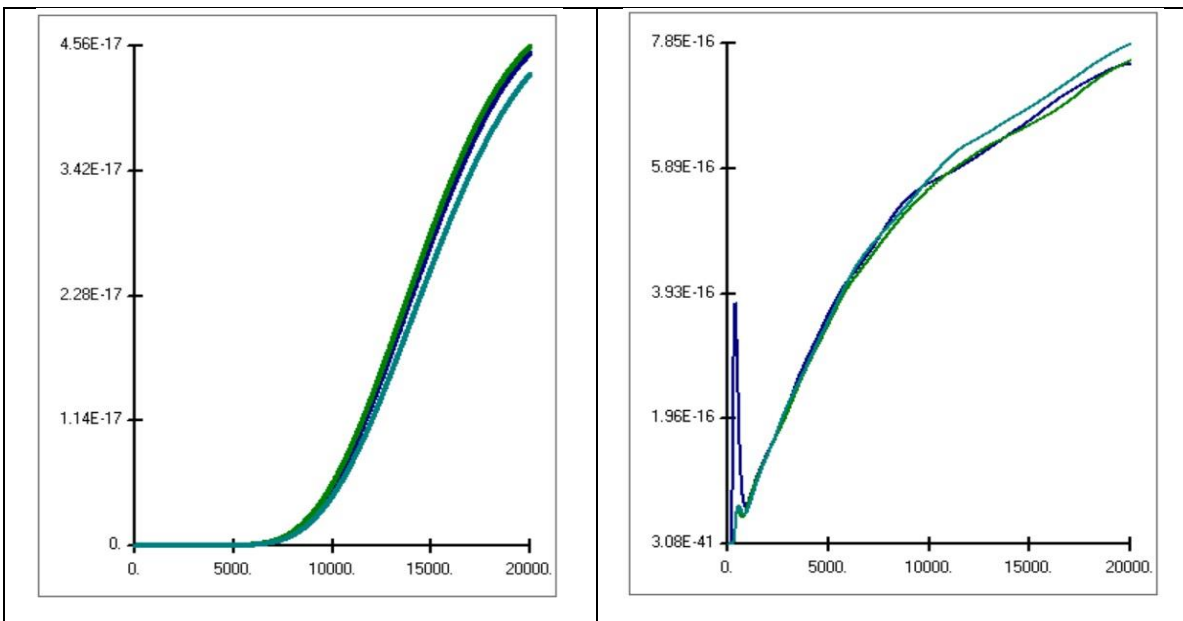


$^{238}\text{Pu}$

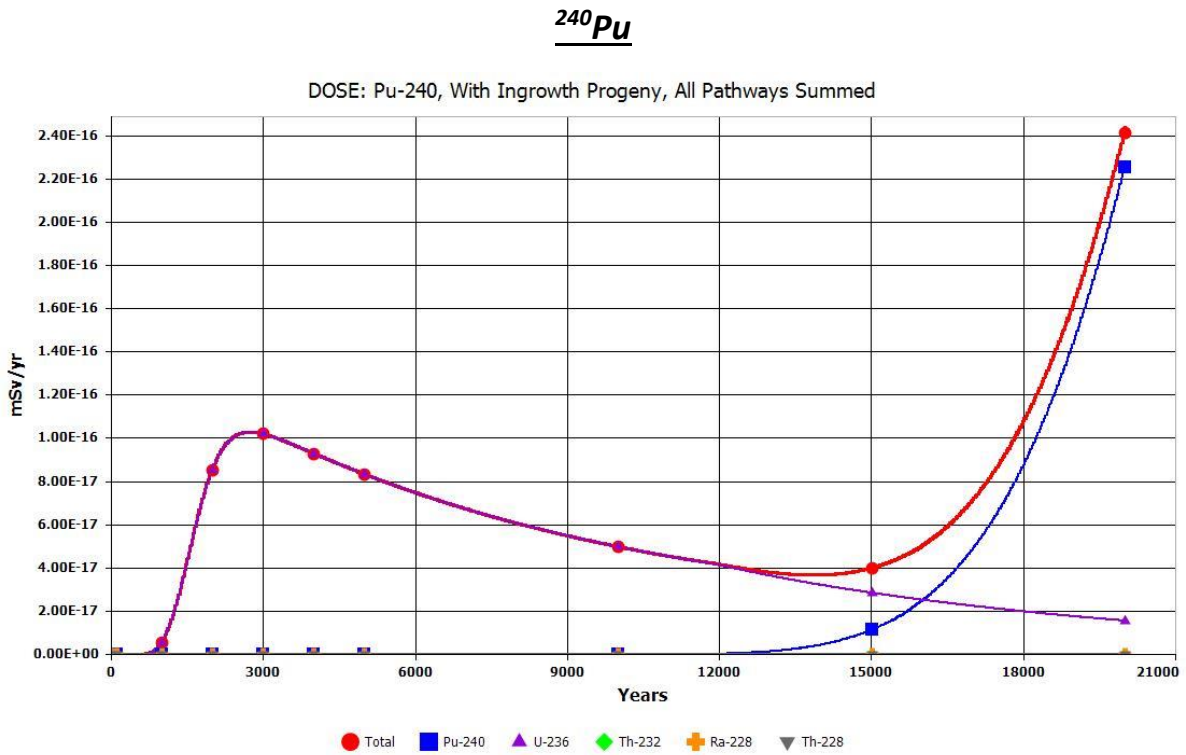
DOSE: Pu-238, With Ingrowth Progeny, All Pathways Summed



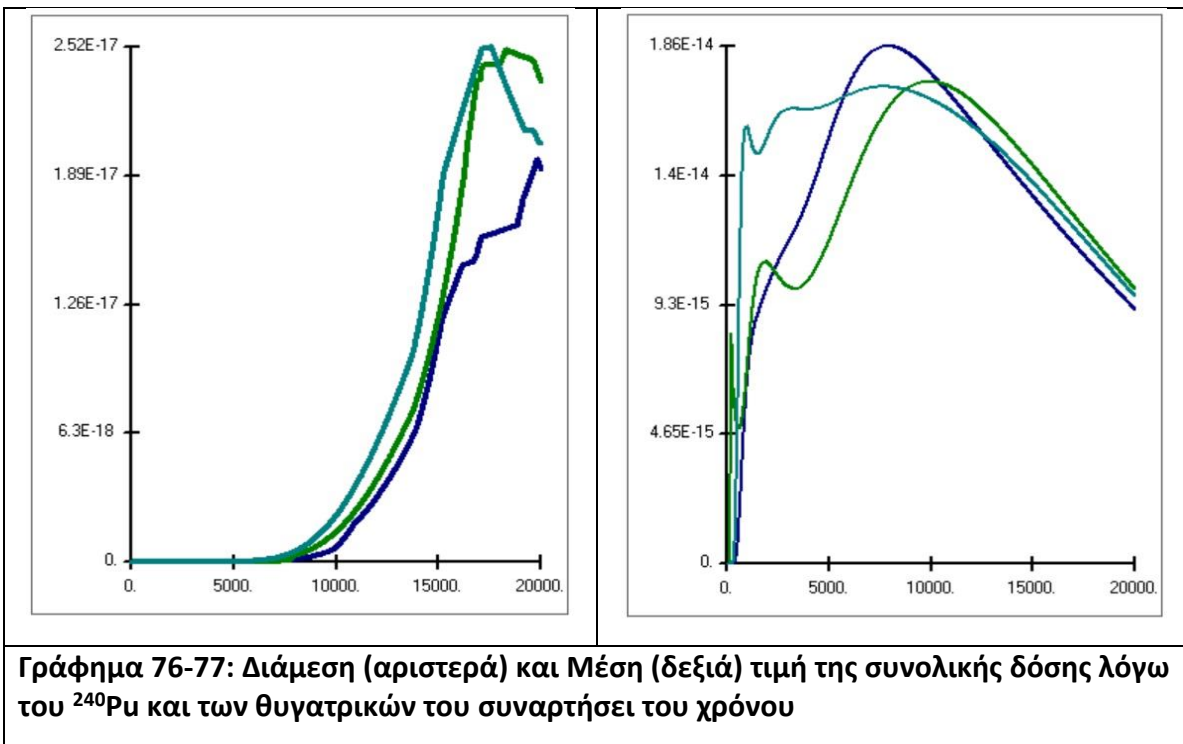
Γράφημα 72: Συνολική δόση λόγω του  $^{238}\text{Pu}$  και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου



Γράφημα 73-74: Διάμεση (αριστερά) και Μέση (δεξιά) τιμή της συνολικής δόσης λόγω του  $^{238}\text{Pu}$  και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου

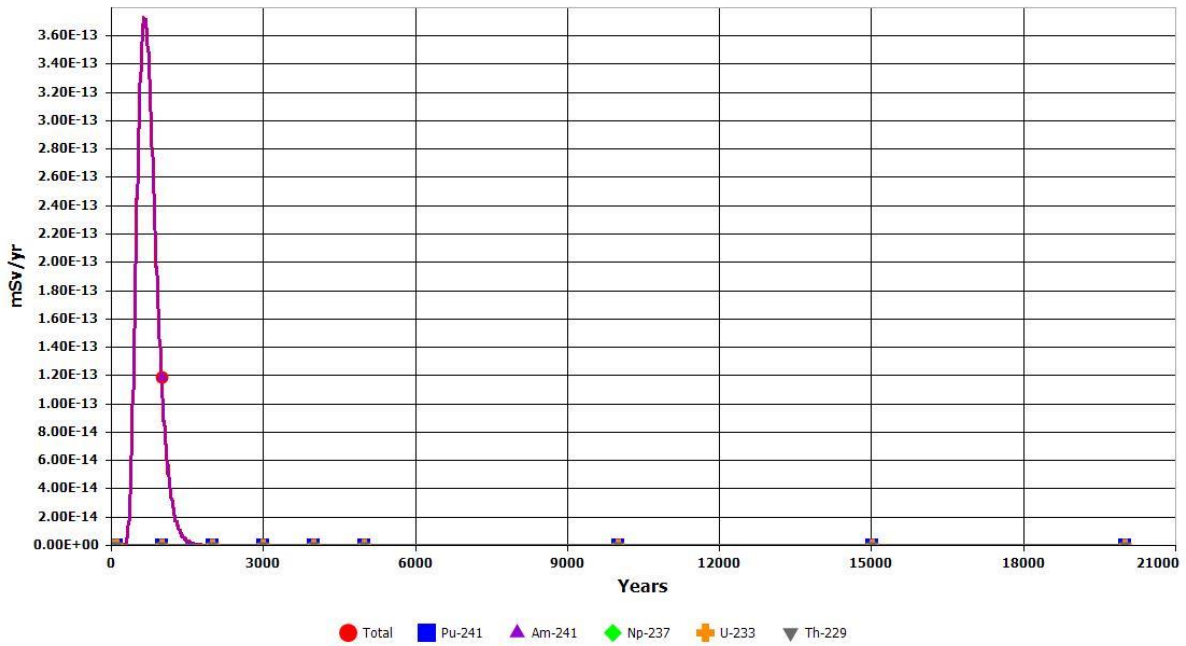


**Γράφημα 75: Συνολική δόση λόγω του <sup>240</sup>Pu και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου**

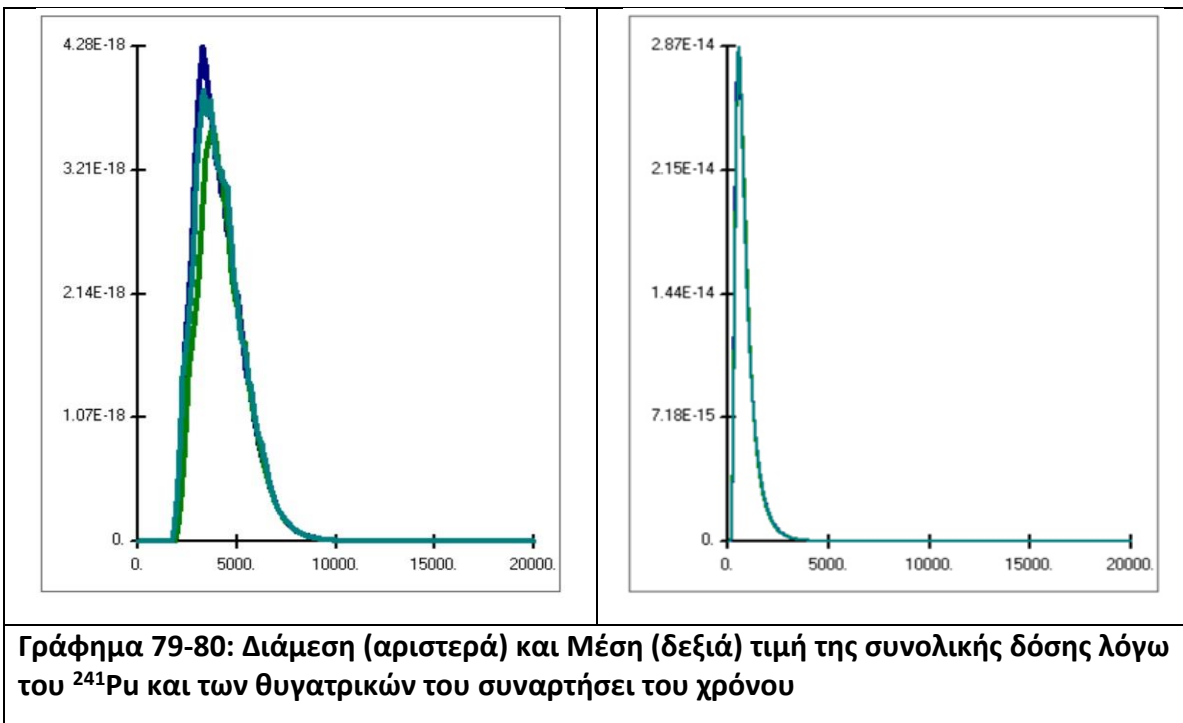


**<sup>241</sup>Pu**

DOSE: Pu-241, With Ingrowth Progeny, All Pathways Summed

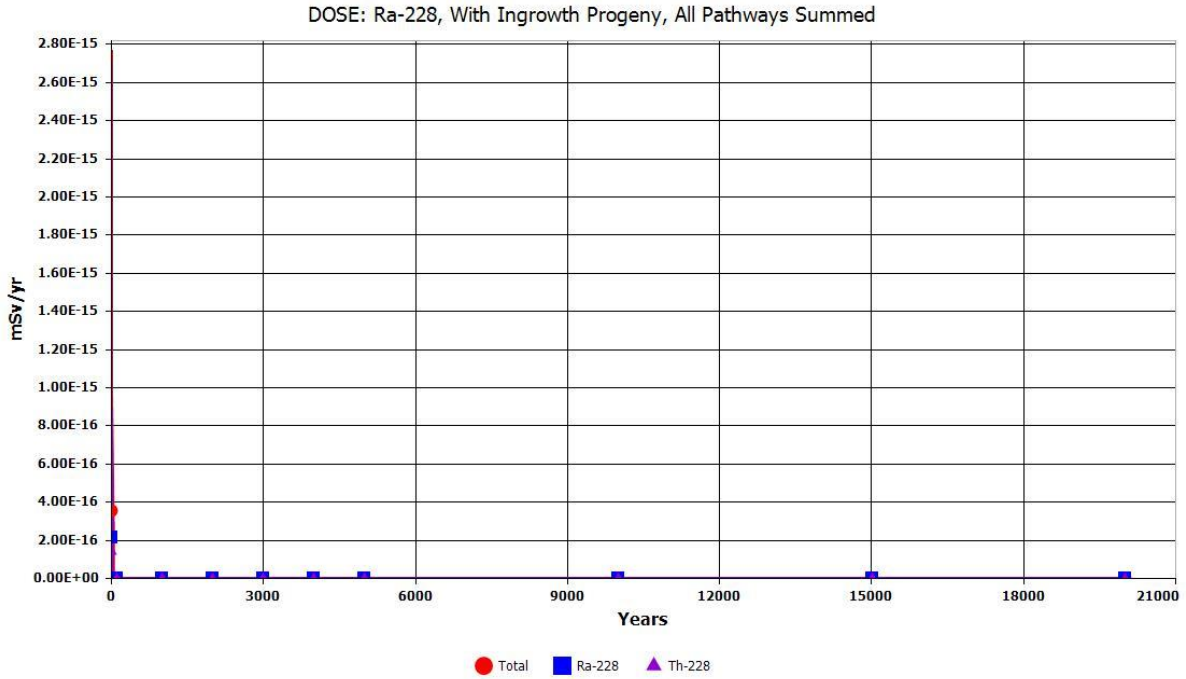


**Γράφημα 78: Συνολική δόση λόγω του <sup>241</sup>Pu και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου**

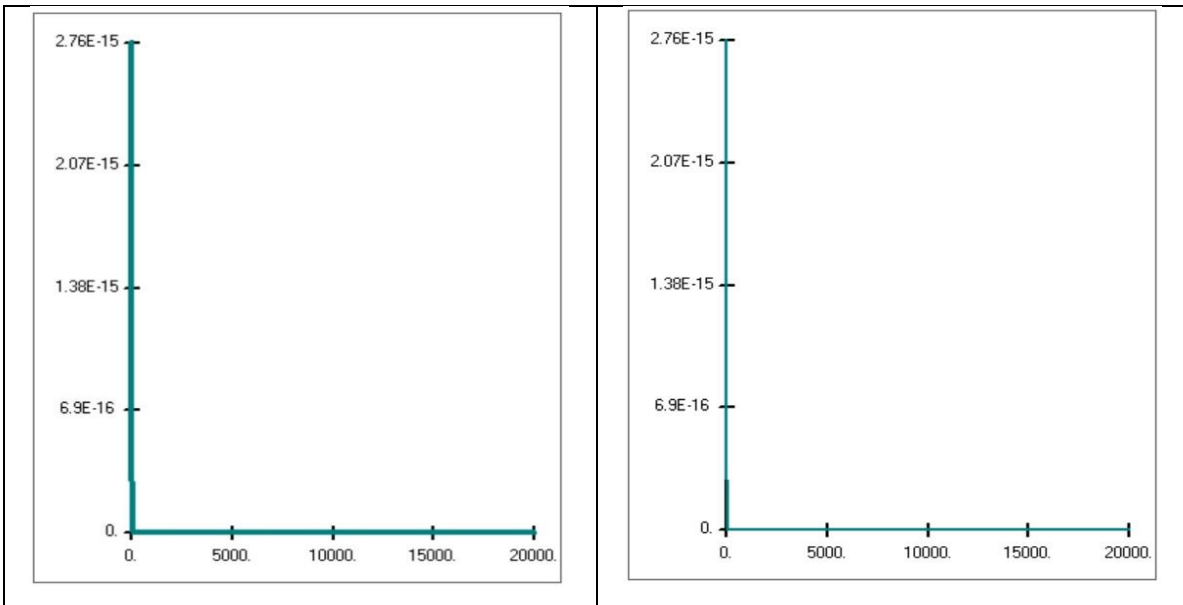


**Γράφημα 79-80: Διάμεση (αριστερά) και Μέση (δεξιά) τιμή της συνολικής δόσης λόγω του <sup>241</sup>Pu και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου**

**$^{228}\text{Ra}$**

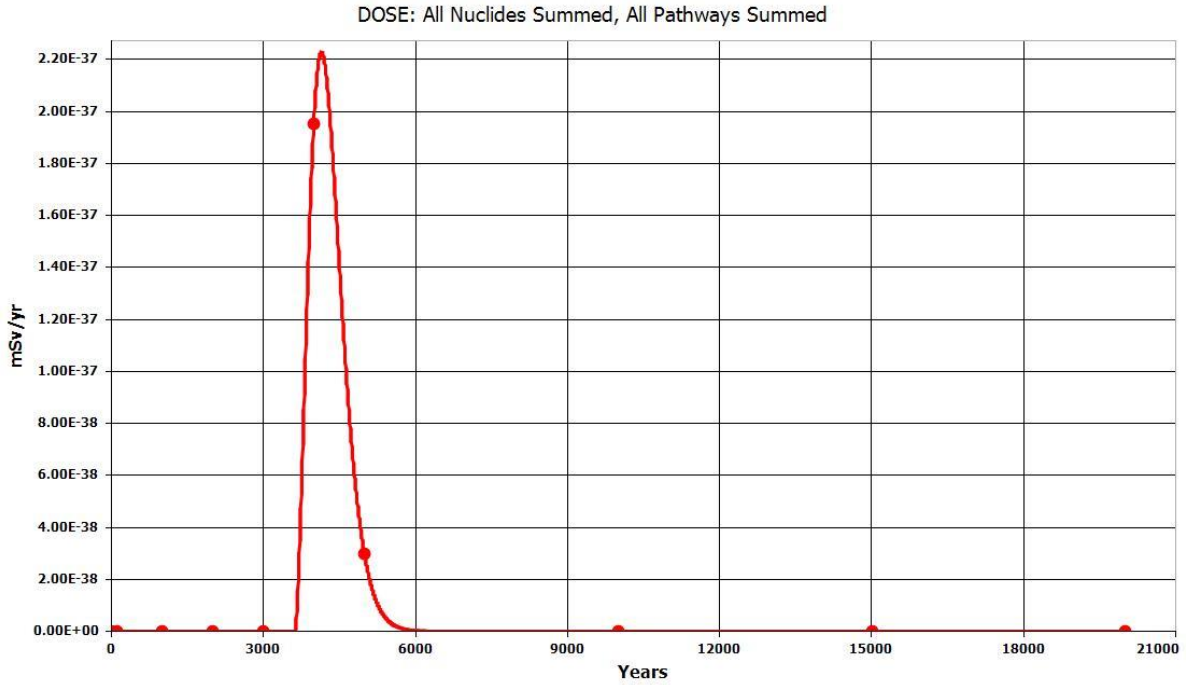


**Γράφημα 81: Συνολική δόση λόγω του  $^{228}\text{Ra}$  και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου**

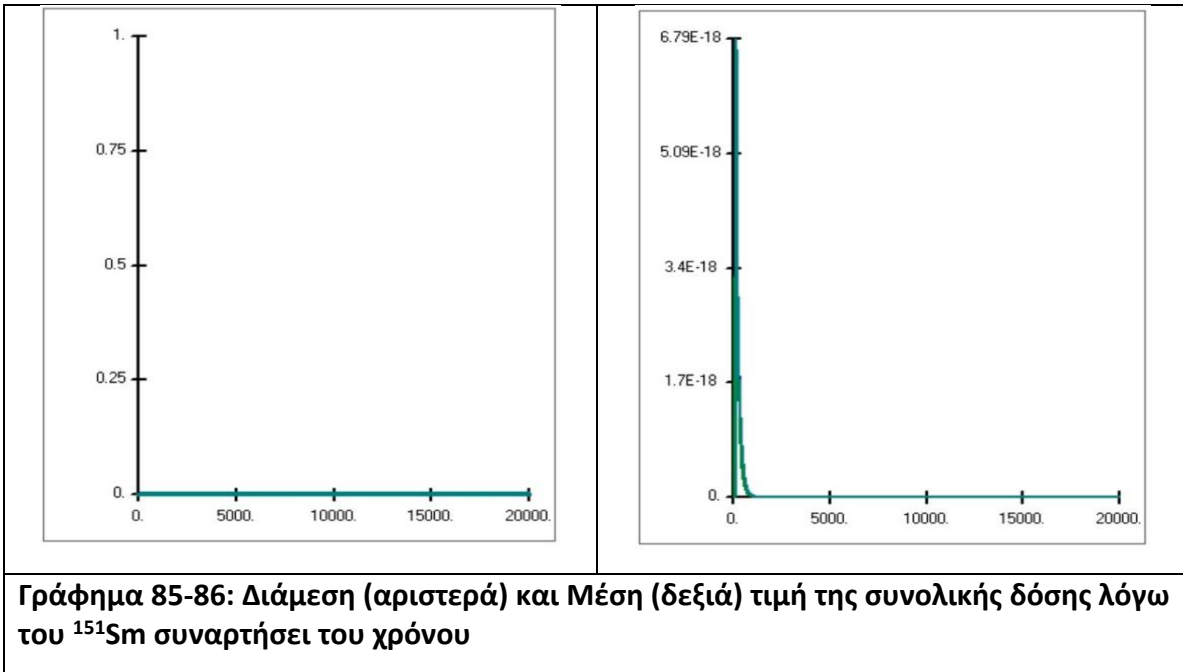


**Γράφημα 82-83: Διάμεση (αριστερά) και Μέση (δεξιά) τιμή της συνολικής δόσης λόγω του  $^{228}\text{Ra}$  και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου**

<sup>151</sup>Sm



Γράφημα 84: Συνολική δόση λόγω του <sup>151</sup>Sm συναρτήσει του χρόνου

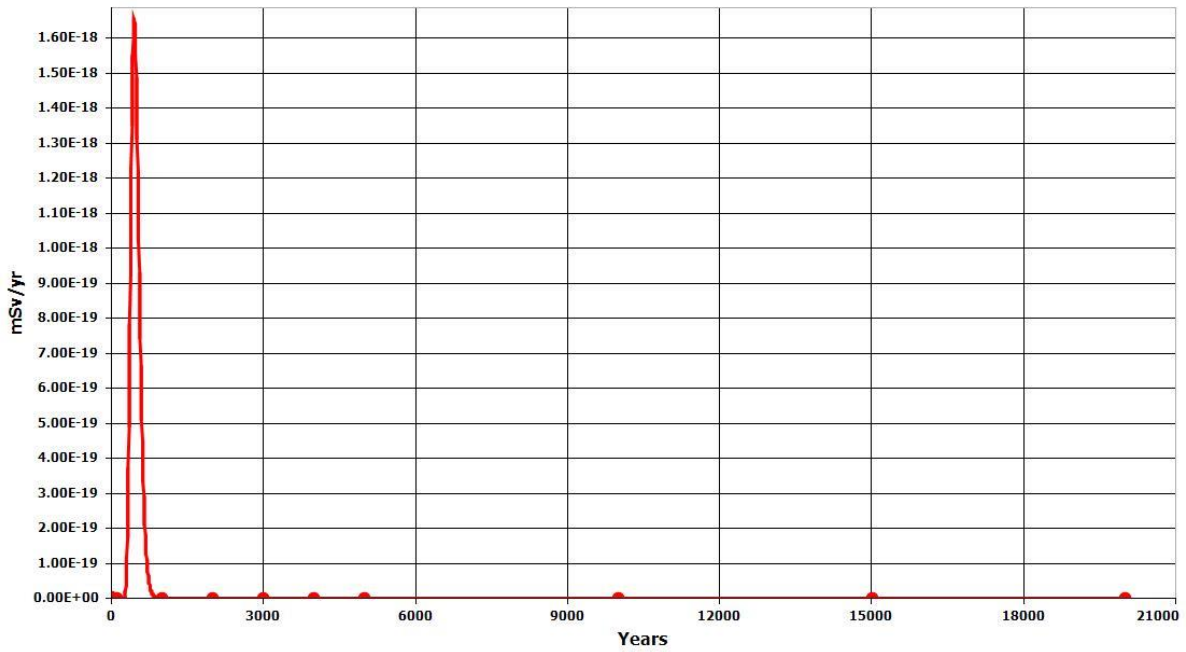


Γράφημα 85-86: Διάμεση (αριστερά) και Μέση (δεξιά) τιμή της συνολικής δόσης λόγω του <sup>151</sup>Sm συναρτήσει του χρόνου

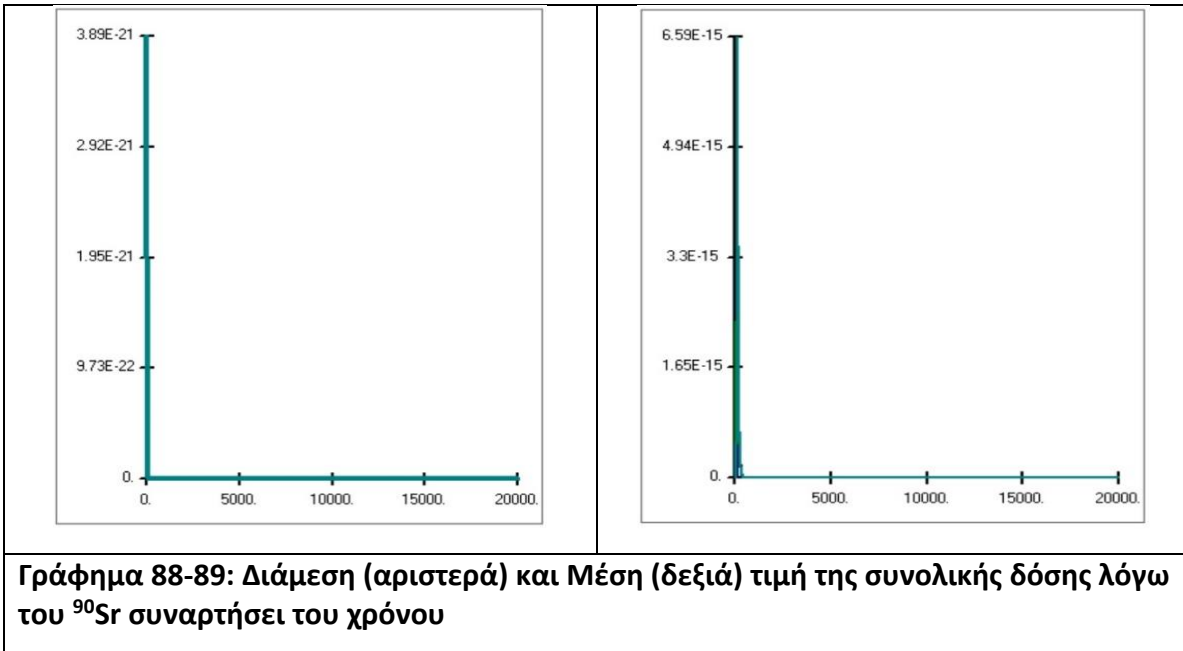




DOSE: All Nuclides Summed, All Pathways Summed



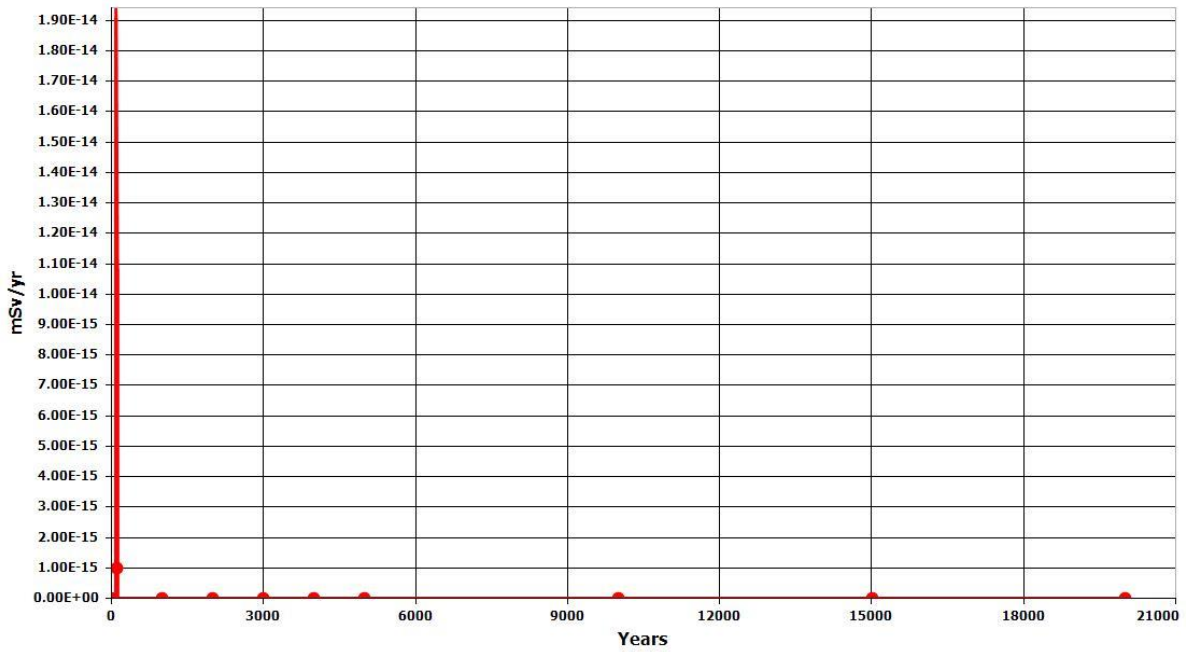
Γράφημα 87: Συνολική δόση λόγω του <sup>90</sup>Sr συναρτήσει του χρόνου



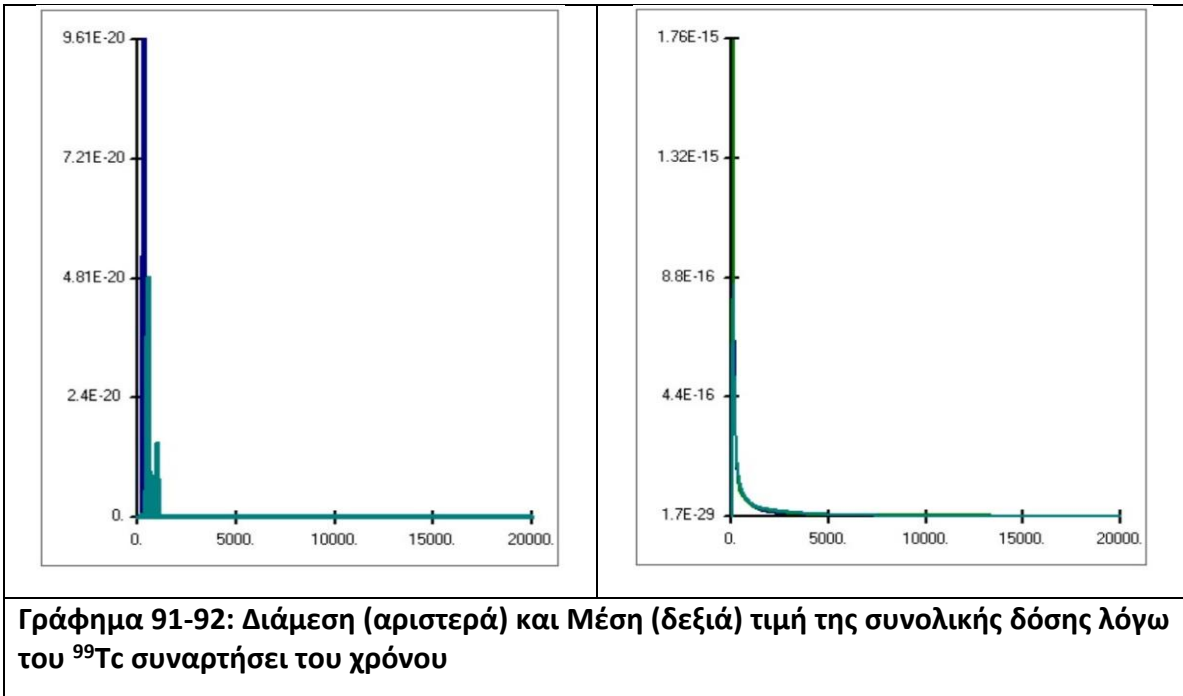
Γράφημα 88-89: Διάμεση (αριστερά) και Μέση (δεξιά) τιμή της συνολικής δόσης λόγω του <sup>90</sup>Sr συναρτήσει του χρόνου

**<sup>99</sup>Tc**

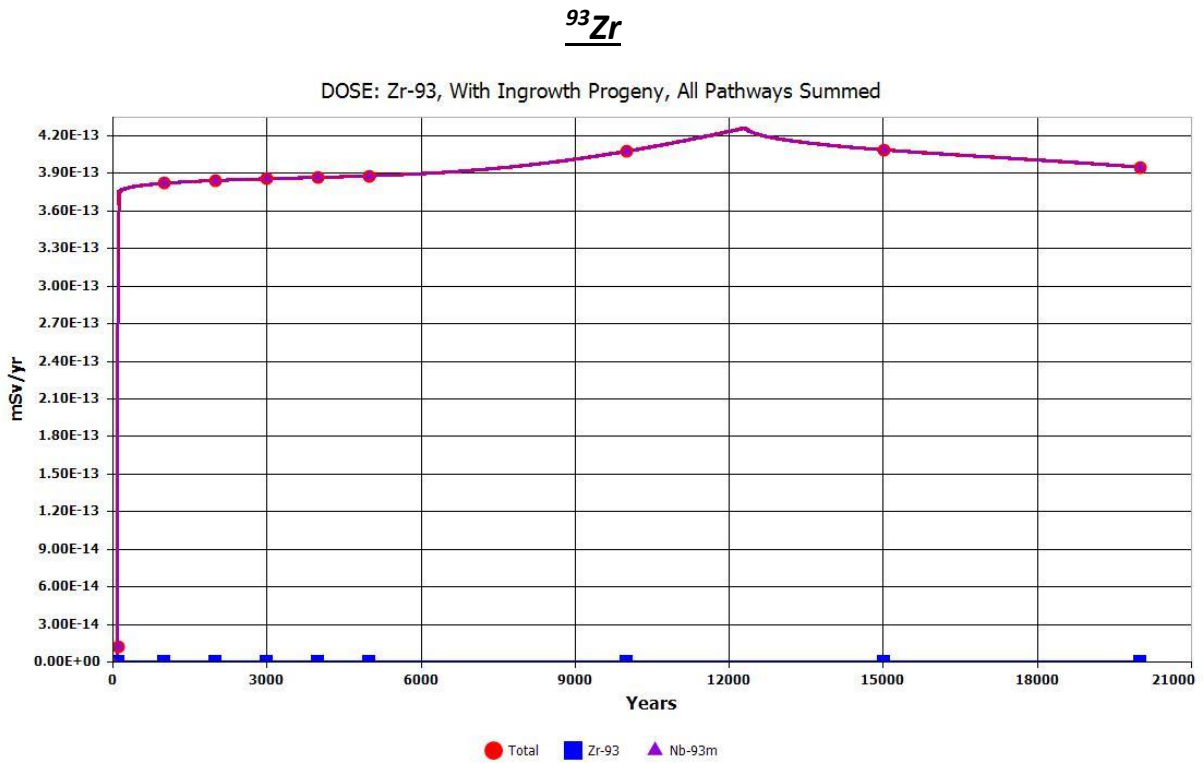
DOSE: All Nuclides Summed, All Pathways Summed



**Γράφημα 90: Συνολική δόση λόγω του <sup>99</sup>Tc συναρτήσει του χρόνου**



**Γράφημα 91-92: Διάμεση (αριστερά) και Μέση (δεξιά) τιμή της συνολικής δόσης λόγω του <sup>99</sup>Tc συναρτήσει του χρόνου**



**Γράφημα 93: Συνολική δόση λόγω του <sup>93</sup>Zr και των θυγατρικών του συναρτήσει του χρόνου**

