



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της Σιδερά Πηνελόπης
Σπουδάστριας της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών
Επιστημών

**«Βαθμονόμηση Ανιχνευτικής διάταξης Γερμανίου για τον
προσδιορισμό ραδιενεργών ισοτόπων στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα
με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte-Carlo»**

ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Ραδιενέργεια Περιβάλλοντος

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: Ρούνη Παναγιώτα, Λέκτορας, ΕΜΠ

ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ: Καρφόπουλος Κωνσταντίνος, Ερευνητής Γ', ΕΕΑΕ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Ρούνη Παναγιώτα, Λέκτορας, ΣΜΜ

Ζάννη-Βλαστού Ρόζα, Ομότιμος Καθηγήτρια, ΣΕΜΦΕ

Αναγνωστάκης Μάριος, Καθηγητής, ΣΜΜ

[ΑΘΗΝΑ, Σεπτέμβριος 2022]

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το χρονικό διάστημα Φεβρουαρίου – Σεπτεμβρίου 2022.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κα. Παναγιώτα Ρούνη για την εμπιστοσύνη που έδειξε αναθέτοντάς μου την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ποτηριάδη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την δυνατότητα να διεκπεραιώσω την διπλωματική μου εργασία στο Τμήμα Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας.

Ιδιαίτερος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κωνσταντίνο Καρφόπουλο για την καταλυτική και ουσιαστική καθοδήγηση του στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η υποστήριξή του ήταν συνεχής και η συνεργασία μαζί του άψογη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Σιδερή Πηνελόπη

© (2022) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. All rights Reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ' αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	4
1. Εισαγωγή	7
2. Κανονιστικό πλαίσιο επίτευξης ραδιενέργειας περιβάλλοντος.....	9
2.1 Συνθήκη Ευρατόμ	9
2.1.1 Άρθρα 35 & 36.....	9
2.1.2 Πεδίο εφαρμογής του άρθρου 36 της Συνθήκης Ευρατόμ σχετικά με την παρακολούθηση των επιπέδων ραδιενέργειας στο περιβάλλον με στόχο την αξιολόγηση της έκθεσης του γενικού πληθυσμού (2000/473/Ευρατόμ).....	9
2.1.4 Έλεγχος των μονάδων παρακολούθησης της περιβαλλοντικής ραδιενέργειας βάσει του άρθρου 35 της συνθήκης Ευρατόμ (Επίσημη Εφημερίδα της Ε.Ε. 2006/C 155/02)	12
2.2 Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) και το Τμήμα Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος (ΤΕΡΠ).....	13
3. Πειραματική και υπολογιστική βαθμονόμηση γ-ανιχνευτικής διάταξης για δείγματα όγκου.....	18
3.1 Εισαγωγή.....	18
3.2 Τεχνική γ- φασματοσκοπίας	18
3.3.1 Ανιχνευτική Διάταξη.....	19
3.3.2 Ανιχνευτής Γερμανίου	20
3.3.3 Η Ανιχνευτική Διάταξη του ΤΕΡΠ της ΕΕΑΕ.....	20
3.4 Ο κώδικας PENELOPE.	21
3.4.1 Η δομή του κώδικα	22
3.4.2 Τα αρχεία εισόδου του κώδικα PENMAIN	22
3.4.3 Τα αρχεία εξόδου του κώδικα PENMAIN.....	25
3.5 Βαθμονόμηση απόδοσης Ανιχνευτικών Διατάξεων	26
3.6 Πειραματικός υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής	26
3.6.1 Υπολογισμός απόδοσης φωτοκορυφής με χρήση του κώδικα PENELOPE.....	28
3.7 Επιλογή κατάλληλων διαστάσεων νεκρών ζωνών (dead layers).....	31
3.8 Προσδιορισμός νεκρών ζωνών για πηγή Βαθμονόμησης Γεωμετρίας Όγκου	33
3.8.1 Προσομοιώσεις με πηγή Am-241 για τον προσδιορισμό του πάχους της μπροστά νεκρής ζώνης.....	33

3.8.2 Προσομοιώσεις με πηγή Cs-137 για τον προσδιορισμό του πάχους της πλαϊνής νεκρής ζώνης.....	35
3.8.3 Προσομοιώσεις με πηγές Am-241 και Cs-137 για επαλήθευση και βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων.....	36
3.8.4 Προσομοιώσεις με πηγή Co-60 για τον προσδιορισμό της πίσω νεκρής ζώνης.....	37
3.8.5 Προσομοιώσεις με πηγές Am-241, Cs-137, Co-60 για βελτιστοποίηση και επαλήθευση αποτελεσμάτων.	39
3.8.6 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων για την πηγή όγκου.....	41
3.9 Συμπεράσματα	45
4. Πειραματική και υπολογιστική βαθμονόμηση γ- ανιχνευτικής διάταξης για δείγματα φίλτρου.....	45
4.1 Εισαγωγή.....	45
4.2 Πειραματικός υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής	46
4.3 Προσδιορισμός νεκρών ζωνών για πηγή βαθμονόμησης φίλτρου	47
4.3.1 Προσομοιώσεις με πηγή Am-241 για τον προσδιορισμό της μπροστά νεκρής ζώνης.....	47
4.3.2 Προσομοιώσεις με πηγή Cs-137 για τον προσδιορισμό του πάχους της πλαϊνής νεκρής ζώνης.....	48
4.3.3 Προσομοιώσεις με πηγές Am-241 και Cs-137 για επαλήθευση και βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων.....	49
4.3.4 Προσομοιώσεις με πηγή Co-60 για τον προσδιορισμό της πίσω νεκρής ζώνης.....	50
4.3.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για πηγή βαθμονόμησης φίλτρου.....	51
4.4 Επικύρωση Βαθμονόμησης Γεωμετρίας φίλτρου – Άσκηση Διασύγκρισης.....	55
4.6 Καμπύλη Βαθμονόμησης για τη παλαιά γεωμετρία φίλτρου	56
4.7 Καμπύλη βαθμονόμησης για τη νέα γεωμετρία φίλτρου.....	60
4.8 Σύγκριση της απόδοσης της νέας γεωμετρίας με την απόδοση της παλιάς.....	63
4.9 Μετρήσεις Be-7 στην ατμόσφαιρα	66
4.10 Συμπεράσματα	68
5. Βαθμονόμηση του δειγματολήπτη αέρα.....	70
5.1 Εισαγωγή.....	70
5.2 Όργανα και διαδικασία μέτρησης.....	70
5.3 Μετρήσεις και Αποτελέσματα	75
5.3.1 Μετρήσεις	75

5.3.2 Στατιστικός έλεγχος με U-test	78
6. Επισκόπηση - Συμπεράσματα.....	80
7. Βιβλιογραφία	82
Παράρτημα 1 : Πιστοποιητικό και διαστάσεις του ανιχνευτή.....	84
Παράρτημα 2: Αρχεία εισόδου και εξόδου του κώδικα PENELOPE.	86
Παράρτημα 3: Πιστοποιητικά πρότυπων πηγών.	98
Παράρτημα 4: Ανάλυση Φάσματος για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του Be-7 στον ατμοσφαιρικό αέρα.	104

1. Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας (ΔΕ) αποτελεί η βαθμονόμηση της ανιχνευτικής διάταξης με ανιχνευτή υπερκαθαρού Γερμανίου (HPGe detectors) σχετικής απόδοσης 40%, η οποία εγκαταστάθηκε πρόσφατα, Νοέμβριος 2021, στο Τμήμα Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος (ΤΕΡΠ) της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ). Η ανιχνευτική διάταξη χρησιμοποιείται και για τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση περιβαλλοντολογικών δειγμάτων, στο πλαίσιο του εθνικού προγράμματος εποπτείας της ραδιενέργειας περιβάλλοντος.

Η γ-φασματοσκοπική ανάλυση αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους ποιοτικού και ποσοτικού ελέγχου της φυσικής και τεχνητά επαγόμενης ραδιενέργεια σε πάσης φύσεως δείγματα. Τα δείγματα αυτά αναλύονται κυρίως με ανιχνευτές υπερκαθαρού Γερμανίου. Για τον ποσοτικό προσδιορισμό των περιεχόμενων ραδιονουκλιδίων στα δείγματα είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση της απόδοσης φωτοκορυφής των ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται. Στη παρούσα ΔΕ μελετάται ο προσδιορισμός της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή για τις χρησιμοποιούμενες γεωμετρίες είτε πειραματικά, είτε υπολογιστικά με εφαρμογή τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo και πιο συγκεκριμένα με χρήση του κώδικα PENELOPE (PENetration and ENergy LOSS of Positrons and Electrons).

Η παρούσα διπλωματική εργασία απαρτίζεται από 5 κεφάλαια, τα οποία περιγράφονται συνοπτικά ακολούθως:

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται λόγος για τα πεδία εφαρμογής των άρθρων 35 και 36, της Συνθήκης Ευρατόμ για μετρήσεις που αφορούν μετρήσεις συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα. Στο πλαίσιο αυτό, παρουσιάζονται πληροφορίες αναφορικά με τον ρόλο και τις αρμοδιότητες της ΕΕΑΕ, και πιο συγκεκριμένα του Τμήματος Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ραδιολογική ανάλυση περιβαλλοντικών δειγμάτων, καθώς και τα συστήματα που διαθέτει η ΕΕΑΕ για τη διεξαγωγή των μετρήσεων των επιπέδων ραδιενέργειας στο περιβάλλον.

Στο κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται εισαγωγή στη μέθοδο γ-φασματοσκοπίας και περιγράφονται η λειτουργία και τα χαρακτηριστικά της ανιχνευτικής διάταξης υπερκαθαρού Γερμανίου. Στη συνέχεια περιγράφεται ο κώδικας προσομοίωσης PENELOPE, ο οποίος χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση της υπολογιστικής βαθμονόμησης του ανιχνευτή. Περιγράφονται οι διαδικασίες τόσο της πειραματικής όσο και της υπολογιστικής βαθμονόμησης του ανιχνευτή. Η υπολογιστική απόδοση φωτοκορυφής του ανιχνευτή πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τον κώδικα PENELOPE. Απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης είναι η γνώση των διαστάσεων του ανιχνευτή και του δείγματος. Για το λόγο αυτό, παρουσιάζεται μια σειρά από προσομοιώσεις που έχουν ως στόχο την ακριβή εκτίμηση των διαστάσεων των νεκρών ζωνών του ανιχνευτή. Για το σκοπό αυτό, αρχικά, αξιοποιείται

πρότυπη πηγή όγκου που διαθέτει το ΤΕΡΠ. Πρόκειται για πρότυπη πηγή όγκου 260 mL και πυκνότητας 0.9 gr/cm³.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η ίδια διαδικασία για τον προσδιορισμό της απόδοσης φωτοκορυφής, χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά πρότυπη πηγή φίλτρου με ενεργό διάμετρο 45 mm. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται προσομοιώσεις για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής που αφορούν δείγματα φίλτρων ινών γυαλιού (quartz). Παράλληλα, εισάγεται νέα γεωμετρία, η οποία προέκυψε από αναδίπλωση του ήδη υπάρχοντος φίλτρου και το σχηματισμό γεωμετρίας τεταρτοκυκλίου. Στόχος της διαδικασίας αυτής είναι η βελτίωση της απόδοσης φωτοκορυφής. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού γίνεται μια σύντομη αναφορά στο κοσμογενές ισότοπο Be-7 και παρουσιάζονται μετρήσεις που προκύπτουν από ανάλυση φασμάτων σε χρονικό διάστημα 4 μηνών.

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται η διαδικασία βαθμονόμησης της αντλίας συλλογής μεγάλου όγκου αέρα και ο σχετικός στατιστικός έλεγχος προκειμένου να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία της. Στη συγκεκριμένη αντλία χρησιμοποιούνται φίλτρα ινών γυαλιού, η γεωμετρία των οποίων έχει προσομοιωθεί, στο προηγούμενο κεφάλαιο, με τεχνικές προσομοίωσης Monte Carlo και τη χρήση του κώδικα PENELOPE για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής για τη συγκεκριμένη γεωμετρία.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα ΔΕ καθώς και ορισμένες μελλοντικές προτάσεις.

Στο τέλος της εργασίας παρατίθενται υπό μορφή παραρτήματος τα πιστοποιητικά των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν, το πιστοποιητικό του ανιχνευτή, ενδεικτικά φάσματα από τις μετρήσεις που διενεργήθηκαν για τον προσδιορισμό του Be-7 στην ατμόσφαιρα, καθώς και ενδεικτικά αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των προσομοιώσεων (αρχείο γεωμετρίας, αρχεία εισόδου, αρχεία εξόδου).

2. Κανονιστικό πλαίσιο επόπτευσης ραδιενέργειας περιβάλλοντος

2.1 Συνθήκη Ευρατόμ

Η Συνθήκη περί ιδρύσεως της Ευρωπαϊκής Κοινότητας Ατομικής Ενέργειας (ΕΚΑΕ ή Ευρατόμ) υπογράφηκε στις 25 Μαρτίου 1957 και τέθηκε σε ισχύ από την 1^η Ιανουαρίου 1958. Η συνθήκη αυτή θεσπίστηκε τόσο για τον συντονισμό των ερευνητικών προγραμμάτων των κρατών μελών για θέματα που αφορούν την πυρηνική ενέργεια, όσο και για την ειρηνική χρήση αυτής. Ένας από τους κύριους στόχους της συνθήκης είναι η συμβολή στον σχηματισμό και στην ανάπτυξη της Ευρωπαϊκής πυρηνικής βιομηχανίας, με τέτοιον τρόπο ώστε όλα τα κράτη μέλη να επωφελούνται από την ανάπτυξη της ατομικής ενέργειας και των εφαρμογών της. Επιπλέον, η συνθήκη εγγυάται υψηλά επίπεδα ασφάλειας για τον γενικό πληθυσμό και αποτρέπει τη χρήση της πυρηνικής τεχνολογίας για στρατιωτικούς σκοπούς (Treaty establishing the European Atomic Energy Community (Euratom), 2007).

Στη παρούσα Διπλωματική Εργασία (ΔΕ) γίνεται λόγος για τα πεδία εφαρμογής των άρθρων 35 και 36 της συνθήκης Ευρατόμ για μετρήσεις που αφορούν την ραδιενέργεια στο περιβάλλον και συγκεκριμένα τις μετρήσεις συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.

2.1.1 Άρθρα 35 & 36

Το κεφάλαιο 3 του τίτλου II της συνθήκης Ευρατόμ (2012/C 327/01 Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης) αναφέρεται στην προστασία της υγείας τόσο των εργαζομένων όσο και του πληθυσμού, θεσπίζοντας βασικούς κανόνες εντός της Κοινότητας σε θέματα που αφορούν την ραδιενέργεια (άρθρα 30-33). Επιπλέον, το κεφάλαιο αυτό πραγματεύεται την παρακολούθηση των επιπέδων ραδιενέργειας στο περιβάλλον (άρθρα 35-38). Η παρούσα ΔΕ εστιάζει στα άρθρα 35 και 36 της συνθήκης Ευρατόμ περί ελέγχου των επιπέδων ραδιενέργειας στο περιβάλλον και ιδίως στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα και στην κοινοποίηση των μετρήσεων αυτών στην Επιτροπή.

2.1.2 Πεδίο εφαρμογής του άρθρου 36 της Συνθήκης Ευρατόμ σχετικά με την παρακολούθηση των επιπέδων ραδιενέργειας στο περιβάλλον με στόχο την αξιολόγηση της έκθεσης του γενικού πληθυσμού (2000/473/Ευρατόμ).

Στις 8 Ιουνίου 2000, η Επιτροπή Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων διατυπώνει σύσταση περί εφαρμογής του άρθρου 36 της συνθήκης Ευρατόμ (L 191/39), το οποίο αναφέρεται στην παρακολούθηση των επιπέδων ραδιενέργειας στο περιβάλλον,

έχοντας ως στόχο την αξιολόγηση της έκθεσης του γενικού πληθυσμού σε ραδιενέργεια (2000/473/Ευρατόμ). Σύμφωνα με αυτή την σύσταση, τα κράτη μέλη υποχρεούνται να διενεργούν ελέγχους της συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων σε περιβαλλοντικά δείγματα και οφείλουν να διαβιβάζουν στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή πληροφορίες σχετικά με τα αποτελέσματα των ελέγχων αυτών ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Για τους σκοπούς της εν λόγω σύστασης ορίζονται τα ακόλουθα για τη βέλτιστη διεξαγωγή τόσο των ελέγχων όσο και της παρακολούθησης των αποτελεσμάτων των ελέγχων.

1. Διαρκής παρακολούθηση: Η ύπαρξη και η εφαρμογή διαρκούς προγράμματος παρακολούθησης. Ανάλογα με το παρακολουθούμενο μέσο, μπορεί να περιλαμβάνει:
 - i. Δειγματοληψία και αξιολόγηση
 - ii. Δειγματοληψία και τακτική αξιολόγηση
 - iii. Άμεση μέτρηση
2. Υποδομές και Διαδικασίες: το πρόγραμμα παρακολούθησης, ο εξοπλισμός και οι διαδικασίες άμεσης μέτρησης, δειγματοληψίας και ανάλυσης (συμπεριλαμβανομένων των ελέγχων ποιότητας και της ανακοίνωσης και αρχειοθέτησης όλων των σχετικών στοιχείων), καθώς και τα εργαστήρια που απαιτούνται για την διενέργεια της διαρκούς παρακολούθησης των επιπέδων ραδιενέργειας.
3. Δίκτυο παρακολούθησης: ο κατάλληλος για κάθε μέσο, συνδυασμός των σημείων δειγματοληψίας και άμεσης μέτρησης που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση του συγκεκριμένου αυτού μέσου.
4. Πυκνό δίκτυο παρακολούθησης: Το δίκτυο παρακολούθησης το οποίο περιλαμβάνει σημεία δειγματοληψίας κατανεμημένα στο σύνολο της επικράτειας ενός κράτους μέλους, ούτως ώστε να δύναται η Επιτροπή να υπολογίζει τις ανά περιφέρεια μέσες τιμές για τα επίπεδα ραδιενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση.
5. Αραιό δίκτυο παρακολούθησης: Το δίκτυο παρακολούθησης που περιλαμβάνει για κάθε περιφέρεια και για κάθε μέσο δειγματοληψίας ένα τουλάχιστον αντιπροσωπευτικό σημείο δειγματοληψίας της περιφέρειας αυτής. Σε τέτοια σημεία θα πρέπει να διενεργούνται μετρήσεις υψηλής ευαισθησίας με αποτέλεσμα τη διαφανή καταγραφή των τρεχόντων επιπέδων και τάσεων των επιπέδων ραδιενέργειας.
6. Περιφέρεια: Κάθε περιοχή των κρατών μελών η οποία είναι αντιπροσωπευτική για την αξιολόγηση της έκθεσης σε ραδιενέργεια του γενικού πληθυσμού λαμβάνοντας υπόψη το ραδιολογικό αντίκτυπο των εκπομπών και την δόσης περιβάλλοντος καθώς και την κατανομή του πληθυσμού. Οι περιφέρειες που καθορίζονται από τις τρέχουσες κοινοτικές εκθέσεις παρακολούθησης καθορίζονται εξ αρχής.

Όλα τα κράτη μέλη καλούνται να γνωστοποιούν στην Επιτροπή τις αρμόδιες αρχές του άρθρου 36 της συνθήκης Ευρατόμ καθώς θα πρέπει να πληρούνται οι ακόλουθες απαιτήσεις:

1. Για τα δίκτυα παρακολούθησης:
 - i. Κάθε κράτος μέλος ορίζει αντιπροσωπευτικές γεωγραφικές περιφέρειες για την επικράτεια του,
 - ii. Κάθε κράτος μέλος ορίζει για κάθε κατηγορία του μέσου ένα αραιό και ένα πυκνό δίκτυο παρακολούθησης,
 - iii. Οι τόποι που συνιστούν ένα δίκτυο είναι αντιπροσωπευτικοί της κατάστασης της περιφέρειας λαμβάνοντας υπόψη, όπου αρμόζει, την κατανομή του πληθυσμού στην περιφέρεια
2. Για τα μέσα δειγματοληψίας, τις κατηγορίες μετρήσεων και την περιοδικότητα:
 - i. Τα μέσα δειγματοληψίας και οι κατηγορίες μετρήσεων δίνονται από την Επιτροπή. Οι μετρήσεις διενεργούνται κατά προτίμηση σε μηνιαία βάση για το αραιό δίκτυο και σε τριμηνιαία βάση για το πυκνό δίκτυο, εκτός από τις περιπτώσεις που ορίζεται διαφορετικά.
 - ii. Στο αραιό δίκτυο παρακολούθησης τα όρια και η ευαισθησία ανίχνευσης των οργάνων μέτρησης πρέπει να επιτρέπουν τον ποσοτικό υπολογισμό των τρεχόντων επιπέδων ραδιενέργειας περιβάλλοντος.
 - iii. Στο πυκνό δίκτυο παρακολούθησης τα όρια ανίχνευσης των οργάνων μέτρησης είναι χαμηλότερα από τα επίπεδα ανακοίνωσης που ορίζονται από την Επιτροπή.
 - iv. Τα κράτη μέλη ενημερώνουν την Επιτροπή σχετικά με τα όρια ανίχνευσης και των αβεβαιοτήτων που λαμβάνονται υπόψη.
 - v. Τα κράτη μέλη προκρίνουν τεχνικές μέτρησης που έχουν αποδειχθεί αξιόπιστες, και εξασφαλίζουν τον έλεγχο της ποιότητας των αποτελεσμάτων.
 - vi. Τα εργαστήρια των κρατών μελών που παρέχουν τα στοιχεία βάσει των όσων ορίζονται στη συγκεκριμένη σύσταση οφείλουν να συμμετέχουν τακτικά σε ασκήσεις διασύγκρισης, ειδικότερα στις ασκήσεις που οργανώνει η Επιτροπή, ούτως ώστε να διασφαλίζεται η αξιοπιστία των διαβιβαζόμενων στοιχείων.

Για τα αερομεταφερόμενα σωματίδια, τα σημεία δειγματοληψίας πρέπει να βρίσκονται κοντά σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, ενώ παράλληλα πρέπει για κάθε γεωγραφική περιφέρεια να εξασφαλίζεται ένα σημείο δειγματοληψίας. Η δειγματοληψία στα σημεία αυτά πρέπει να διενεργείται από συστήματα συνεχούς λειτουργίας. Η μέτρηση των ραδιονουκλιδίων που εκπέμπουν ακτίνες γ θα πρέπει να διενεργείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, με σκοπό να ανιχνεύονται και να υπολογίζονται τόσο τα τεχνητά όσο και τα φυσικά ραδιοϊσότοπα. Η συγκέντρωση του ^{7}Be μετριέται και ανακοινώνεται ως ποιοτικός έλεγχος των μεθόδων που έχουν χρησιμοποιηθεί. Επιπλέον, η Επιτροπή πρέπει να ενημερώνεται για περιπτώσεις που μετράται ολική β ακτινοβολία. Τέλος, για κάθε ραδιονουκλίδιο που ανιχνεύεται σε υψηλή συγκέντρωση, καταχωρούνται τα αποτελέσματα που βρέθηκαν και διαβιβάζονται στην Επιτροπή.

Όλα τα αποτελέσματα συλλέγονται και καταγράφονται σε ειδικούς πίνακες οι οποίοι αποστέλλονται σε ψηφιακή μορφή και ανακοινώνονται στην Επιτροπή με τον τρόπο που η ίδια ορίζει, χρησιμοποιώντας κατά προτίμηση εξειδικευμένο λογισμικό. Για όλες τις δειγματοληψίες διαβιβάζονται τα επιμέρους μη συγκεντρωτικά στοιχεία μέτρησης και όχι οι μέσες τιμές, εκτός από τις περιπτώσεις που οι μετρήσεις αντιστοιχούν σε άμεσες διαρκείς μετρήσεις, όπου στην περίπτωση αυτή καταγράφονται και ανακοινώνονται οι μέσες μηνιαίες τιμές (όπως για παράδειγμα η περίπτωση των αερομεταφερόμενων σωματιδίων). Κάθε χρόνο, όλα τα στοιχεία που συλλέγονται, αφού επικυρωθούν, θα πρέπει να υποβάλλονται στην Επιτροπή, έτσι ώστε να μπορεί να αξιολογεί τα επίπεδα ραδιενέργειας του περιβάλλοντος και τον αντίκτυπό τους τόσο στον γενικό πληθυσμό όσο και στους εργαζόμενους. Στόχος της διαδικασίας αυτής είναι η διαρκής παρακολούθηση των δεδομένων και η άμεση αντιμετώπιση σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης ((2000/473/Ευρατόμ), 2000).

2.1.4 Έλεγχος των μονάδων παρακολούθησης της περιβαλλοντικής ραδιενέργειας βάσει του άρθρου 35 της συνθήκης Ευρατόμ (Επίσημη Εφημερίδα της Ε.Ε. 2006/C 155/02)

Σύμφωνα με την Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης (2006/C 155/02), στις 4 Ιουλίου του 2006, δόθηκαν διευκρινήσεις του τρόπου εφαρμογής του άρθρου 35 για τον έλεγχο των μονάδων παρακολούθησης της περιβαλλοντικής ραδιενέργειας και πρακτικές ρυθμίσεις για την διενέργεια των επισκέψεων ελέγχου στα κράτη μέλη. Έχει κριθεί αναγκαίο να οριστεί ένα κοινό πλαίσιο βάσει του συγκεκριμένου άρθρου για τους ελέγχους ραδιενέργειας, το οποίο θα εφαρμόζεται σε όλα τα κράτη μέλη της Κοινότητας. Η Επιτροπή οφείλει να διενεργεί ελέγχους στις εγκαταστάσεις για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος σε πανεθνική κλίμακα. Πρέπει να διευκρινιστεί ότι το άρθρο 35 αναφέρεται στον έλεγχο των μεθόδων και των διαδικασιών που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της ραδιενέργειας στο περιβάλλον και όχι για τον έλεγχο των επιπέδων ραδιενέργειας σε αυτό. Παράλληλα, πρέπει να σημειωθεί ότι η εξασφάλιση των Βασικών Προτύπων Ασφαλείας δεν είναι αρμοδιότητα της Επιτροπής, αλλά των κρατών μελών.

Ο έλεγχος πρέπει να καλύπτει όλες τις εγκαταστάσεις παρακολούθησης της περιβαλλοντικής ραδιενέργειας, δηλαδή:

- αέριες και υγρές απορρίψεις ραδιονουκλιδίων στο περιβάλλον και
- ραδιενέργεια στο περιβάλλον στις εγκαταστάσεις γύρω από αυτές.

Ο βασικός στόχος των ελέγχων της Επιτροπής είναι να βεβαιωθεί τόσο η λειτουργία και η αποδοτικότητα των εγκαταστάσεων μέτρησης της ραδιενέργειας περιβάλλοντος και των ραδιενεργών εκπομπών, όσο και η επάρκεια του προγράμματος περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Ως εκ τούτου, οι έλεγχοι της Επιτροπής όχι μόνο ενισχύουν την αξιοπιστία των δεδομένων της περιβαλλοντικής

παρακολούθησης, αλλά και προαγάγουν την εναρμόνιση των μεθόδων μέτρησης και της περιβαλλοντικής παρακολούθησης ((2000/473/Ευρατόμ), 2000).

2.2 Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) και το Τμήμα Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος (ΤΕΡΠ)

Η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) είναι η αρμόδια αρχή για τον έλεγχο, τη ρύθμιση και την εποπτεία του τομέα πυρηνικής ενέργειας, πυρηνικής τεχνολογίας, ραδιολογικής, πυρηνικής ασφάλειας και ακτινοπροστασίας. Είναι τεχνολογικός φορέας, έχει χαρακτήρα Νομικού Προσώπου Δημοσίου Δικαίου (ΝΠΔΔ), και απολαμβάνει πλήρους διοικητικής και οικονομικής αυτοτέλειας. Υπάγεται στον Υπουργό Ανάπτυξης και Επενδύσεων και εποπτεύεται από αυτόν. Κύρια αρμοδιότητα της ΕΕΑΕ είναι να θέτει τους κανόνες ραδιολογικής ασφάλειας μέσω της έκδοσης των σχετικών κανονισμών και της σύνταξης και προώθησης σχετικής νομοθεσίας. Επιπρόσθετα, διασφαλίζει τη συμμόρφωση με το θεσμικό πλαίσιο κυρίως μέσω:

1. της διενέργειας ελέγχων και μετρήσεων
2. της παρακολούθησης των επιπέδων ραδιενέργειας στο περιβάλλον
3. της παρακολούθησης των δόσεων των εργαζομένων με ακτινοβολίες
4. της παροχής συνεχούς εκπαίδευσης και κατάρτισης
5. της έγκυρης και συστηματικής ενημέρωσης της κοινής γνώμης και Πολιτείας.

Η ΕΕΑΕ εφαρμόζει ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης ποιότητας το οποίο είναι σύμφωνο με τις απαιτήσεις του Διεθνούς Προτύπου ISO 9001:2015 και ενσωματώνει τις επιμέρους διαπιστεύσεις και πιστοποιήσεις των παρεχόμενων υπηρεσιών της.

Ένα από τα τμήματα της ΕΕΑΕ είναι το Τμήμα Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος (ΤΕΡΠ). Το ΤΕΡΠ της ΕΕΑΕ αποτελεί θεσμοθετημένο Τμήμα της ΕΕΑΕ, το οποίο λειτουργεί υπό τη Διεύθυνση Εκπαίδευσης, Ρυθμιστικού Σχεδιασμού, Υποδομών και Έρευνας της ΕΕΑΕ.

Αρμοδιότητες του ΤΕΡΠ είναι η παρακολούθηση/ επόπτευση της ραδιενέργειας περιβάλλοντος σε εθνικό επίπεδο, ο προσδιορισμός της φύσης και της έκτασής της σε τακτική βάση όσο και σε έκτακτες καταστάσεις, ο συντονισμός άλλων εξουσιοδοτημένων φορέων και η τήρηση του σχετικού εθνικού αρχείου. Μέσω του ΤΕΡΠ, γίνονται εργαστηριακές μετρήσεις περιβαλλοντικών δειγμάτων, μετρήσεις ραδονίου και πραγματοποιούνται επιτόπιες μετρήσεις και περιβαλλοντολογικοί έλεγχοι. Για την επίτευξη της αποστολής του, το ΤΕΡΠ έχει αναπτύξει μεθόδους και τεχνικές προσδιορισμού των φυσικών και τεχνητών ραδιονουκλιδίων για περιβαλλοντικά δείγματα. Οι μέθοδοι για την ραδιολογική ανάλυση περιβαλλοντικών δειγμάτων είναι οι εξής:

1. Η γ – φασματοσκοπία σε διατάξεις χαμηλού υποβάθρου, η οποία εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ραδιοϊσοτόπων σε περιβαλλοντικά δείγματα χρησιμοποιώντας ανιχνευτές υπερκαθαρού Γερμανίου (HPGe detectors). Επιτρέπουν την ταυτόχρονη ανίχνευση φυσικών και τεχνητών ραδιονουκλιδίων από τη χαρακτηριστική γ - ακτινοβολία που εκπέμπουν. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο ISO 17025 και έχουν πιστοποιηθεί από το Εθνικό Συμβούλιο Διαπίστευσης. Οι μετρήσεις αφορούν ενδεικτικά δείγματα τροφίμων, οικοδομικών υλικών, χώματος, φίλτρων αέρα.
2. Η α – φασματοσκοπία, η οποία χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση ραδιονουκλιδίων που εκπέμπουν α - ακτινοβολία. Μελετώνται τα φυσικά ραδιοϊσότοπα του Ουρανίου, του Θορίου, του Ραδίου και του Πολωνίου, καθώς και τα τεχνητά ραδιοϊσότοπα Πλουτώνιο, Αμερίκιο και Κούριο. Σημαντικό πλεονέκτημα της α – φασματοσκοπίας είναι η δυνατότητα μέτρησης χαμηλών συγκεντρώσεων ραδιενέργειας της τάξεως των mBq με υψηλή ακρίβεια. Για τη μέτρηση μικρών ενεργοτήτων απαιτούνται μετρητικά συστήματα με χαμηλό όριο ανίχνευσης, δηλαδή συστήματα με χαμηλό υπόβαθρο και μετρήσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας. Για τον λόγο αυτόν, το ΤΕΡΠ διαθέτει ένα σύστημα α -φασματοσκοπικής ανάλυσης με ανιχνευτές πυριτίου καθώς και ένα πλήρως εξοπλισμένο χημείο για την απομόνωση ραδιονουκλιδίων και την παρασκευή των προς μέτρηση δειγμάτων. Τα δείγματα που μετρούνται κυρίως αφορούν δείγματα πόσιμου νερού, δείγματα νερού ιαματικών πηγών, δείγματα από εναποθέσεις φωσφογύψου καθώς και δείγματα νερού που συλλέγονται από θάλασσες και ποταμούς.
3. Η μέθοδος μέτρησης ολικής α και β ακτινοβολίας, η εφαρμογή της οποίας γίνεται για τον προκαταρκτικό έλεγχο δειγμάτων. Τα δείγματα που μελετώνται αφορούν δείγματα που προκύπτουν από έλεγχο διαρροής από ραδιενεργές πηγές (smear test), δείγματα πόσιμων νερών, δείγματα επιφανειακών και υπόγειων νερών καθώς και φίλτρα αέρα. Οι ανιχνευτικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται είναι ο ανιχνευτής αερίου, με θωράκιση μόλυβδου και αυτόματο προωθητή δειγμάτων καθώς και ο υγρός σπινθηριστής υψηλής ακρίβειας.

Πέρα από τις μετρήσεις των ραδιολογικών δειγμάτων το ΤΕΡΠ διενεργεί και μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου. Διαθέτει και ενεργητικές και παθητικές μεθόδους μέτρησης που βασίζονται στην ανίχνευση σωματιδίων – α που εκπέμπονται κατά τη ραδιενεργό διάσπασή τους. Αναφορικά με τις μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου σε κατοικίες και εργασιακούς χώρους χρησιμοποιούνται δοσίμετρα που βασίζονται στην τεχνική ανιχνευτών ιχνών. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στο διεθνές πρότυπο ISO 11665 και είναι διαπιστευμένη σύμφωνα με το πρότυπο ISO 17025. Παράλληλα, πραγματοποιούνται μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου στο νερό χρησιμοποιώντας κατάλληλο εξοπλισμό (α guard). (ΕΕΑΕ, www.eeae.gr, 2019).

Οι φορείς που εμπλέκονται έτσι ώστε να τεθούν σε εφαρμογή οι συστάσεις της Συνθήκης Ευρατόμ είναι η ΕΕΑΕ και το Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών

Επιστημών «Δημόκριτος» (Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος). Για το λόγο αυτό, και οι δύο φορείς διαθέτουν κατάλληλες διαδικασίες και συστήματα παρακολούθησης για αυτόματο και συνεχή έλεγχο του ρυθμού δόσης της ακτινοβολίας περιβάλλοντος, διαδικασίες και συστήματα ελέγχου και παρακολούθησης της συγκέντρωσης της ραδιενέργειας στον αέρα, στο νερό, στο χώμα, στα τρόφιμα, καθώς και διαδικασίες και συστήματα παρακολούθησης της ραδιενέργειας σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Ειδικά στην περίπτωση των καταστάσεων έκτακτης ανάγκης η ΕΕΑΕ συνεπικουρείται από ένα δίκτυο συνεργαζόμενων εργαστηρίων στο οποίο συμμετέχουν:

- Εργαστήριο Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος, ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος
- Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ
- Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΑΠΘ
- Εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής του Τμήματος Φυσικής του ΑΠΘ
- Εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
- Εργαστήριο Αναλυτικής και Περιβαλλοντικής Χημείας της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης
- Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών

Τέλος, μια επιπλέον αρμοδιότητα της ΕΕΑΕ, είναι η ενημέρωση του κράτους και του γενικού πληθυσμού για θέματα που αφορούν τη ραδιενέργεια περιβάλλοντος.

Στην Ελλάδα υπάρχει αυτόματο δίκτυο επίπτωσης του ρυθμού δόσης γ-ακτινοβολίας προερχόμενη από το περιβάλλον. Αποτελείται από είκοσι τέσσερις σταθμούς παρακολούθησης του ρυθμού δόσης της ραδιενέργειας, οι οποίοι βρίσκονται σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Όλοι οι σταθμοί λειτουργούν σε συστηματική βάση και τα αποτελέσματα που προκύπτουν μεταφέρονται στη κεντρική βάση δεδομένων, η οποία βρίσκεται υπό την εποπτεία της ΕΕΑΕ. Σε περίπτωση που η τιμή του ρυθμού δόσης ξεπεράσει μια προκαθορισμένη τιμή, η ΕΕΑΕ ενημερώνεται. Στις Εικόνες (2.1) και (2.2) παρουσιάζονται, ο χάρτης της Ελλάδος με τους σταθμούς παρακολούθησης και ενδεικτικά η διάταξη που χρησιμοποιείται για την συλλογή δεδομένων, η οποία βρίσκεται στη Σαλαμίνα.



Εικόνα 2.1 Χάρτης με τους τηλεμετρικούς σταθμούς παρακολούθησης στην Ελλάδα (https://eeae.gr/files/anakoinoseis/reports/art_35_technical_report_gr_19-04.pdf)



Εικόνα 2.2 Σταθμός Σαλαμίνας (https://eeae.gr/files/anakoinoseis/reports/art_35_technical_report_gr_19-04.pdf)

Η ΕΕΑΕ διαθέτει επίσης σύστημα παρακολούθησης για την επόπτευση της ραδιενέργειας στον ατμοσφαιρικό αέρα. Διεξάγονται δειγματοληψίες μεγάλου όγκου αέρα με χρήση φίλτρων. Κάποια από τα συστήματα παρακολούθησης είναι το αυτόματο τηλεμετρικό σύστημα, αποτελούμενο από τρεις σταθμούς, για συλλογή

αιωρούμενων σωματιδίων και Ιωδίου, καθώς και αντλία υψηλής παροχής όγκου για συλλογή αιωρούμενων σωματιδίων και Ιωδίου. Και τα δύο συστήματα δίνουν τη δυνατότητα για συνεχείς και σε πραγματικό χρόνο μετρήσεις των επιπέδων ραδιενέργειας στο περιβάλλον.

Παράλληλα, εκτός από μετρήσεις για την επόπτευση της ραδιενέργειας στον ατμοσφαιρικό αέρα, διεξάγονται μετρήσεις για την παρακολούθηση των επιπέδων ραδιενέργειας σε επιφανειακά και υπόγεια ύδατα καθώς και στο πόσιμο νερό. Για τα δείγματα που συλλέγονται από τα επιφανειακά ύδατα, γίνεται ανάλυση για Cs-137, για ολική α και β ακτινοβολία καθώς και για Sr-90, ενώ για δείγματα επιφανειακών υδάτων και πόσιμου νερού, αφού πρώτα οξινιστούν, μελετώνται ως προς ολική α και β ακτινοβολία και για την περιεκτικότητα τους σε U-238 και U-234. Σε περίπτωση που τα επίπεδα ολικής α και β ακτινοβολίας ξεπεράσουν τα 0.1 Bq/L και 1.0 Bq/L και η συγκέντρωση των ισοτόπων του Ουρανίου ξεπεράσει το 20% της αντίστοιχης τιμής, τότε διενεργούνται περεταίρω έλεγχοι για την μελέτη ραδιονουκλιδίων όπως τα Ra-226, Ra-228, Pb-210, Po-210. Για την εκτίμηση των συγκεντρώσεων τριτίου στο πόσιμο νερό στην Ελλάδα διεξάγονται περιοδικοί έλεγχοι, παρόλο που δεν απαιτείται συστηματική ανάλυση των δεδομένων των μετρήσεων στο πόσιμο νερό εξαιτίας της απουσίας των ανθρωπογενών πηγών τριτίου. Για την ισχύ των πιστοποιητικών αναφορικά με την ραδιενέργεια στα ύδατα, η ΕΕΑΕ συνεργάζεται με διαπιστευμένα εργαστήρια.

Επιπλέον, λαμβάνονται δείγματα από χώμα και πετρώματα, τα οποία μελετώνται ως προς την περιεκτικότητά τους σε ραδιενέργεια στα πλαίσια ερευνητικών προγραμμάτων και όχι σαν μέρος του εθνικού συστήματος παρακολούθησης της ραδιενέργειας. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει σύστημα παρακολούθησης την χλωρίδα και την πανίδα στην Ελλάδα, παρά μόνο σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

Στο εθνικό σύστημα παρακολούθησης συμπεριλαμβάνονται και μετρήσεις της περιεκτικότητας της ραδιενέργειας στα τρόφιμα (μικτή δίαιτα). Συλλέγονται δείγματα από γαλακτοκομικά προϊόντα, κρέατα, ψάρια, θαλασσινά, φρούτα, λαχανικά κ.α.. Τα τρόφιμα που μελετώνται επιλέγονται ύστερα από στατιστικές αναλύσεις που αφορούν τη μέση κατανάλωση τροφίμων του πληθυσμού της Ελλάδας. Επιπλέον, λαμβάνονται δείγματα γάλατος ξεχωριστά δυο φορές τον χρόνο, τα οποία αναλύονται για Cs-137, Cs-134 και I-131.

Στην παρούσα ΔΕ, μελετήθηκαν δείγματα που λαμβάνονται από την αντλία υψηλής παροχής όγκου που διαθέτει η ΕΕΑΕ (βλ. παράγραφο 4.2). Η αντλία παρέχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης δειγματοληψίας φίλτρων ινών γυαλιού και φίλτρων ενεργού άνθρακα για μελέτη των αιωρούμενων σωματιδίων και του ραδιενεργού Ιωδίου. Η κάθε δειγματοληψία έχει χρονική διάρκεια περίπου 10 ημέρες, κατά συνέπεια λαμβάνονται δύο με τρία δείγματα μηνιαίως. Στη συνέχεια τα δείγματα αυτά αναλύονται με την τεχνική της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης με χρήση ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου για τον προσδιορισμό των ραδιοϊσοτόπων και της συγκέντρωσής τους. (ΕΕΑΕ, www.eeae.gr, 2019).

3. Πειραματική και υπολογιστική βαθμονόμηση γ-ανιχνευτικής διάταξης για δείγματα όγκου

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, αναλύεται η τεχνική της φασματοσκοπίας ακτίνων γ χρησιμοποιώντας ανιχνευτές υπερκαθαρού Γερμανίου (HPGe detectors) και περιγράφεται τόσο η διάταξη, όσο και η λειτουργία αυτών των ανιχνευτών. Στη συνέχεια, γίνεται λόγος για την ανιχνευτική διάταξη υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe) DIAS σχετικής απόδοσης 40% που διαθέτει το Τμήμα Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (ΤΕΡΠ-ΕΕΑΕ), η οποία συμπεριλήφθηκε πρόσφατα στον πειραματικό εξοπλισμό του εργαστηρίου. Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την βαθμονόμηση της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης DIAS. Η βαθμονόμηση της απόδοσης γίνεται με συνδυασμό υπολογιστικών και πειραματικών μεθόδων. Οι υπολογιστικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τη διενέργεια προσομοιώσεων Monte Carlo με χρήση του κώδικα PENELOPE. Στο κεφάλαιο αυτό, η βαθμονόμηση αφορά στη καθιερωμένη γεωμετρία όγκου του ΤΕΡΠ-ΕΕΑΕ όγκου.

3.2 Τεχνική γ- φασματοσκοπίας

Η γ- φασματοσκοπία θεωρείται μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους ποσοτικής και ποιοτικής ανάλυσης δειγμάτων, ως προς την περιεκτικότητα τους σε ραδιενέργεια, καθώς τα περισσότερα ραδιενεργά ισότοπα εκπέμπουν γ- ακτινοβολία . Με τη γ- φασματοσκοπία είναι εφικτή η εύρεση της σύστασης του εξεταζόμενου δείγματος, δηλαδή η ταυτοποίηση των ραδιοϊσοτόπων που περιέχονται μέσα σε αυτό, και παράλληλα, επιτρέπει τον προσδιορισμό της ενεργότητας των ραδιοϊσοτόπων που εκπέμπουν γ- ακτινοβολία. Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της γ-φασματοσκοπίας είναι ότι αποτελεί μια μη καταστροφική τεχνική, καθώς συνήθως δεν απαιτείται χημική προετοιμασία του δείγματος για την ανάλυση των ραδιοϊσοτόπων του και των προσδιορισμό της ραδιενέργειάς τους. Επιπλέον, είναι δυνατόν να αναλυθούν πάσης φύσεως δείγματα, ανεξαρτήτως κατάστασης (στερεά, υγρά ή αέρια) και σύστασης. Με την γ-φασματοσκοπία μελετώνται και φυσικά ή τεχνητά ραδιοϊσότοπα από δείγματα που προέρχονται από το περιβάλλον, τα οποία συνήθως έχουν χαμηλά επίπεδα ραδιενέργειας (Σαλπαδήμος, Βαθμονόμηση Απόδοσης του ανιχνευτή υπερκαθαρού Γερμανίου του Τμήματος Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας, 2020), (Reguigui, 2006), (Παπαδιονυσίου, 2015), (Κεκκάτος, 2014).

Οι ραδιενεργοί πυρήνες που μελετώνται με τη γ - φασματοσκοπία είναι πυρήνες οι οποίοι εκπέμπουν ακτίνες-γ σε ευρύ φάσμα ενεργειών, ενδεικτικά 30 – 3000 keV. Για αυτές τις ενέργειες παράγονται γραμμικά φάσματα ακτίνων-γ, δηλαδή τα φωτόνια εκπέμπονται σε διακριτές ενέργειες. Για πολύ υψηλότερες ενέργειες, άνω του 1 TeV, παράγονται συνεχή φάσματα, τα οποία παρατηρούνται στους τομείς της φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων και της αστροφυσικής (Παπαδιονυσίου, 2015), (Σαλπαδήμος, 2020).

Πιο αναλυτικά, με τη μέθοδο της γ-φασματοσκοπίας γίνεται επεξεργασία ενεργειακών φασμάτων των φωτονίων τα οποία εκπέμπονται κατά τη διάσπαση ραδιενεργών πυρήνων και ανιχνεύονται με τη βοήθεια κατάλληλου ανιχνευτικού συστήματος, σχηματίζοντας το αντίστοιχο ενεργειακό φάσμα. Τα τμήματα του ενεργειακού φάσματος, τα οποία ονομάζονται και «φωτοκορυφές απόθεσης ενέργειας» δημιουργούνται από εκείνα τα φωτόνια, τα οποία όταν αλληλεπιδράσουν με τον ανιχνευτή αποθέτουν όλη την ενέργειά τους σε αυτόν. Αυτά τα φωτόνια έχουν συγκεκριμένη αρχική ενέργεια και είναι χαρακτηριστική του ραδιενεργού πυρήνα που διασπάται. Καθώς τα φωτόνια συγκεκριμένης ενέργειας ανιχνεύονται από τον ανιχνευτή, στο ενεργειακό φάσμα δημιουργείται καμπύλη κανονικής κατανομής, η οποία ονομάζεται φωτοκορυφή. Από τη θέση των φωτοκορυφών στο ενεργειακό φάσμα προσδιορίζεται η ενέργεια των φωτονίων που εκπέμφθηκαν από τον πυρήνα και επομένως δίνεται η δυνατότητα ταυτοποίησης του διασπώμενου πυρήνα. Παράλληλα, το εμβαδόν της κάθε φωτοκορυφής πλήρους απόθεσης αντιστοιχεί στο πλήθος των φωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας που ανιχνεύτηκαν. Με αυτόν τρόπο μπορεί να υπολογιστεί η ενεργότητα των ραδιοϊσοτόπων στο δείγμα (Παπαδιονυσίου, 2015).

Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται σήμερα κατά τη γ-φασματοσκοπική ανάλυση είναι οι ανιχνευτές Γερμανίου (Ge), υψηλής διακριτικής ικανότητας, η περιγραφή των οποίων γίνεται στην παράγραφο (3.3.2).

3.3.1 Ανιχνευτική Διάταξη

Οι ανιχνευτικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην γ-φασματοσκοπία είναι ανιχνευτικές διατάξεις με ανιχνευτή υπερκαθαρού Γερμανίου (HPGe detectors). Οι διατάξεις αυτές απαρτίζονται, πέρα από τον ανιχνευτή υπερκαθαρού Γερμανίου, από ένα τροφοδοτικό υψηλής τάσης, έναν προενισχυτή έναν ενισχυτή, έναν μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC converter) και πολυκαναλικό αναλυτή (Multichannel Analyser, MCA). Με τη λειτουργία του ηλεκτρονικού συστήματος, γίνεται η συλλογή των παραγόμενων από παλμούς ηλεκτρονίων, η επεξεργασία των παλμών αυτών και η ταξινόμηση τους σε ενέργειες (Reguigui, 2006). Η διαδικασία που ακολουθείται περιγράφεται ακολούθως.

Τα φωτόνια αλληλεπιδρούν με τον κρύσταλλο του ανιχνευτή, παράγοντας ηλεκτρόνια και οπές. Εφαρμόζοντας κατάλληλη τάση, τα ηλεκτρόνια απομακρύνονται από τον κρύσταλλο. Με την προσανατολισμένη κίνηση των ηλεκτρονίων (ηλεκτρικό ρεύμα), δημιουργούνται παλμοί, οι οποίοι ενισχύονται αρχικά από τον προενισχυτή, και στην συνέχεια ενισχύονται περαιτέρω και διαμορφώνονται με την βοήθεια του ενισχυτή. Χρησιμοποιώντας τον μετατροπέα (ADC converter), η ένταση του παλμού μετατρέπεται σε αριθμητική τιμή, η οποία τελικά αποστέλλεται στον πολυκαναλικό αναλυτή (MCA). Κάθε φωτόνιο που αποδίδει ενέργεια στον ανιχνευτή αντιστοιχεί σε μια ψηφιακή πληροφορία που καταγράφεται στον πολυκαναλικό ανιχνευτή. Για τον σκοπό αυτό, ο πολυκαναλικός ανιχνευτής διαθέτει συγκεκριμένο πλήθος ενεργειακών διαμερίσεων (καναλιών), όπου καταγράφονται τα φωτόνια των διαφόρων

ενεργειών. Στο τέλος, το σήμα που προκύπτει, αποστέλλεται στον υπολογιστή, ο οποίος με την βοήθεια κατάλληλων λογισμικών για ανάλυση φασμάτων, δίνει την δυνατότητα οπτικοποίησης και επεξεργασίας του φάσματος, καθώς και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις μετρήσεις (Reguigui, 2006), (Παπαδιονυσίου, 2015).

Σήμερα, με την εξέλιξη της τεχνολογίας, ο ενισχυτής, ο μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό και ο πολυκαναλικός ανιχνευτής αντικαθιστούνται με ένα σύστημα επεξεργασίας ψηφιακού σήματος (DSP ή DSA), το οποίο διενεργεί τις ίδιες λειτουργίες με το αναλογικό σύστημα, με τη διαφορά ότι τις εφαρμόζει στη ψηφιακή μορφή του παλμού από τον προενισχυτή. Το DSA επεξεργάζεται και φιλτράρει τα σήματα που δέχεται με ταχύρυθμους ψηφιακούς αριθμητικούς υπολογισμούς (Reguigui, 2006), (Σαλαπαδήμος, 2020).

3.3.2 Ανιχνευτής Γερμανίου

Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται κυρίως στη γ-φασματοσκοπία είναι οι ανιχνευτές Γερμανίου, οι οποίοι ανήκουν στην κατηγορία των ημιαγωγών ανιχνευτών. Τέτοιου είδους ανιχνευτές είναι δίοδοι με δομή επαφών P-I-N, στην οποία η εγγενής περιοχή είναι ευαίσθητη στην ιοντίζουσα ακτινοβολία, ιδιαίτερα στις ακτίνες $-X$ και στις ακτίνες $-γ$. Τα φωτόνια, επειδή δεν είναι φορτισμένα, δεν ανιχνεύονται άμεσα από τον ανιχνευτή. Η ανίχνευση τους βασίζεται στις αλληλεπιδράσεις που πραγματοποιούν με τον ανιχνευτή και με τις αλληλεπιδράσεις αυτές παράγονται ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές (κενές θέσεις ηλεκτρονίων, οι οποίες λειτουργούν ως θετικά φορτία). Με αντίστροφη πόλωση, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος της εγγενούς περιοχής και της περιοχής φορτίου χώρου, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια και οι οπές να κινούνται μέχρι τα ηλεκτρόδια. Το φορτίο αυτό, είναι ανάλογο της ενέργειας που εναποτίθεται στον ανιχνευτή, μετατρέπεται σε παλμό τάσης από τον προενισχυτή.

Για να εξασφαλίζεται η ιδανική λειτουργία του ανιχνευτή, ο ανιχνευτής είναι συνδεδεμένος με δεξαμενή υγρού αζώτου, η οποία βρίσκεται σε θερμική επαφή με τον ανιχνευτή γερμανίου και διατηρείται σε θερμοκρασία 77 K. Επιπλέον, οι ανιχνευτές Γερμανίου είναι τοποθετημένοι μέσα σε ειδική θωράκιση με σκοπό την πλήρη απομόνωση του ανιχνευτή από οποιαδήποτε ακτινοβολία που δεν προέρχεται από το δείγμα που μελετάται, όπως για παράδειγμα η κοσμική ακτινοβολία, ραδιενέργεια από οικοδομικά υλικά κ.α. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη θωράκιση του ανιχνευτή από τη γ-ακτινοβολία είναι υλικά με μεγάλο ατομικό αριθμό, όπως ο μόλυβδος και ο χαλκός και έχουν αυξημένη ικανότητα εξασθένισης φωτονίων.

3.3.3 Η Ανιχνευτική Διάταξη του ΤΕΡΠ της ΕΕΑΕ.

Ο ανιχνευτής που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ΔΕ κατασκευάστηκε από την εταιρεία Canberra (Mirion). Πρόκειται για ανιχνευτή ημιαγωγό, υπερκαθαρού γερμανίου, τύπου $-p$. Το

μοντέλο του ανιχνευτή είναι GX4018 και ο σειριακός του αριθμός του 21207. Επιπλέον, ο ανιχνευτής είναι ομοαξονικός, ανοιχτού τύπου. Η βέλτιστη τάση λειτουργίας του είναι τα 3500 V, ενώ η τάση αποκοπής του αντιστοιχεί στα 3000 V. Η διαρροή ρεύματος κατά την εφαρμογή της βέλτιστης τάσης λειτουργίας του ανιχνευτή αντιστοιχεί σε 0.01 nA. Ο ανιχνευτής περιβάλλεται από θωράκιση τριών στρωμάτων: εσωτερικό στρώμα: Χαλκός, ενδιάμεσο στρώμα: Κάδμιο, εξωτερικό στρώμα: Μόλυβδος.

Ο κρυστάτης του ανιχνευτή είναι κατακόρυφος, τύπου 7500SL και είναι κατασκευασμένος από αλουμίνιο. Μέσα στον κρυστάτη συμπεριλαμβάνεται και προενισχυτής, μοντέλου iPA -SL, ώστε η ψύξη να βελτιστοποιεί τη λειτουργία του. Τέλος, ο κρυστάτης είναι εμβαπτισμένος σε δοχείο υγρού αζώτου Dewar. Σύμφωνα με το πιστοποιητικό του ανιχνευτή, η σχετική απόδοσή του είναι 40% και η διακριτική του ικανότητα έχει εκτιμηθεί ως :

- FWHM : 0.875 keV για ενέργεια φωτονίων 122 keV,
- FWHM: 1.8 keV για ενέργεια φωτονίων 1.33 MeV.

Όσον αφορά τις διαστάσεις του κρυστάλλου του ανιχνευτή, σύμφωνα με το πιστοποιητικό η διάμετρος του είναι 6.05 cm, το μήκος του 6.23 cm και η απόσταση του κρυστάλλου από το παράθυρο του ανιχνευτή 0.6 cm. Ως υλικό του κρυστάλλου του ανιχνευτή χρησιμοποιήθηκε το Γερμάνιο.

Όλες οι παραπάνω πληροφορίες λαμβάνονται από το πιστοποιητικό του ανιχνευτή, το οποίο παρατίθενται στο Παράρτημα (1)

3.4 Ο κώδικας PENELOPE.

Ο κώδικας PENELOPE ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας ΔΕ, χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση προβλημάτων αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας και ύλης μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo. Αναπτύχθηκε από τους F.Salvat, J.M.Fernandez-Varea και J.Sempau και το όνομα του αποτελεί ακρωνύμιο του **PEN**etration and **E**nergy **L**oss of **P**ositrons and **E**lectrons. Ο κώδικας αυτός είναι ένας υπολογιστικός κώδικας, γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, μέσω του οποίου προσομοιώνονται τα φαινόμενα διάδοσης ποζιτρονίων και ηλεκτρονίων μέσα στην ύλη, χρησιμοποιώντας σύνθετες γεωμετρίες και διαφορετικά υλικά. Μεταγενέστερα, δόθηκε η δυνατότητα να εξετάζονται τα φαινόμενα διάδοσης φωτονίων μέσα στην ύλη.

Ο κώδικας απαρτίζεται από ένα σύνολο υπορουτίνων, οι οποίες εμπεριέχουν μηχανισμούς για την περιγραφή της αλληλεπίδρασης φωτονίων και σωματιδίων β. Οι προσομοιώσεις καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα ενεργειών που κυμαίνεται από 50 eV έως 1 GeV. Όσον αφορά τους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης που λαμβάνονται υπόψη στις προσομοιώσεις, για τα φωτόνια είναι το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η σκέδαση Compton, η δίδυμη γένεση, και η ελαστική σκέδαση Rayleigh, ενώ για ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια είναι η ελαστική και

ανελαστική σκέδαση, η εξαΰλωση, η ακτινοβολία πέδησης και ο ιονισμός εσωτερικών στιβάδων του ατόμου. Για τις ενέργειες που είναι μικρότερες από 1 keV, οι προσομοιώσεις έχουν μόνο ποιοτικό χαρακτήρα. Πρέπει να σημειωθεί επίσης, ότι για στοιχεία με μεσαίους ή μεγάλους ατομικούς αριθμούς, οι δευτερογενείς εκπομπές φωτονίων με ενέργειες μικρότερες από την ενέργεια αποκοπής (cutoff energy), δεν προσομοιώνονται με τον κώδικα PENELOPE.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο κώδικας PENELOPE, και συγκεκριμένα η έκδοση PENELOPE 2018, χρησιμοποιείται για την διεξαγωγή προσομοιώσεων που αντιστοιχούν στην ανιχνευτική διάταξη DIAS του ΤΕΡΠ της ΕΕΑΕ, προκειμένου να κατασκευαστούν οι καμπύλες βαθμονόμησης για διάφορες γεωμετρίες.

3.4.1 Η δομή του κώδικα

Ο κώδικας PENELOPE δομείται πάνω σε ένα κυρίως πρόγραμμα το οποίο συνδέεται με συγκεκριμένους πηγαίους κώδικες και περιλαμβάνουν ένα σύνολο από υπορουτίνες (penelope.f, penvarred.f, pengeom.f, timer.f), οι οποίες συνδέονται άμεσα με τον κώδικα. Ο κώδικας αυτός πραγματοποιεί την προσομοίωση δημιουργώντας τις ιστορίες των φωτονίων ή των σωματιδίων- β και πραγματοποιεί τις αλληλεπιδράσεις της ακτινοβολίας με την ύλη. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επέμβει στο κυρίως πρόγραμμα αλλά δεν μπορεί να τροποποιήσει τις υπορουτίνες.

Τα κυρίως προγράμματα του κώδικα που χρησιμοποιούνται για την διεξαγωγή των προσομοιώσεων είναι τα προγράμματα PENCYL και PENMAIN. Το πρόγραμμα PENCYL χρησιμοποιείται για προσομοιώσεις με σύνθετες κυλινδρικές γεωμετρίες στις οποίες τόσο η πηγή όσο και τα υλικά αλληλεπίδρασης είναι συμμετρικά ως προς τον άξονα z. Όσον αφορά το πρόγραμμα PENMAIN, το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων με πιο σύνθετες γεωμετρίες. Και για τα δύο προγράμματα, η γεωμετρία περιγράφεται σε ξεχωριστό αρχείο εισόδου το οποίο καλείται αρχείο γεωμετρίας.

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η εκτέλεση όλων των προσομοιώσεων έγινε με την βοήθεια του κώδικα PENMAIN, χωρίς περεταίρω τροποποίησή του. Ο κώδικας PENMAIN αποτελείται από τα αρχεία εισόδου και κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης δημιουργούνται κατάλληλα αρχεία εξόδου, τα οποία περιέχουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

3.4.2 Τα αρχεία εισόδου του κώδικα PENMAIN

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εκτέλεση του κώδικα PENMAIN αποτελούν τα τρία είδη αρχείων εισόδου, τα οποία είναι τα εξής:

- Τα αρχεία εισόδου τύπου `.mat`, στα οποία περιγράφονται όλα τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση,
- Το αρχείο εισόδου τύπου `.geo`, στο οποίο περιγράφεται η γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή και
- Το αρχείο εισόδου τύπου `.in`, στο οποίο εισάγονται διάφορες παράμετροι της προσομοίωσης.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, περιγράφονται αναλυτικότερα τα τρία παραπάνω αρχεία εισόδου. Για την εκτέλεση της προσομοίωσης, αξιοποιούνται ένα αρχείο εισόδου `.in`, ένα αρχείο γεωμετρίας (`.geo`), ενώ ο αριθμός των αρχείων τύπου `.mat` ποικίλει και σχετίζεται αποκλειστικά με την εκάστοτε γεωμετρία που προσομοιώνεται.

3.4.2.1 Αρχεία εισόδου τύπου `.mat`

Τα αρχεία εισόδου τύπου `.mat` παρέχουν πληροφορίες αναφορικά με τα χαρακτηριστικά των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στη προσομοίωση. Τα υλικά αυτά μπορεί να είναι είτε χημικά στοιχεία, είτε χημικές ενώσεις. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία των αρχείων αυτών είναι το πρόγραμμα `material.exe`, δίνοντας τη δυνατότητα στον χρήστη είτε να χρησιμοποιήσει χημικά στοιχεία ή χημικές ενώσεις που διατίθενται ήδη από βιβλιοθήκες που παρέχει ο κώδικας, είτε να συνθέσει δικές του χημικές ενώσεις ανάλογα με τις ανάγκες της προσομοίωσης.

Εάν η χημική ένωση υπάρχει διαθέσιμη στην βιβλιοθήκη, ο χρήστης -μέσω του αρχείου `material-list.txt`- για να δημιουργήσει το αρχείο `.mat`, εισάγει στο πρόγραμμα μόνο τον αριθμό της λίστας που αντιστοιχεί στο υλικό ενδιαφέροντος. Ενώ για τη δημιουργία μιας νέας χημικής ένωσης, ο χρήστης εισάγει στο πρόγραμμα το όνομα της χημικής ένωσης, τον αριθμό των χημικών στοιχείων από τα οποία αποτελείται, τον ατομικό αριθμό κάθε χημικού στοιχείου καθώς και την στοιχειομετρία της χημικής ένωσης. Στην περίπτωση του κενού, δεν δημιουργείται αρχείο υλικού αλλά μπορεί να προσδιοριστεί μέσω του αρχείου γεωμετρίας. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε υλικό που χρησιμοποιείται στη προσομοίωση αντιστοιχεί σε ένα αρχείο τύπου `.mat`.

3.4.2.2 Αρχεία εισόδου τύπου `.geo` (αρχεία γεωμετρίας)

Τα αρχεία εισόδου τύπου `.geo` περιγράφουν την γεωμετρία που χρησιμοποιείται για τις προσομοιώσεις. Τα αρχεία αυτά κατασκευάζονται από τον ίδιο τον χρήστη και παρέχουν την δυνατότητα κατασκευής πολύπλοκων γεωμετριών. Ο ίδιος ο χρήστης, για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας, μπορεί να ορίσει σταθερά επίπεδα στον χώρο και κωνικές τομές μέσω εντολών που παρέχει έτοιμες το πρόγραμμα. Για τα αρχεία γεωμετρίας που κατασκευάστηκαν, έτσι ώστε να διενεργηθούν οι απαιτούμενες προσομοιώσεις, αξιοποιήθηκαν μόνο επίπεδα και κύλινδροι και

όχι κωνικές τομές. Από τα επίπεδα και τους κυλίνδρους που ορίζει ο χρήστης, προκύπτουν γεωμετρικά σώματα, τα οποία αντιστοιχούνται με ένα αρχείο υλικού (.mat).

Για την απεικόνιση των αρχείων γεωμετρίας χρησιμοποιούνται τα προγράμματα gview2d (απεικόνιση αρχείου γεωμετρίας σε δύο διαστάσεις) και gview3d (απεικόνιση αρχείου γεωμετρίας σε 3 διαστάσεις), τα οποία δίνουν τη δυνατότητα καλύτερης εποπτείας της γεωμετρίας και αποφυγής λάθους στον κώδικα.

3.4.2.3 Αρχεία εισόδου τύπου .in

Στα αρχεία τύπου .in, όλες οι πληροφορίες που είναι απαραίτητες για την διεξαγωγή των προσομοιώσεων δίνονται από τον χρήστη. Επιγραμματικά, οι πληροφορίες αυτές αφορούν:

1. Το σύστημα πηγή - ανιχνευτή
2. τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση
3. το αρχείο γεωμετρίας
4. την εναπόθεση ενέργειας στον ανιχνευτή
5. το χρόνο διεξαγωγής της προσομοίωσης.

Ο χρήστης ανάλογα με τις ανάγκες της προσομοίωσης μπορεί να επιλέξει κατάλληλες παραμέτρους για τον προσδιορισμό της πηγής. Έχει τη δυνατότητα να ορίσει το είδος των σωματιδίων ή των φωτονίων που εκπέμπονται από την πηγή, το είδος της πηγής, δηλαδή αν πρόκειται για σημειακή πηγή ή για πηγή όγκου, πηγή που εκπέμπει ισότροπα ή σε συγκεκριμένη στερεά γωνία, καθώς και αν η πηγή είναι μονοενεργειακή ή πηγή που εκπέμπει σωματίδια/φωτόνια σε ένα ευρύ φάσμα ενεργειών. Επιπλέον, από το αρχείο γεωμετρίας μπορεί να επιλέξει ως πηγή οποιοδήποτε γεωμετρικό σώμα, και να θέσει τόσο τις διαστάσεις του ενεργού σώματος της πηγής όσο και την απόσταση του γεωμετρικού κέντρου της πηγής αυτής σε σχέση με τον ανιχνευτή.

Στη συνέχεια, καλούνται τα αρχεία υλικών που έχουν δημιουργηθεί από τον χρήστη. Στο αρχείο .in, εισάγεται το όνομα του αρχείου υλικού καθώς και ορισμένες παράμετροι όπως οι ενέργειες αποκοπής ανά υλικό και τύπο ακτινοβολίας. Η σειρά που τοποθετούνται τα αρχεία υλικών στο αρχείο εισόδου τύπου .in, πρέπει να συνάδει με την σειρά που χρησιμοποιούνται στο αρχείο γεωμετρίας. Τέλος, καλείται το αρχείο γεωμετρίας που έχει κατασκευάσει ο χρήστης.

Ακόμη, επιλέγεται το είδος των ανιχνευτών που θα χρησιμοποιηθούν καθώς και τα χαρακτηριστικά τους. Οι τύποι των ανιχνευτών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι:

- ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας, ο οποίος καταγράφει το ενεργειακό φάσμα αποτιθέμενης ενέργειας από τα φωτόνια ή και τα σωματίδια που προσπίπτουν σε αυτόν,
- ο ανιχνευτής δόσης, ο οποίος καταγράφει την κατανομή δόσης στον όγκο του ανιχνευτή και

- ο ανιχνευτής αλληλεπίδρασης, στον οποίο καταγράφεται το ενεργειακό φάσμα των φωτονίων ή και των σωματιδίων που προσπίπτουν σε αυτόν.

Στην παρούσα ΔΕ ο ανιχνευτής που καλείται για τις προσομοιώσεις είναι ο ανιχνευτής αποτιθέμενης ενέργειας.

Κάποιες επιπλέον πληροφορίες που εισάγονται στο αρχείο εισόδου και αφορούν τον ανιχνευτή είναι η ελάχιστη και η μέγιστη ενέργεια ανίχνευσης καθώς και το πλήθος των ενεργειακών καναλιών διαμέρισης του ενεργειακού φάσματος. Τέλος, ορίζεται ο μέγιστος χρόνος προσομοίωσης ή ο μέγιστος αριθμός πρωτογενών σωματιδίων τα οποία θα προσομοιωθούν (ιστορίες).

3.4.3 Τα αρχεία εξόδου του κώδικα PENMAIN.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως τα αρχεία εξόδου περιέχουν πληροφορίες για τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Τα αρχεία αυτά δημιουργούνται αυτόματα με το που αρχίσει η προσομοίωση και ανανεώνουν τις πληροφορίες που περιέχουν κάθε φορά που καταγράφεται μία ιστορία. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να λαμβάνει τα αποτελέσματα και κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Τα αρχεία εξόδου επιγραμματικά είναι τα εξής:

- dump.dat
- energy-down.dat
- geometry.rep
- penmain.dat
- penmain-res.dat
- polar-angle.dat
- **spc-enddet-01.dat**
- usource.dat
- material.dat
- pennuc.dat

Το αρχείο εξόδου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι το αρχείο spc-enddet-01.dat, στο οποίο περιέχεται το ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων ή των φωτονίων που αποθέτουν μέρος ή ολόκληρη την ενέργειά τους εντός των ορίων των χρησιμοποιούμενων εικονικών ανιχνευτών αποτιθέμενης ενέργειας. Στην παράγραφο 3.6.1, περιγράφεται η διαδικασία υπολογιστικής βαθμονόμησης ανιχνευτικής διάταξης και αναλύεται περαιτέρω το περιεχόμενο του συγκεκριμένου αρχείου εξόδου.

Στο τέλος της ΔΕ στο Παράρτημα (2) παρατίθενται ενδεικτικά παραδείγματα από τα αρχεία εισόδου τύπου .in, .geo που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων.

3.5 Βαθμονόμηση απόδοσης Ανιχνευτικών Διατάξεων

Η απόδοση φωτοκορυφής (full energy peak efficiency- eff_{peak}) μιας ανιχνευτικής διάταξης ορίζεται ως ο λόγος του πλήθους των φωτονίων ενέργειας E_0 , που αλληλεπιδρούν με τον κρύσταλλο του ανιχνευτή και εναποθέτουν όλη τους την ενέργεια σε αυτόν, προς το πλήθος των φωτονίων ενέργειας E_0 που εκπέμπονται από την πηγή. Η απόδοση φωτοκορυφής υπολογίζεται από τη σχέση (Reguigui, 2006) (3.1) :

$$eff = \frac{\text{φωτόνια που έχουν αποθέσει ενέργεια } E_0}{\text{φωτόνια που έχουν εκπεμφθει}} \quad (3.1)$$

Πιο συγκεκριμένα, η απόδοση φωτοκορυφής, εκφράζει την ικανότητα της ανιχνευτικής διάταξης να ανιχνεύει ένα φωτόνιο με την πλήρη ενέργεια του. Τα φωτόνια των οποίων η ενέργεια ανιχνεύεται πλήρως, καταγράφονται στο ενεργειακό φάσμα του, σχηματίζοντας φωτοκορυφές κανονικής κατανομής, Gaussian. Η τιμή της απόδοσης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή, την ενέργεια των φωτονίων, τη γεωμετρία δείγματος – ανιχνευτή και τα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου δείγματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόδοση φωτοκορυφής χρησιμοποιείται στον ποσοτικό προσδιορισμό ισοτόπων κατά την ανάλυση ενός δείγματος.

Στην παρούσα ΔΕ εξετάζεται η ανιχνευτική διάταξη του Τμήματος Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (ΤΕΡΠ) με ανιχνευτή τύπου XtRa η οποία φέρει την ονομασία DIAS. Τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή παρουσιάζονται τόσο στην παράγραφο 3.3.3 όσο και στο Παράτημα (1) .

Η ανωτέρω ανιχνευτική διάταξη τέθηκε σε λειτουργία τον Δεκέμβριο του έτους 2021 και ως εκ τούτου ήταν αναγκαία η βαθμονόμηση απόδοσης η οποία και πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας ΔΕ. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η βαθμονόμηση απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης διεξήχθησαν τόσο μετρήσεις στον ίδιο τον ανιχνευτή με χρήση πρότυπων πηγών βαθμονόμησης όσο και υπολογιστικές προσομοιώσεις με χρήση τεχνικών προσομοίωσης Monte Carlo με τον κώδικα PENELOPE. Σε κάθε περίπτωση, η επικύρωση των μοντέλων προσομοίωσης που αναπτύχθηκαν, πραγματοποιήθηκε μέσω της σύγκρισης πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν τόσο για την πειραματική βαθμονόμηση όσο και για την υπολογιστική βαθμονόμηση της απόδοσης φωτοκορυφής.

3.6 Πειραματικός υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής

Κατά τη πειραματική βαθμονόμηση της απόδοσης, η απόδοση της φωτοκορυφής προσδιορίζεται για συγκεκριμένη γεωμετρία πηγής, ως συνάρτηση της ενέργειας των φωτονίων. Στην παρούσα ΔΕ, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με πιστοποιημένη πρότυπη πηγή βαθμονόμησης διαφορετικής γεωμετρίας, τη πηγή όγκου και τη επιφανειακή πηγή ή πηγή φίλτρου. Οι γεωμετρία αυτή αποτελεί μία από τις κύριες γεωμετρίες των περιβαλλοντικών δειγμάτων που λαμβάνει το ΤΕΡΠ και χρησιμοποιούνται για τις απαιτήσεις των άρθρων 35-36 της Συνθήκης Ευρατόμ. Το πιστοποιητικό της πηγής παρατίθενται στο Παράρτημα (3) της παρούσας ΔΕ.

Σε κάθε περίπτωση η τοποθέτηση της πρότυπης πηγής πραγματοποιείται σε προκαθορισμένη θέση στην ανιχνευτική διάταξη και πιο συγκεκριμένα στον άξονα συμμετρίας του ανιχνευτή. Τα φάσματα αναλύθηκαν με χρήση του λογισμικού Genie2000 της εταιρείας Mirion. Για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής από κάθε φωτοκορυφή, δηλαδή από κάθε ενέργεια φωτονίων που εξετάστηκαν, χρησιμοποιήθηκε σχέση (3.2) :

$$\text{eff} = \frac{\text{Area}}{\text{time} \cdot \text{yield} \cdot R} \quad (3.2)$$

όπου

Area: η καθαρή επιφάνεια της φωτοκορυφής συγκεκριμένης ενέργειας,

time: ο χρόνος μέτρησης της πηγής στον ανιχνευτή (sec),

yield: το ποσοστό εκπομπής (branching ratio) των συγκεκριμένης ενέργειας φωτονίων, όπως προκύπτει από το σχετικό διάγραμμα διάσπασης του αντίστοιχου ραδιοϊσοτόπου,

R: η ενεργότητα (Bq) του ραδιοϊσοτόπου

Για τον προσδιορισμό της ενεργότητας, R, των ραδιοϊσοτόπων και προκειμένου να ληφθεί υπόψη η εξασθένιση των ραδιενεργών πυρήνων, χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη σχέση :

$$R = R_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \Delta t} \quad (3.3)$$

Όπου

R₀: η αρχική ενεργότητα του ραδιοϊσοτόπου όπως παρέχεται από το πιστοποιητικό της πηγής

T_{1/2}: ο χρόνος ημιζωής του ραδιοϊσοτόπου

Δt: το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την ημερομηνία αναφορά της πηγής, όπως αυτό αναφέρεται στο πιστοποιητικό της, και την ημερομηνία διεξαγωγής της μέτρησης.

Λόγω του χρόνου που μεσολάβησε μεταξύ των ημερομηνιών αναφοράς των δύο πηγών και των ημερομηνιών διεξαγωγής πειραμάτων, δεν ήταν δυνατή η ανίχνευση όλων των ραδιοϊσοτόπων που περιέχονταν στην πηγή και κυρίως των πιο βραχύβιων. Ανιχνεύτηκαν κορυφές στις ενέργειες των Am-241, Cs-137, Co-60 (δύο κορυφές) που αντιστοιχούν στα φωτόνια ενέργειας 59.54, 661.65, 1173.24, 1332.51 keV. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι ενέργειες των φωτοκορυφών που εμφανίζονται στο φάσμα, τα ραδιοϊσότοπα που αντιστοιχούν σε κάθε ενέργεια, καθώς και η πειραματική απόδοση του ανιχνευτή για κάθε ενέργεια με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ. Οι αβεβαιότητες αυτές λαμβάνονται από το πρόγραμμα Genie 2000 και είναι αβεβαιότητες τύπου α, οφείλονται δηλαδή σε τυχαία μεταβολή των παραγόντων και υπολογίζονται με στατιστικές μεθόδους (Παναγιώτου, 2014).

Πειραματικές τιμές της απόδοσης για γεωμετρία όγκου			
Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση	Αβεβαιότητα
Am-241	59.54	0.04188	0.1%
Cs-137	661.65	0.01384	0.1%
Co-60	1173.24	0.00854	0.2%
Co-60	1332.51	0.00777	0.2%

Πίνακας 3.1: Πειραματικές τιμές της απόδοσης για γεωμετρία όγκου

Είναι προφανές ότι δεν μπορεί να σχηματιστεί μια ικανοποιητική καμπύλη βαθμονόμησης, καθώς οι πληροφορίες που παίρνουμε από το γ-φάσμα παρόλο που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα ενεργειών, δεν είναι επαρκείς.

Για τον λόγο αυτό, είναι αναγκαίο να γίνει υπολογιστική βαθμονόμηση της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης.

3.6.1 Υπολογισμός απόδοσης φωτοκορυφής με χρήση του κώδικα PENELOPE

Η υπολογιστική απόδοση φωτοκορυφής πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τον εικονικό ανιχνευτή αποτιθέμενης ενέργειας που παρέχει ο κώδικας PENELOPE. Ο συγκεκριμένος ανιχνευτής παρέχει τη δυνατότητα καταγραφής, σε κατάλληλο αρχείο εξόδου, της πιθανότητας

απόθεσης συγκεκριμένου ποσού ενέργειας στον ανιχνευτή από την αλληλεπίδραση των προσομοιούμενων φωτονίων με αυτόν. Το αρχείο εξόδου δημιουργείται αμέσως μόλις ξεκινήσει η προσομοίωση, εμφανίζεται με το όνομα src-enddet-01.dat και είναι ένα από τα αρχεία εξόδου του κώδικα PENMAIN. Αποτελείται από τρεις στήλες δεδομένων. Η πρώτη στήλη αναφέρεται στις ενεργειακές περιοχές, ενεργειακά κανάλια στις οποίες έχει διαιρεθεί η συνολική ενεργειακή περιοχή προσομοίωσης (σε eV). Η διαμέριση της συνολικής ενεργειακής περιοχής γίνεται από τον ίδιο τον χρήστη στο αρχείο εισόδου τύπου .in. Η δεύτερη στήλη αναφέρεται στον λόγο του πλήθους των φωτονίων που ανιχνεύθηκαν σε συγκεκριμένη ενέργεια προς το γινόμενο του πλήθους των ιστοριών που προσομοιώθηκαν επί το εύρος της ενεργειακής διαμέρισης (σε eV). Ουσιαστικά εκφράζει την πιθανότητα ανίχνευσης φωτονίων που εναπόθεσαν την ενέργεια τους στο συγκεκριμένο ενεργειακό κανάλι. Στην τρίτη στήλη καταγράφεται η αβεβαιότητα της δεύτερης στήλης σε επίπεδο εμπιστοσύνης 3σ.

Με βάση τα ανωτέρω, η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της υπολογιστικής απόδοσης φωτοκορυφής της ανιχνευτικής διάταξης περιγράφεται ακολούθως. Για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής για ορισμένη ενέργεια χρησιμοποιείται η τιμή της δεύτερης στήλης (pdf=probability density function) που αντιστοιχεί στην ενέργεια ενδιαφέροντος πολλαπλασιασμένη επί τη διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών ενεργειών (ΔΕ) και διαιρεμένη διά το ποσοστό εκπομπής (yield) του ραδιοϊσοτόπου που είναι προς μελέτη, όπως φαίνεται και από την ακόλουθη σχέση:

$$eff = \frac{(pdf) \cdot (\Delta E)}{(yield)} \quad (3.4)$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η έννοια της ιστορίας σε μια προσομοίωση χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τον αριθμό πρωτογενών σωματιδίων τα οποία προσομοιώθηκαν. Ωστόσο, στις πειραματικές μετρήσεις, τα φωτόνια που ανιχνεύονται από τον ανιχνευτή για μια συγκεκριμένη ενέργεια δεν ταυτίζονται με τις διασπάσεις του πυρήνα του ραδιοϊσοτόπου που εκπέμπει φωτόνια σε αυτή την ενέργεια. Για τον λόγο αυτό, στην περίπτωση κατά την οποία προσομοιώνεται το διάγραμμα διάσπασης ενός ισότοπου, χρειάζεται να ληφθεί υπόψη και το ποσοστό εκπομπής ακτίνων-γ της υπό μελέτης ενέργειας ανά διάσπαση πυρήνα (yield).

Μια επιπλέον παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση φωτοκορυφής είναι το πλάτος της ενεργειακής διαμέρισης (bin width) το οποίο εξαρτάται από το πλήθος των ενεργειακών καναλιών που θα επιλεγεί για την προσομοίωση. Στην περίπτωση του ιδανικού ανιχνευτή, το πλάτος της φωτοκορυφής είναι απειροστό, καθώς τα φωτόνια της ίδιας ενέργειας θα έδιναν σήμα ίδιου πλάτους. Στον πραγματικό ανιχνευτή όμως, η φωτοκορυφή ενός πραγματικού φάσματος έχει ορισμένο πλάτος, το οποίο καθορίζεται από το FWHM, πρέπει να ληφθεί υπόψη δηλαδή και η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή (Βασιλοπούλου, 2008). Σημειώνεται ότι το FWHM προσδιορίζεται από τη σχέση η οποία δίνεται από το πρόγραμμα Genie 2000 και είναι η εξής:

$$FWHM = a + b\sqrt{E} \quad (3.5)$$

Όπου a,b είναι σταθερές που λαμβάνονται από το πρόγραμμα Genie2000 κατά τη διαδικασία της ενεργειακής βαθμονόμησης της ανιχνευτικής διάταξης και είναι χαρακτηριστικές για κάθε ανιχνευτή και E είναι ενέργεια που μελετάται (Reguigui, 2006). Η σχέση που συνδέει το FWHM με την εξεταζόμενη ενέργεια για την ανιχνευτική διάταξη Dias είναι :

$$FWHM = 7.076 \times 10^{-1} + 2.795 \times 10^{-2} E^{1/2} \quad (3.6)$$

Η παραπάνω σχέση προέκυψε ύστερα από ενεργειακή βαθμονόμηση της ανιχνευτικής διάταξης που είχε προηγηθεί.

Για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής μέσω προσομοίωσης, πρέπει να συνυπολογιστούν και τα φωτόνια εκείνα που έχουν μειωμένη ενέργεια έτσι ώστε η υπολογιστική απόδοση να είναι συγκρίσιμη με την πειραματική, άρα θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και τα ενεργειακά κανάλια που αντιστοιχούν σε ελαφρά χαμηλότερες ενέργειες. Το πλήθος των ενεργειακών καναλιών εξαρτάται τόσο από το εύρος της φωτοκορυφής που προκύπτει από το πραγματικό φάσμα όσο και από το πλάτος του καναλιού, το οποίο καθορίζεται, όπως έχει αναφερθεί, από τον χρήστη (Βασιλοπούλου, 2008). Το πλήθος των ενεργειακών καναλιών δίνεται από τη σχέση (3.7):

$$n = \frac{1.5 \times FWHM}{\text{bin width}} \quad (3.7)$$

όπου:

n= το πλήθος των ενεργειακών καναλιών

FWHM= η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή

bin width= το πλάτος του καναλιού.

Τελικά, προκύπτει η σχέση (3.8):

$$eff = \frac{(\sum_{E-1.5FWHM}^E(pdf)) \cdot (\Delta E)}{(yield)} \quad (3.8)$$

Για να βρεθεί η αβεβαιότητα της τιμής της υπολογιστικής απόδοσης φωτοκορυφής χρησιμοποιήθηκε και πάλι το αρχείο εξόδου src-enddet-01.dat του κώδικα PENMAIN. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η τρίτη στήλη του αρχείου εξόδου, αναφέρεται στην απόλυτη αβεβαιότητα της πιθανότητας εναπόθεσης ενέργειας στα όρια του αντίστοιχου καναλιού δ(pdf) ανά eV. Η αβεβαιότητα της απόδοσης δίνεται σε επίπεδο εμπιστοσύνης 3σ. Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας της τιμής της απόδοσης σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ και προκειμένου να ληφθεί υπόψη και το πλάτος της φωτοκορυφής χρησιμοποιείται η σχέση:

$$uncertainty = \frac{\sum_{E-1.5FWHM}^E \left(\frac{\delta(pdf)^2}{3}\right) \cdot (\Delta E)}{(yield)} \quad (3.9)$$

Όπως είναι προφανές, για τον προσδιορισμό της υπολογιστικής απόδοσης φωτοκορυφής με τη χρήση του κώδικα PENMAIN, εφαρμόστηκε ίδια γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή με τις πειραματικές μετρήσεις, και για τις δύο πρότυπες πηγές οι διαστάσεις των οποίων δόθηκαν από τα πιστοποιητικά αυτών. Βρέθηκαν πρώτα οι υπολογιστικές αποδόσεις για τα ραδιοϊσότοπα που ανιχνεύθηκαν πειραματικά, δηλαδή βρέθηκαν οι αποδόσεις για τα Am-241, Cs-137 και Co-60 που εκπέμπουν φωτόνια με ενέργειες 59.54, 661.62, 1173.24, 1332.51 keV, αντίστοιχα. Σκοπός ήταν οι τιμές των υπολογιστικών αποδόσεων των ραδιοϊσοτόπων αυτών να συγκλίνουν με τις πειραματικές αποδόσεις. Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται η σύγκλιση αυτή, εξαρτάται από την επιλογή κατάλληλων παραμέτρων της γεωμετρίας προσομοίωσης με χαρακτηριστικότερες τις διαστάσεις των νεκρών ζωνών, μια διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικότερα στην παράγραφο 3.7. Στη συνέχεια εκτιμήθηκαν οι υπολογιστικές αποδόσεις φωτοκορυφής για ενέργειες φωτονίων που αντιστοιχούν στα ραδιοϊσότοπα τα οποία υπήρχαν στις πρότυπες πηγές αλλά εξαιτίας του μικρού χρόνου ημιζωής $T_{1/2}$ τους δεν ανιχνεύτηκαν στο πειραματικό φάσμα. Τα ραδιοϊσότοπα αυτά είναι τα Pb-210, Cd-109, Co-57, Te-123m, Cr-51, Sn-113, Sr-85, Y-88.

3.7 Επιλογή κατάλληλων διαστάσεων νεκρών ζωνών (dead layers).

Παρόλο που οι ανιχνευτές υπερκαθαρού Γερμανίου (HPGe) αποτελούνται από έναν κρύσταλλο εξολοκλήρου κατασκευασμένο από Γερμάνιο, υπάρχει ένα εξωτερικό περιμετρικό στρώμα του κρυστάλλου του Γερμανίου στο οποίο δεν συλλέγεται ενέργεια από τα σωματίδια που αλληλεπιδρούν ή απορροφώνται, με αποτέλεσμα να μην παράγεται, σε εκείνες τις περιοχές, σήμα από τον ανιχνευτή. Το πάχος των νεκρών ζωνών εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή το είδος και το βάθος της επαφής (P+ contact ή N+ contact) και την εφαρμοζόμενη υψηλή τάση πόλωσης του ανιχνευτή (Βασιλοπούλου, 2008), (Gilmore, 1995). Νεκρές ζώνες θεωρείται ότι μπορούν να υπάρξουν σε όλες τις πλευρές του κρυστάλλου της ανιχνευτικής διάταξης οπότε για τις ανάγκες της προσομοίωσης προκύπτουν τέσσερις διαφορετικές περιοχές νεκρών ζωνών : η μπροστινή νεκρή ζώνη, η πίσω νεκρή ζώνη, η πλαϊνή νεκρή ζώνη και η νεκρή ζώνη στην περιοχή της οπής. Κάθε μια από τις παραπάνω νεκρές ζώνες επιδρά διαφορετικά στα φωτόνια που προσπίπτουν σε αυτές και η επίδραση αυτή εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων αυτών. Η χρήση νεκρών ζωνών σε όλο τον ανιχνευτή δεν έχει απαραίτητα φυσική σημασία αλλά βοηθά ώστε η προσομοίωση να συγκλίνει με το πείραμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι το πάχος των νεκρών ζωνών δεν μπορεί να μετρηθεί, μπορεί όμως μέσω των προσομοιώσεων να πραγματοποιηθεί μια ικανοποιητική εκτίμηση.

Πιο αναλυτικά, τα φωτόνια με χαμηλή ενέργεια (π.χ. Am-241) επειδή χάνουν ενεργεία και απορροφώνται προτού φτάσουν σε μεγάλο βάθος μέσα στον ανιχνευτή επηρεάζονται κυρίως από την μπροστινή νεκρή ζώνη. Αντίστοιχα, τα φωτόνια μεσαίας ενέργειας (π.χ. Cs-137)

επηρεάζονται κυρίως από την πλαϊνή νεκρή ζώνη και την νεκρή ζώνη στην περιοχή της οπής. Τέλος, τα φωτόνια μεγάλης ενέργειας (π.χ. Co-60) επηρεάζονται κυρίως από την πίσω νεκρή ζώνη, αφού διαπερνούν μεγάλο μέρος του κρυστάλλου δίχως να αλληλοεπιδράσουν με αυτόν με αποτέλεσμα να χάνουν ενέργεια σε μεγάλο βάθος του κρυστάλλου.

Για την εύρεση των κατάλληλων διαστάσεων νεκρών ζωνών, πραγματοποιήθηκε πληθώρα προσομοιώσεων με τη χρήση του κώδικα PENELOPE. Εφαρμόστηκε επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία μεταβάλλονταν οι διαστάσεις των νεκρών ζωνών έως ότου οι υπολογιστικές τιμές της απόδοσης να συγκλίνουν με τις πειραματικές σε ικανοποιητικό επίπεδο, 7%. Η σωστή επιλογή του πάχους των νεκρών ζωνών της ανιχνευτικής διάταξης παίζει σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις. Αυξάνοντας το πάχος των νεκρών ζωνών, προκαλείται τόσο μεγαλύτερη θωράκιση στις ακτίνες-γ που διεισδύουν στον κρύσταλλο όσο και μείωση του ενεργού όγκου του κρυστάλλου του γερμανίου. Αποτέλεσμα των δύο αυτών φαινομένων είναι η μείωση της απόδοσης φωτοκορυφής του ανιχνευτή.

Οι πληροφορίες που παρέχονται από τον κατασκευαστή αναφορικά με το πάχος των νεκρών ζωνών της ανιχνευτικής διάταξης είναι συχνά ανακριβείς. Εάν χρησιμοποιηθούν οι διαστάσεις που προσφέρονται από τον κατασκευαστή, οι αποκλίσεις από τις πειραματικές τιμές μπορεί να είναι σημαντικές. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι οι διαστάσεις των νεκρών ζωνών αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου (D.L.Aderson, 2004), (Huy, 2010), κυρίως για ανιχνευτές GeLi. Οι πρώτες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν τις διαστάσεις που είχαν δοθεί από τον κατασκευαστή και παρατηρήθηκαν αποκλίσεις της τάξης του 20% και άνω. Προκειμένου η υπολογιστική τιμή της απόδοσης να μην αποκλίνει σε μεγάλο ποσοστό από την πειραματική, ο χρήστης πρέπει να προβεί σε διορθώσεις των διαστάσεων της ανιχνευτικής διάταξης, δηλαδή την επιλογή κατάλληλων διαστάσεων νεκρών ζωνών. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία (Bochud, 2006) οι αποκλίσεις των υπολογιστικών αποδόσεων από τις πειραματικές αποδόσεις συνήθως δεν υπερβαίνουν το 5% ενώ για ορισμένες περιπτώσεις, οι αποκλίσεις μπορεί να είναι της τάξης του 7%. Σε κάθε περίπτωση, αποκλίσεις μικρότερες του 10% για εφαρμογές που σχετίζονται με τη μέτρηση της ραδιενέργειας περιβάλλοντος, θα μπορούσαν να θεωρηθούν αποδεκτές.

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των νεκρών ζωνών του ανιχνευτή καθώς και του υπολογισμού της απόδοσης φωτοκορυφής τόσο για την γεωμετρία όγκου όσο και για την γεωμετρία φίλτρου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, επειδή κατά τον πειραματικό προσδιορισμό της απόδοσης φωτοκορυφής μελετήθηκαν μόνο τρία ισότοπα (Am-241, Cs-137, Co-60), που εκπέμπουν φωτόνια με ενέργειες οι οποίες βρίσκονται σε διαφορετικές περιοχές του ενεργειακού φάσματος, στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια τρία ισότοπα. Το Am-241 εκπέμπει φωτόνια χαμηλής ενέργειας και συγκεκριμένα ενέργειας 59 keV, οπότε χρησιμοποιήθηκε κυρίως για τον προσδιορισμό της μπροστινής νεκρής ζώνης. Το Cs-137 εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 662 keV και χρησιμοποιήθηκε κυρίως για τον προσδιορισμό της πλαϊνής νεκρής ζώνης

και για την νεκρή ζώνη στη περιοχή της οπής. Τέλος, το Co-60 εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 1173 και 1332 keV, και χρησιμοποιήθηκε κυρίως για τον προσδιορισμό της πίσω νεκρής ζώνης του ανιχνευτή.

Σε κάθε προσομοίωση μεταβαλλόταν κάθε φορά το πάχος μιας περιοχής και στη συνέχεια συγκρινόνταν η υπολογιστική απόδοση με την αντίστοιχη πειραματική. Η σύγκριση αυτή γινόταν μέσω της σχετικής απόκλισης (relative bias) σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\text{Σχετική Απόκλιση} = \frac{\epsilon_{\text{υπολ}} - \epsilon_{\text{πειρ}}}{\epsilon_{\text{πειρ}}} \quad (3.10)$$

όπου :

$\epsilon_{\text{υπολ}}$: η υπολογιστική τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής για συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων,

$\epsilon_{\text{πειρ}}$: η πειραματική τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής για την ίδια ενέργεια φωτονίων

Αφού υπολογιζόταν η τιμή της απόκλισης μεταξύ υπολογιστικής και πειραματικής τιμής της απόδοσης, έπρεπε να ελεγχθεί και το πρόσημο της απόκλισης, έτσι ώστε να γίνει κατάλληλη επιλογή πάχους νεκρών ζωνών στην επόμενη προσομοίωση. Έχοντας θετική απόκλιση έπρεπε το πάχος των νεκρών ζωνών να αυξηθεί, ενώ με αρνητική απόκλιση το πάχος των νεκρών ζωνών έπρεπε να μειωθεί. Η διαδικασία αυτή ολοκληρωνόταν όταν η τιμή της σχετικής απόκλισης ήταν μικρότερη της τιμής 7%.

3.8 Προσδιορισμός νεκρών ζωνών για πηγή Βαθμονόμησης Γεωμετρίας Όγκου

3.8.1 Προσομοιώσεις με πηγή Am-241 για τον προσδιορισμό του πάχους της μπροστά νεκρής ζώνης.

Για τον προσδιορισμό του πάχους των νεκρών ζωνών του κρυστάλλου χρησιμοποιήθηκε πρότυπη πηγή όγκου 260ml και πυκνότητας 0.9 gr/cm³.



Εικόνα 3.3: Πρότυπη πηγή όγκου

Για την εύρεση κατάλληλων τιμών των νεκρών ζωνών πραγματοποιούνται πληθώρα προσομοιώσεων σύμφωνα με την επαναληπτική διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια.

Οι πρώτες προσομοιώσεις που διενεργήθηκαν αφορούσαν το προσδιορισμό του πάχους της μπροστινής νεκρής ζώνης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η μπροστά νεκρή ζώνη επηρεάζεται από φωτόνια χαμηλής ενέργειας οπότε για την διεξαγωγή των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε πηγή Am-241. Μετά τη πρώτη προσομοίωση εκτιμήθηκε η υπολογιστική απόδοση του ανιχνευτή για τη συγκεκριμένη ενέργεια, η οποία στη συνέχεια συγκρίθηκε με την αντίστοιχη πειραματική τιμή. Λόγω της απόκλισης μεταξύ υπολογιστικής και πειραματικής τιμής της απόδοσης συνεχίστηκε η διεξαγωγή των προσομοιώσεων έως ότου η υπολογιστική τιμή να συγκλίνει με την πειραματική σε ποσοστό μικρότερο από 7%.

Στον πίνακα (3.3) που ακολουθεί καταγράφονται τα πάχη των νεκρών ζωνών που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις με τις αντίστοιχες υπολογιστικές αποδόσεις και τις αβεβαιότητες τους (1σ), καθώς και η σχετική απόκλιση των υπολογιστικών αποδόσεων από τις αντίστοιχες πειραματικές. Τα αποτελέσματα δίνονται με τη σειρά με την οποία διενεργήθηκαν οι προσομοιώσεις, παρουσιάζοντας με τον τρόπο αυτό και τη μεθοδολογία που εφαρμόστηκε. Αναλυτικότερα, η πρώτη προσομοίωση οδήγησε σε αρνητική σχετική απόκλιση. Ως εκ τούτου η δεύτερη προσομοίωση απαιτούσε τη χρήση λεπτότερης νεκρής ζώνης. Με τον ίδιο τρόπο, το τελικό πάχος 0.032 cm της μπροστά νεκρής ζώνης θεωρήθηκε η καταλληλότερη επιλογή καθώς οδήγησε σε σχετική απόκλιση 1%.

Προσδιορισμός μπροστά νεκρής ζώνης με πηγή Am-241		
Μπροστά νεκρή ζώνη (cm)	Υπολογιστική απόδοση	Σχετική Απόκλιση
0.05	0.03291±0.3%	-21%
0.005	0.06225±0.37%	49%
0.03	0.04346±0.58%	4%
0.032	0.04241±0.58%	1%

Πίνακας 3.2: Προσδιορισμός πάχους μπροστινής νεκρής ζώνης συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για την ενέργεια 59.54 keV του Am-241.

3.8.2 Προσομοιώσεις με πηγή Cs-137 για τον προσδιορισμό του πάχους της πλαϊνής νεκρής ζώνης.

Στις προσομοιώσεις που ακολούθησαν για τον προσδιορισμό του πάχους της πλαϊνής νεκρής ζώνης, η παράμετρος που μεταβλήθηκε ήταν η πλαϊνή νεκρή ζώνη. Το πάχος της μπροστά νεκρής ζώνης διατηρήθηκε σταθερό στα 0.032cm. Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε πρότυπη πηγή Cs-137 ενέργειας 661.65 keV και ακολουθήθηκε η ίδια επαναληπτική διαδικασία όπως προηγουμένως. Τελικά, η βέλτιστη τιμή του πάχους της πλαϊνής νεκρής ζώνης προέκυψε ίση με 0.11cm.

Στον παρακάτω πίνακα (3.4) καταγράφονται οι υπολογιστικές αποδόσεις του ανιχνευτή για διάφορες τιμές των νεκρών ζωνών μαζί με τις αβεβαιότητες τους (1σ) καθώς και η σχετική απόκλιση των υπολογιστικών αποδόσεων από την πειραματική απόδοση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη σειρά που διενεργήθηκαν οι προσομοιώσεις. Το τελικό πάχος 0.11 cm της πλαϊνής νεκρής ζώνης θεωρήθηκε η καταλληλότερη επιλογή καθώς οδήγησε σε σχετική απόκλιση -1%.

Μπροστά νεκρή ζώνη (cm)	Πλαϊνή νεκρή ζώνη (cm)	Υπολογιστική Απόδοση	Απόκλιση
0.032	-	0.01514±3.6%	9%
0.032	0.2	0.01192±5.8%	-14%
0.032	0.1	0.01440±3.8%	4%
0.032	0.11	0.0137±4.4%	-1.0%

Πίνακας 3.3: Προσδιορισμός πάχους πλαϊνής νεκρής ζώνης συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για την ενέργεια 661.65 keV του Cs-137.

3.8.3 Προσομοιώσεις με πηγές Am-241 και Cs-137 για επαλήθευση και βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων.

Έχοντας τροποποιήσει όμως το πάχος της πλαϊνής νεκρής ζώνης για τον προσδιορισμό της υπολογιστικής απόδοσης στην περίπτωση προσομοιώσεων με πηγή Cs-137, έπρεπε να επαληθευθεί εάν τα νέα δεδομένα μεταβάλλουν την τιμή της απόκλισης για τις προσομοιώσεις με Am-241. Ύστερα από τον έλεγχο με την πηγή Am-241 χρησιμοποιώντας τις νέες διαστάσεις (πάχος πλαϊνής νεκρής ζώνης 0.11cm, πάχος μπροστά νεκρής ζώνης= 0.032cm), παρατηρήθηκε πως η υπολογιστική απόδοση παρουσίαζε απόκλιση από την πειραματική της τάξης του -5.1%. Επειδή η τιμή της απόδοσης στην περίπτωση του Am-241 είχε αρνητική τιμή, έπρεπε να μειωθεί μόνο το πάχος της μπροστά νεκρής ζώνης. Οι επόμενοι πίνακες (3.5) και (3.6) παρουσιάζουν τις τροποποιήσεις των νεκρών ζωνών, τις αντίστοιχες υπολογιστικές αποδόσεις και τις αβεβαιότητες τους καθώς και τις αποκλίσεις μεταξύ υπολογιστικών και πειραματικών δεδομένων για το κάθε ραδιοϊσότοπο ξεχωριστά.

Am-241				
Μπροστά νεκρή ζώνη (cm)	Πλαϊνή νεκρή ζώνη (cm)	Ύψος μικρών οπών (cm)	Υπολογιστική Απόδοση	Απόκλιση
0.032	0.11	0.2	0.03975±0.5%	-5.1%
0.03	0.11	0.2	0.04056±0.3%	-3.2%

Πίνακας 3.4: Έλεγχος των τιμών πάχους μπροστινής και πλαϊνής νεκρής ζώνης συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για τις ενέργειες 59.54 keV και 661.65 keV.

Cs-137				
Μπροστά νεκρή ζώνη (cm)	Πλαϊνή νεκρή ζώνη (cm)	Ύψος μικρών οπών (cm)	Υπολογιστική Απόδοση	Απόκλιση
0.0032	0.11	0.2	0.01370±4.4%	-1.0%
0.03	0.11	0.2	0.01430±1.7%	3.4%

Πίνακας 3.5: Έλεγχος των τιμών πάχους μπροστινής και πλαϊνής νεκρής ζώνης συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για τις ενέργειες 59.54 keV και 661.65 keV.

3.8.4 Προσομοιώσεις με πηγή Co-60 για τον προσδιορισμό της πίσω νεκρής ζώνης

Στη συνέχεια, κρατώντας σταθερές τις τιμές για την μπροστά και τις πλαϊνές νεκρές ζώνες, δηλαδή 0.03cm και 0.11cm αντίστοιχα, και ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία με τις πηγές Am-241 και Cs-137, προσδιορίστηκε το πάχος της πίσω νεκρής ζώνης της ανιχνευτικής διάταξης, χρησιμοποιώντας πρότυπη πηγή Co-60. Το Co-60 εκπέμπει φωτόνια με ενέργειες 1173.24 keV και στα 1332.51 keV.

Κατά τη διενέργεια των προσομοιώσεων αυτών παρατηρήθηκε ότι διαμορφώνοντας μόνο το πάχος της πίσω νεκρής ζώνης δεν επέρχεται το επιθυμητό αποτέλεσμα. Για αυτό τον λόγο πέρα από το πάχος της πίσω νεκρής ζώνης απαιτούνταν η μεταβολή και άλλων παραμέτρων του κρυστάλλου του ανιχνευτή. Οι επιπλέον τροποποιήσεις αφορούσαν την αύξηση της διαμέτρου των μικρών οπών και την διάμετρο της μεγάλης οπής.

Στον παρακάτω πίνακα (3.7) παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τον προσδιορισμό του πάχους της πίσω νεκρής ζώνης και της διαμέτρου των μικρών οπών, καθώς και οι αντίστοιχες υπολογιστικές αποδόσεις με τις αβεβαιότητες τους (1σ) και η απόκλιση της υπολογιστικής απόδοσης από την πειραματική. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν δίνονται

με τη σειρά που διενεργήθηκαν οι προσομοιώσεις Στην 1^η στήλη του πίνακα με την ένδειξη α γίνεται αναφορά στην ενέργεια 1173.24 keV και με την ένδειξη β, στην ενέργεια 1332.51 keV.

Προσδιορισμός πάχους πίσω νεκρής ζώνης και της διαμέτρου των μικρών οπών						
	Ύψος μικρών οπών (cm)	Διάμετρος μικρών οπών (cm)	Διάμετρος μεγάλης οπής (cm)	Πίσω νεκρή ζώνη (cm)	Υπολογιστική Απόδοση	Απόκλιση
α	0.2	1.4	-	-	0.00927±1.2%	8.6%
β	0.2	1.4	-	-	0.00857±1.2%	10.2%
α	0.4	1.4	-	-	0.00918±1.3%	7.5%
β	0.4	1.4	-	-	0.00854±1.3%	9.9%
α	0.4	1.8	-	-	0.00916±3.0%	7.3%
β	0.4	1.8	-	-	0.00873±3.1%	12.4%
α	0.4	2.0	-	-	0.00930±0.9%	9.0%
β	0.4	2.0	-	-	0.00826±1%	6.3%
α	0.4	2.5	-	-	0.00922±0.9%	8.0%
β	0.4	2.5	-	-	0.00821±0.9%	5.7%
α	0.6	2.5	-	-	0.00914±1.3%	7.0%
β	0.6	2.5	-	-	0.00799±1.4%	2.8%
α	0.4	1.8	0.375	-	0.00936±3.9%	9.7%
β	0.4	1.8	0.375	-	0.00789±4.2%	1.6%
α	0.3	1.8	-	-	0.00923±0.9%	8.1%
β	0.3	1.8	-	-	0.00826±1%	6.3%
α	0.4	1.8	0.575	-	0.00928±0.9%	8.8%
β	0.4	1.8	0,575	-	0.00819±1%	5.4%
α	0.6	2.5	-	-	0.00907±1.9%	6.2%
β	0.6	2.5	-	-	0.00805±2%	3.6%

Πίνακας 3.6: Προσδιορισμός πίσω νεκρής ζώνης συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για τις ενέργειες 1173.24 keV και 1332,51 keV του Co-60.

3.8.5 Προσομοιώσεις με πηγές Am-241, Cs-137, Co-60 για βελτιστοποίηση και επαλήθευση αποτελεσμάτων.

Όπως προηγουμένως, προκειμένου να επαληθευτεί η μη μεταβολή των υπολογιστικών αποδόσεων για τα Am-241 και Cs-137, ύστερα από την προσθήκη της πίσω νεκρής ζώνης στην ανιχνευτική διάταξη και την αλλαγή στη διάμετρο των μικρών οπών, διενεργήθηκαν προσομοιώσεις με πηγές Am-241 και Cs-137. Παρατηρήθηκε ότι για το Am-241 η υπολογιστική απόδοση ήταν $0.04038 \pm 0.3\%$ και για το Cs-137 η υπολογιστική απόδοση εκτιμήθηκε $0.01460 \pm 1.7\%$. Είναι εμφανές, ότι διαμορφώνοντας το πάχος της πίσω νεκρής ζώνης παρατηρούνται μικρές διαφορές στις αποδόσεις του Am-241 και του Cs-137 χωρίς να επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα των αποδόσεων. Παρ' όλα αυτά διενεργήθηκαν περαιτέρω προσομοιώσεις για τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων. Στους παρακάτω πίνακες (3.8), (3.9), (3.10), παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το Am-241, Cs-137 και Co-60 αντίστοιχα. Υπενθυμίζεται ότι τόσο το πάχος της μπροστά νεκρής ζώνης όσο και το πάχος της πλαϊνής νεκρής ζώνης δεν μεταβλήθηκαν κατά την διάρκεια αυτών των προσομοιώσεων και έχουν τις τιμές 0.03 cm και 0.11 cm, αντίστοιχα.

Am-241					
Ύψος μικρών οπών (cm)	Διάμετρος μικρών οπών (cm)	Διάμετρος μεγάλης οπής (cm)	Πίσω νεκρή ζώνη (cm)	Υπολογιστική Απόδοση	Απόκλιση
0.6	2.5	-	-	$0.04038 \pm 0.3\%$	-3.6%
0.65	2.5	-	-	$0.04038 \pm 0.3\%$	-3.6%
0.65	2.5	0.575	-	$0.04038 \pm 0.3\%$	-3.6%
0.6	2.5	-	0.11	$0.04038 \pm 0.3\%$	-3.6%

Πίνακας 3.7: Προσδιορισμός των τιμών πάχους μπροστινής και πλαϊνής νεκρής ζώνης συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για τις ενέργειες 59.54 keV, 661.65 keV, 1173.24 keV, 1332.51 keV.

Cs-137					
Ύψος μικρών οπών (cm)	Διάμετρος μικρών οπών (cm)	Διάμετρος μεγάλης οπής (cm)	Πίσω νεκρή ζώνη (cm)	Υπολογιστική Απόδοση	Απόκλιση
0.6	2.5	-	-	0.01460±0.7%	5.5%
0.65	2.5	-	-	0.01459±0.7%	5.4%
0.6	2.5	0.575	-	0.01464±0.9%	5.8%
0.6	2.5	-	0.05	0.01454±0.7%	5.1%
0.6	2.5	-	0.11	0.01446±0.7%	4.5%

Πίνακας 3.8: Προσδιορισμός των τιμών πάχους μπροστινής και πλαϊνής νεκρής ζώνης συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για τις ενέργειες 59.54 keV, 661.65 keV, 1173.24 keV, 1332.51 keV.

Co-60						
	Ύψος μικρών οπών (cm)	Διάμετρος μικρών οπών (cm)	Διάμετρος μεγάλης οπής (cm)	Πίσω νεκρή ζώνη (cm)	Υπολογιστική Απόδοση	Απόκλιση
α	0.6	2.5	-	-	0.00907±1%	6.3%
β	0.6	2.5	-	-	0.00813±1%	4.6%
α	0.65	2.5	0.575	-	0.00912±0.9%	6.8%
β	0.65	2.5	0.575	-	0.00800±1%	3.0%
α	0.6	2.5	0.575	-	0.00912±0.9%	6.8%
β	0.6	2.5	0.575	-	0.00800±1%	3.0%
α	0.6	2.5	-	0.05	0.00914±1%	7.0%
β	0.6	2.5	-	0.05	0.00802±1%	3.2%
α	0.6	2.5	-	0.11	0.00907±0.9%	6.3%
β	0.6	2.5	-	0.11	0.00796±0.9%	2.5%

Πίνακας 3.9: Προσδιορισμός των τιμών πάχους μπροστινής και πλαϊνής νεκρής ζώνης συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για τις ενέργειες 59.54 keV, 661.65 keV, 1173.24 keV, 1332.51 keV.

3.8.6 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων για την πηγή όγκου.

Με αυτόν τον τρόπο ολοκληρώθηκε η διαδικασία προσδιορισμού κατάλληλων γεωμετρικών παραμέτρων για τον κρύσταλλο του ανιχνευτή. Σημειώνεται ότι οι υπολογιστικές αποδόσεις για τις ενέργειες 59.54 , 661.6, 1173.24 και 1332.51 keV αποκλίνουν σε ποσοστό μικρότερο από 7% από τις αντίστοιχες πειραματικές. Η απόκλιση αυτή είναι συμβατή με αντίστοιχες αποκλίσεις που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία για εφαρμογές μέτρησης ραδιενέργειας περιβάλλοντος, καθώς θεωρούνται αποδεκτές ακόμα και αποκλίσεις της τάξης έως 10% (Ewa, 2001), (Vidmar, 1999).

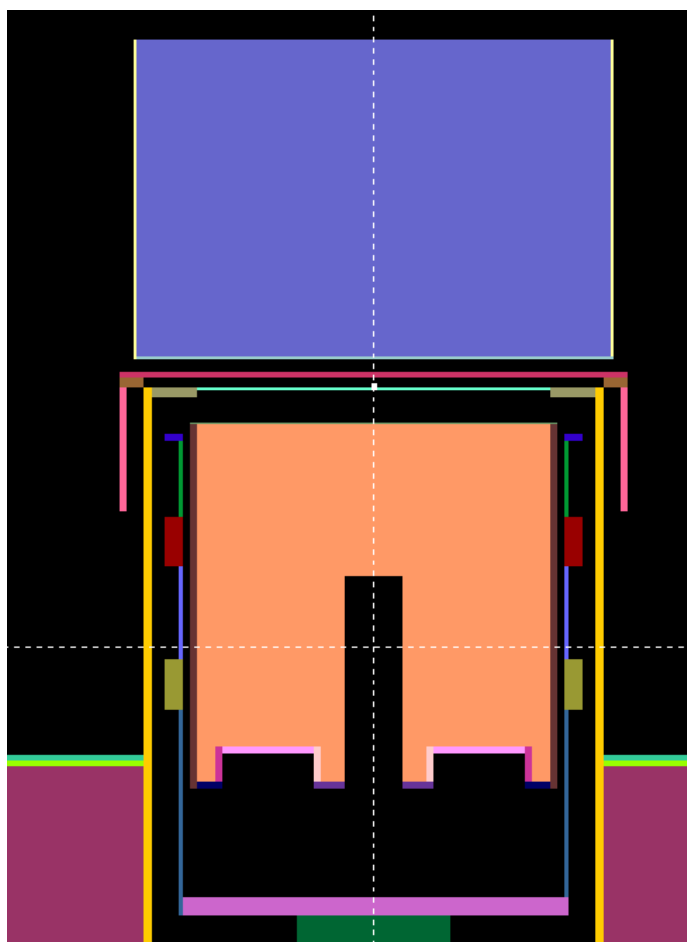
Παρακάτω παρατίθενται οι υπολογιστικές αποδόσεις των προς μελέτη ενεργειών μαζί με τις αποκλίσεις τους από τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές (Πίνακας 3.12). Επιπλέον παρατίθενται οι βέλτιστες παράμετροι της ανιχνευτικής διάταξης (Πίνακας 3.11), όπως προσδιορίστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας ΔΕ, καθώς και διάγραμμα του ανιχνευτή, εικόνα (3.2), με τον προσδιορισμό των νέων παραμέτρων.

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (cm)
Μπροστά νεκρή ζώνη	0.03
Πλαϊνή νεκρή ζώνη	0.11
Πίσω νεκρή ζώνη	0.11
Ύψος μικρών οπών	0.6
Διάμετρος μικρών οπών	2.5

Πίνακας 3.10: Βέλτιστες παράμετροι ανιχνευτή.

Ισότοπο	Μπροστά νεκρή ζώνη (cm)	Πλαϊνή νεκρή ζώνη (cm)	Ύψος μικρών οπών (cm)	Διάμετρος μικρών οπών (cm)	Πίσω νεκρή ζώνη (cm)	Απόδοση	Απόκλιση
Am-241	0.03	0.11	0.6	2.5	0.11	0.04038 ±0.3%	-3.6%
Cs-137	0.03	0.11	0.6	2.5	0.11	0.01446 ±0.7%	4.5%
Co-60 (1173.24 keV)	0.03	0.11	0.65	2.5	0.11	0.00907±0.9%	6.3%
Co-60 (1332.51 keV)	0.03	0.11	0.65	2.5	0.11	0.00796±0.9%	2.5%

Πίνακας 3.11: Αποκλίσεις των υπολογιστικών αποδόσεων από τις πειραματικές αποδόσεις για τις βέλτιστες διαστάσεις γεωμετρικών παραμέτρων που προσδιορίστηκαν.



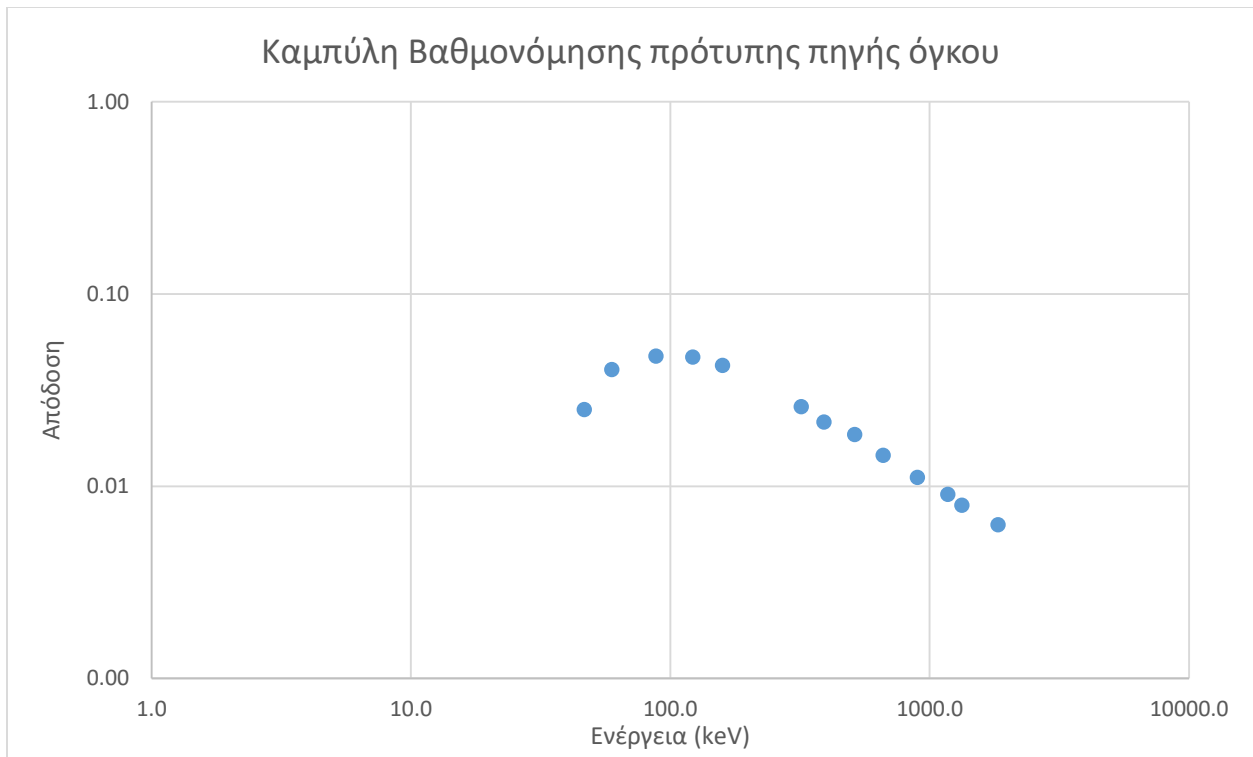
Εικόνα 3.4 Γεωμετρία ανιχνευτή μαζί με τις διαστάσεις νεκρών ζωνών για την πρότυπη πηγή όγκου

Αφού προσδιορίστηκαν οι τιμές της απόδοσης για τις παραπάνω ενέργειες, κρίθηκε σκόπιμο να γίνουν επιπλέον προσομοιώσεις, κρατώντας σταθερές τις νέες παραμέτρους για τον κρύσταλλο του ανιχνευτή, έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι αποδόσεις ενεργειών που αντιστοιχούν σε ραδιοϊσότοπα που υπήρχαν στις πρότυπες πηγές αλλά εξαιτίας του μικρού χρόνου ημιζωής $T_{1/2}$ τους, έχουν χάσει την ενεργότητά τους και δεν μπορούσαν να προσδιοριστούν πειραματικά. Με τον τρόπο αυτό, κατέστη δυνατή η διαμόρφωση της καμπύλης βαθμονόμησης της απόδοσης συναρτήσει της ενέργειας. Στον παρακάτω πίνακα (3.13) καταγράφονται τα ραδιοϊσότοπα και οι ενέργειες φωτονίων που προσομοιώθηκαν, καθώς και οι υπολογιστικές αποδόσεις μαζί με την αβεβαιότητα τους σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ . Στη συνέχεια παρουσιάζονται η καμπύλη απόδοσης φωτοκορυφής σε λογαριθμική κλίμακα (εικόνα 3.3) καθώς και η καμπύλη αναδρομής (εικόνα 3.4), οι οποίες αφορούν τη γεωμετρία όγκου. Η καμπύλη αναδρομής ικανοποιεί την εξίσωση (3.11) :

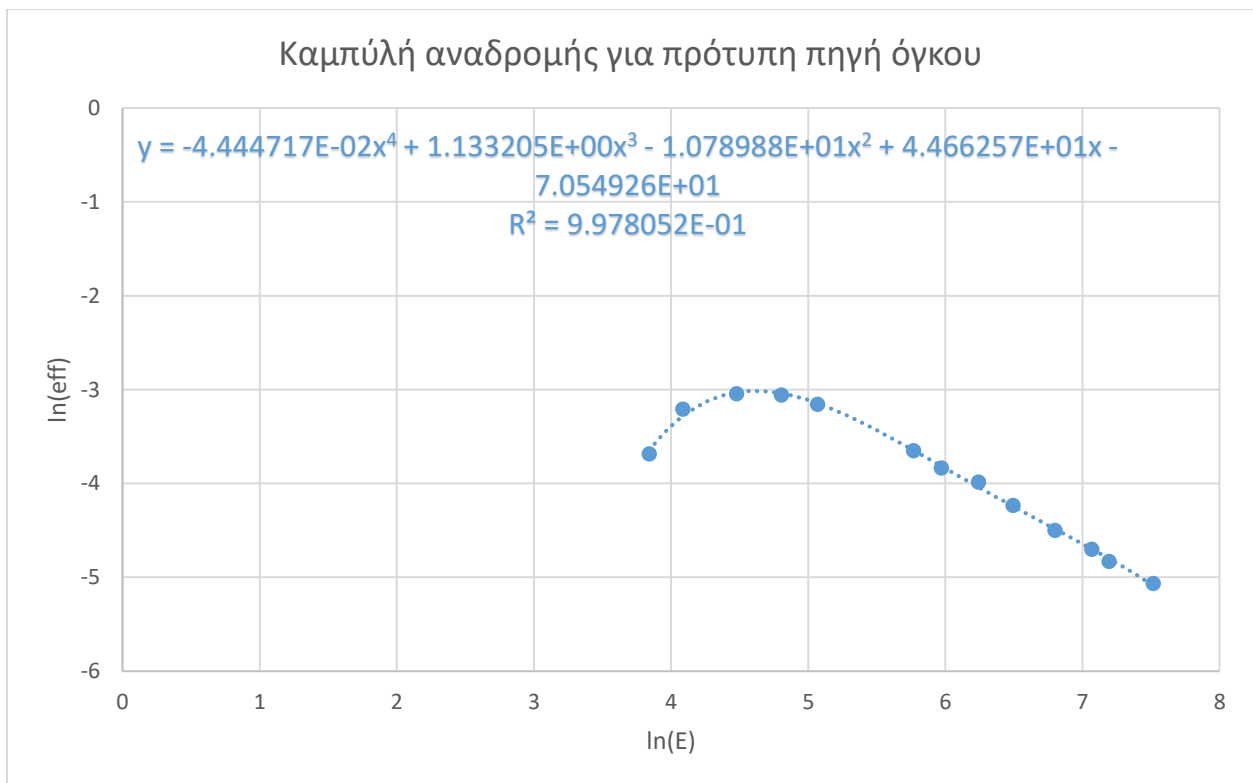
$$y = -4.444717 \cdot 10^{-2} \cdot x^4 + 1.133205 \cdot x^3 - 10.78988 \cdot x^2 - 44.66257 \cdot x - 70.54926 \quad (3.11)$$

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση
Pb-210	46.54	0.02504±0.1%
Am-241	59.54	0.04038±0.3%
Cd-109	88.03	0.04752±0.1%
Co-57	122.06	0.04696±0.4%
Te-123m	158.99	0.04255±0.4%
Cr-51	320.08	0.02595±0.2%
Sn-113	391.70	0.02161±0.5%
Sr-85	514.01	0.01858±0.6%
Cs-137	661.65	0.01446±0.7%
Y-88	898.04	0.01110±0.8%
Co-60	1173.24	0.00907±1%
Co-60	1332.51	0.00796±1%
Y-88	1836.09	0.00630±1.1%

Πίνακας 3.12: Προσδιορισμός των υπολογιστικών αποδόσεων για τα ραδιοϊσότοπα που δίνονται για την πρότυπη πηγή όγκου.



Εικόνα 3.5 Απόδοση φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας για πρότυπη πηγή όγκου



Εικόνα 3.6 Καμπύλη αναδρομής για πρότυπη πηγή όγκου

3.9 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφηκαν η τεχνική της γ-φασματοσκοπίας ακτίνων-γ, η ανιχνευτική διάταξη και η λειτουργία ανιχνευτών υπερκαθαρού γερμανίου. Στόχος του κεφαλαίου αυτού ήταν η βαθμονόμηση της απόδοσης του ανιχνευτή Γερμανίου για πρότυπη πηγή όγκου. Αρχικά έγινε βαθμονόμηση με πειραματική μέθοδο. Εξαιτίας του γεγονότος ότι η πηγές που διαθέτει το ΤΕΡΠ είναι παλιές, ορισμένα από τα ισότοπα, εξαιτίας του μικρού χρόνου ημιζωής τους, δεν ανιχνεύτηκαν από τον ανιχνευτή. Επομένως δεν γινόταν να σχηματιστεί μια ικανοποιητική καμπύλη βαθμονόμησης. Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια της διπλωματικής διεξάχθηκε και υπολογιστική βαθμονόμηση της απόδοσης φωτοκορυφής. Η βαθμονόμηση έγινε με τεχνικές προσομοίωσης Monte – Carlo και συγκεκριμένα με χρήση του κώδικα PENELOPE. Προσδιορίστηκαν οι διαστάσεις των νεκρών ζωνών για την πρότυπη πηγή όγκου και υπολογίστηκαν οι αποδόσεις φωτοκορυφών που αντιστοιχούν σε διάφορες ενέργειες. Μετά από κάθε υπολογισμό παρουσιάστηκαν οι διαστάσεις των νεκρών ζωνών, το διάγραμμα απόδοσης φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας καθώς και η καμπύλη αναδρομής. Για την πρότυπη γεωμετρία όγκου, σημειώνεται ότι οι υπολογιστικές αποδόσεις για τις διάφορες ενέργειες αποκλίνουν σε ποσοστό μικρότερο του 7% από τις αντίστοιχες πειραματικές.

4. Πειραματική και υπολογιστική βαθμονόμηση γ- ανιχνευτικής διάταξης για δείγματα φίλτρου

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται η βαθμονόμηση της απόδοσης φωτοκορυφής για πρότυπη πηγή φίλτρου που διαθέτει το ΤΕΡΠ της ΕΕΑΕ, χρησιμοποιώντας πειραματικές και υπολογιστικές μεθόδους. Και αυτή η γεωμετρία αυτή αποτελεί μία από τις κύριες γεωμετρίες των περιβαλλοντικών δειγμάτων που λαμβάνει το ΤΕΡΠ και χρησιμοποιούνται για τις απαιτήσεις των άρθρων 35-36 της Συνθήκης Ευρατόμ. Πρόκειται για πηγή με εξωτερική διάμετρο 50.8 mm, πάχος 3.2 mm και ενεργό διάμετρο 45 mm (εικόνα 3.5). Τα χαρακτηριστικά της πηγής δίνονται από το πιστοποιητικό της το οποίο παρατίθεται στο Παράρτημα (3) της ΔΕ. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η καμπύλη της απόδοσης φωτοκορυφής για τη γεωμετρία φίλτρων ινών γυαλιού. Τα συγκεκριμένα φίλτρα χρησιμοποιούνται για μετρήσεις της συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων στον ατμοσφαιρικό αέρα. Παράλληλα, μελετάται η εισαγωγή νέας γεωμετρίας φίλτρου για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης. Τέλος, παρουσιάζονται μετρήσεις που διεξήχθησαν κατά το χρονικό διάστημα Δεκεμβρίου-Απριλίου με χρήση της νέας γεωμετρίας φίλτρων αέρα για τον προσδιορισμό του Be-7 στον ατμοσφαιρικό αέρα.



Εικόνα 3.7: Πρότυπη πηγή φίλτρου

4.2 Πειραματικός υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 3.6, προσδιορίστηκαν οι πειραματικές τιμές της απόδοσης. Ανιχνεύτηκαν κορυφές στις ενέργειες των Am-241, Cs-137, Co-60 (δύο κορυφές) που αντιστοιχούν στα φωτόνια ενέργειας 59.54, 661.65, 1173.24, 1332.51 keV. Στον παρακάτω πίνακα (3.15) παρατίθενται οι ενέργειες των φωτοκορυφών που εμφανίζονται στο φάσμα, τα ραδιοϊσότοπα που αντιστοιχούν σε κάθε ενέργεια, καθώς και η πειραματική απόδοση του ανιχνευτή για κάθε ενέργεια με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ.

Πειραματικές τιμές της απόδοσης για γεωμετρία φίλτρου			
Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση	Αβεβαιότητα
Am-241	59.54	0.19415	0.04%
Cs-137	661.65	0.04722	0.06%
Co-60	1173.24	0.02510	0.17%
Co-60	1332.51	0.02244	0.18%

Πίνακας 3.15: Πειραματικές τιμές της απόδοσης για γεωμετρία φίλτρου

4.3 Προσδιορισμός νεκρών ζωνών για πηγή βαθμονόμησης φίλτρου

Αφού ολοκληρώθηκαν οι παραπάνω προσομοιώσεις για την πρότυπη πηγή όγκου, διενεργήθηκαν προσομοιώσεις με σκοπό την εύρεση των κατάλληλων διαστάσεων των νεκρών ζωνών και τον προσδιορισμό της καμπύλης βαθμονόμησης για τη γεωμετρία πρότυπης πηγής φίλτρου. Πρόκειται για πηγή με εξωτερική διάμετρο 50.8 mm, πάχος 3.2 mm και ενεργό διάμετρο 45 mm (εικόνα 3.5). Τα χαρακτηριστικά της πηγής δίνονται από το πιστοποιητικό της το οποίο παρατίθεται στο Παράρτημα (3) της ΔΕ. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, θεωρήθηκε ότι το ενεργό πάχος της πηγής είναι ίσο με 0.001 mm. Όπως έχει αναφερθεί, η απόδοση φωτοκορυφής εξαρτάται και από την γεωμετρία πηγής-ανιχνευτή. Εξαιτίας, λοιπόν, των διαφορετικών διαστάσεων της πηγής θα πρέπει να διενεργηθούν εκ νέου προσομοιώσεις με πηγές Am-241, Cs-137, Co-60 με σκοπό τον προσδιορισμό της καμπύλης βαθμονόμησης για την γεωμετρία της πρότυπης πηγής φίλτρου.

4.3.1 Προσομοιώσεις με πηγή Am-241 για τον προσδιορισμό της μπροστά νεκρής ζώνης.

Οι πρώτες προσομοιώσεις που διενεργήθηκαν αφορούσαν τον προσδιορισμό της μπροστά νεκρής ζώνης. Χρησιμοποιήθηκε πηγή Am-241 και η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η ίδια με την διαδικασία για τον προσδιορισμό των νεκρών ζωνών στην περίπτωση της γεωμετρίας όγκου. Μετά την πρώτη προσομοίωση, εκτιμήθηκε η τιμή της απόδοσης φωτοκορυφής για την συγκεκριμένη ενέργεια και στη συνέχεια η τιμή που προέκυψε συγκρίθηκε με την αντίστοιχη πειραματική. Λόγω της απόκλισης της υπολογιστικής τιμής από την πειραματική διενεργούνται περαιτέρω προσομοιώσεις έως ότου η απόκλιση να είναι μικρότερη από 7%. Σε κάθε μια από τις προσομοιώσεις μεταβαλλόταν μόνο το πάχος της μπροστά νεκρής ζώνης. Η αρχική τιμή που δόθηκε για το πάχος της μπροστά νεκρής ζώνης είναι 0.04 cm η οποία διαφέρει αρκετά από την τιμή που έχει δοθεί από τον κατασκευαστή, η οποία είναι 0.4μm.

Στον παρακάτω πίνακα (3.14) καταγράφονται τα πάχη των νεκρών ζωνών που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις με τις αντίστοιχες υπολογιστικές αποδόσεις και τις αβεβαιότητες τους (1σ) καθώς και η σχετική απόκλιση των υπολογιστικών αποδόσεων από την αντίστοιχη πειραματική. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δίνονται με τη σειρά που διενεργήθηκαν οι προσομοιώσεις αυτές. Το τελικό πάχος 0.027 cm της μπροστά νεκρής ζώνης θεωρήθηκε η καταλληλότερη επιλογή καθώς οδήγησε σε σχετική απόκλιση - 0.63%.

Προσδιορισμός μπροστά νεκρής ζώνης με πηγή Am-241		
Μπροστά νεκρή ζώνη (cm)	Υπολογιστική απόδοση	Απόκλιση
0.04	0.15596±0,85%	1.67%
0.03	0.18620±0,48%	4.10%
0.02	0.21792±0,62%	-12.24%
0.028	0.19127±0,35%	1.48%
0.027	0.19538±0,4%	-0.63%

Πίνακας 3.14: Προσδιορισμός πάχους μπροστινής νεκρής ζώνης συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για την ενέργεια 59.54 keV του Am-241.

4.3.2 Προσομοιώσεις με πηγή Cs-137 για τον προσδιορισμό του πάχους της πλαϊνής νεκρής ζώνης.

Κρατώντας σταθερή την τιμή 0.027cm για την μπροστά νεκρή ζώνη, υπολογίστηκε με την ίδια μεθοδολογία η τιμή του πάχους της πλαϊνής νεκρής ζώνης του ανιχνευτή, χρησιμοποιώντας πρότυπη πηγή Cs-137 ενέργειας 661.6 keV. Η βέλτιστη τιμή πάχους της πλαϊνής νεκρής ζώνης εκτιμήθηκε στα 0.35 cm.

Στον παρακάτω πίνακα (3.15) παρατίθενται οι υπολογιστικές αποδόσεις της ανιχνευτικής διάταξης για διάφορες τιμές παχών πλαϊνής νεκρής ζώνης μαζί με τις αβεβαιότητες τους (1σ), καθώς και η σχετική απόκλιση υπολογιστικών αποδόσεων από την πειραματική.

Προσδιορισμός πλαϊνής νεκρής ζώνης με πηγή Cs-137			
Μπροστά νεκρή ζώνη (cm)	Πλαϊνή νεκρή ζώνη (cm)	Υπολογιστική Απόδοση	Απόκλιση
0.027	0	0.06009±1.7%	-27.26%
0.027	0.1	0.0583±1.1%	-23.47%
0.027	0.5	0.05046±1.5%	-6.88%
0.027	0.9	0.04328±1.5%	8.33%
0.027	0.7	0.04751±0.9%	-0.63%

Πίνακας 3.15: Προσδιορισμός πάχους πλαϊνής νεκρής ζώνης συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για την ενέργεια 661.65 keV του Cs-137.

4.3.3 Προσομοιώσεις με πηγές Am-241 και Cs-137 για επαλήθευση και βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων.

Έχοντας τροποποιήσει όμως το πάχος της πλαϊνής νεκρής ζώνης για τον προσδιορισμό της υπολογιστικής απόδοσης στην περίπτωση προσομοιώσεων με πηγή Cs-137, πρέπει να επαληθευθεί εάν τα νέα δεδομένα μεταβάλλουν την τιμή της απόκλισης για τις προσομοιώσεις με Am-241. Ύστερα από τον έλεγχο με την πηγή Am-241 χρησιμοποιώντας τις νέες διαστάσεις (πάχος πλαϊνής νεκρής ζώνης= 0.7 cm), παρατηρήθηκε πως η υπολογιστική απόδοση απέκλινε της πειραματικής κατά 8.38%. Η απόκλιση αυτή δεν είναι ικανοποιητική, οπότε χρειάστηκε επιπλέον επεξεργασία. Επειδή η τιμή της απόδοσης στην περίπτωση του Am-241 είχε θετική τιμή, στις προσομοιώσεις μεταβλήθηκε μόνο το πάχος της μπροστά νεκρής ζώνης και πιο συγκεκριμένα μειώθηκε η τιμή του πάχους της ζώνης αυτής για την βελτιστοποίηση των αποκλίσεων. Στους πίνακες (3.16) και (3.17) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις διάφορες τιμές των νεκρών ζωνών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη σειρά που διενεργήθηκαν οι προσομοιώσεις. Τελικά προκύπτει ότι, η καταλληλότερη επιλογή για το πάχος της μπροστά νεκρής ζώνης είναι τα 0.021 cm, ενώ για την πλαϊνή νεκρή ζώνη είναι τα 0.7 cm

Am-241			
Μπροστά νεκρή ζώνη (cm)	Πλαϊνή νεκρή ζώνη (cm)	Υπολογιστική απόδοση	Απόκλιση
0.027	0.7	0.17788±0,85%	8.38%
0.025	0.7	0.18350±0,48%	5.48%
0.022	0.7	0.18990±0,62%	2.19%
0.021	0.7	0.19314±0,35%	0.52%

Πίνακας 3.16: Έλεγχος των τιμών πάχους μπροστινής και πλαϊνής νεκρής ζώνης συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για τις ενέργειες 59.54 keV και 661.65 keV.

Cs-137			
Μπροστά νεκρή ζώνη (cm)	Πλαϊνή νεκρή ζώνη (cm)	Υπολογιστική Απόδοση	Απόκλιση
0.021	0.7	0.047916±0.81%	-1.48%

Πίνακας 3.17: Έλεγχος των τιμών πάχους μπροστινής και πλαϊνής νεκρής ζώνης συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για τις ενέργειες 59.54 keV και 661.65 keV.

4.3.4 Προσομοιώσεις με πηγή Co-60 για τον προσδιορισμό της πίσω νεκρής ζώνης.

Αφού προσδιορίστηκαν οι τιμές για την μπροστά και τις πλαϊνές νεκρές ζώνες του ανιχνευτή, χρησιμοποιήθηκε πρότυπη πηγή Co-60 για τον προσδιορισμό της πίσω νεκρής ζώνης του ανιχνευτή. Στην πρώτη προσομοίωση που διενεργήθηκε, χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι τιμές για την μπροστά και την πλαϊνή νεκρή ζώνη, χωρίς να γίνει κάποια περεταίρω αλλαγή στις διαστάσεις του ανιχνευτή. Διαπιστώθηκε ότι οι υπολογιστικές αποδόσεις για τις ενέργειες 1173.24 keV και 1332.51 keV απέκλιναν από τις πειραματικές τιμές κατά ένα ποσοστό της τάξης του -1.4% και για τις δύο ενέργειες. Μια τέτοια απόκλιση είναι ικανοποιητική και δεν χρειάστηκε καμία επιπλέον τροποποίηση για βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων.

Στους παρακάτω πίνακες (3.18) και (3.19) παρατίθενται τα αποτελέσματα αναφορικά με τις υπολογιστικές αποδόσεις μαζί με τις αβεβαιότητες τους σε επίπεδο εμπιστοσύνης 1σ καθώς

και τη σχετική απόκλιση της υπολογιστικής απόδοσης από την πειραματική για την κάθε ενέργεια ξεχωριστά.

Co-60 (1173.24 keV)			
Μπροστά νεκρή ζώνη (cm)	Πλαϊνή νεκρή ζώνη (cm)	Υπολογιστική Απόδοση	Απόκλιση
0.021	0.7	0.02546±0.61%	-1.42%

Πίνακας 3.18: Προσδιορισμός πίσω νεκρής ζώνης συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για την ενέργεια 1173.24 keV του Co-60.

Co-60 (1173.24 keV)			
Μπροστά νεκρή ζώνη (cm)	Πλαϊνή νεκρή ζώνη (cm)	Υπολογιστική Απόδοση	Απόκλιση
0.021	0.7	0.02274±0.61%	-1.36%

Πίνακας 3.19: Προσδιορισμός πίσω νεκρής ζώνης συγκρίνοντας την απόκλιση πειραματικών και υπολογιστικών αποδόσεων για την ενέργεια 1332,51 keV του Co-60.

4.3.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για πηγή βαθμονόμησης φίλτρου.

Στόχος της διαδικασίας αυτής ήταν ο προσδιορισμός κατάλληλων γεωμετρικών παραμέτρων για τον κρύσταλλο του ανιχνευτή. Από τις προσομοιώσεις που διεξήχθησαν προκύπτει ότι οι υπολογιστικές αποδόσεις για τις ενέργειες 59.54, 661.6, 1173.24 και 1332.51 keV αποκλίνουν σε ποσοστό μικρότερο του 2% από τις αντίστοιχες πειραματικές.

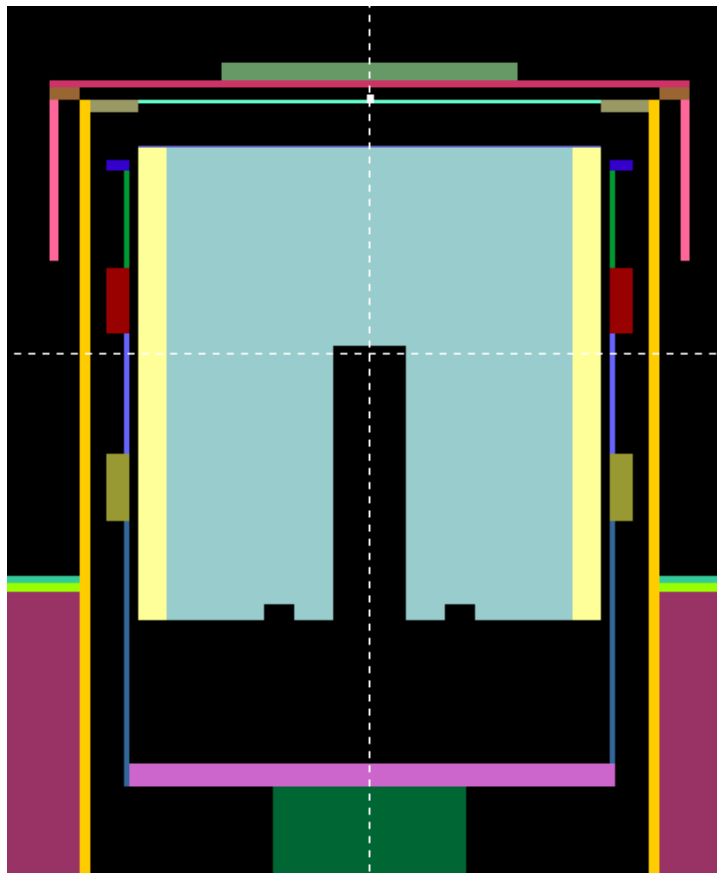
Στους παρακάτω πίνακες (3.20) και (3.21) παρατίθενται συγκεντρωτικά οι βέλτιστες παράμετροι του ανιχνευτή καθώς και οι αποκλίσεις των υπολογιστικών αποδόσεων από τις πειραματικές αποδόσεις κάθε ραδιοϊσοτόπου για τις βέλτιστες διαστάσεις γεωμετρικών παραμέτρων που προσδιορίστηκαν και στην εικόνα (3.6) δίνεται η γεωμετρία του ανιχνευτή μαζί με τις νεκρές ζώνες.

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (cm)
Μπροστά νεκρή ζώνη	0.021
Πλαϊνή νεκρή ζώνη	0.7
Πίσω νεκρή ζώνη	-

Πίνακας 3.20: Βέλτιστες παράμετροι ανιχνευτή.

	Μπροστά νεκρή ζώνη (cm)	Πλαϊνή νεκρή ζώνη (cm)	Υπολογιστική απόδοση	Απόκλιση
Am-241	0.021	0.7	0.19314±0.35%	0.52%
Cs-137	0.021	0.7	0.04792±0.81%	-1.48%
Co-60 (1173.24)	0.021	0.7	0.02546±0.61%	-1.42%
Co-60 (1332.51)	0.021	0.7	0.02274±0.61%	-1.36%

Πίνακας 3.21: Αποκλίσεις των υπολογιστικών αποδόσεων από τις πειραματικές αποδόσεις για τις βέλτιστες διαστάσεις γεωμετρικών παραμέτρων που προσδιορίστηκαν.



Εικόνα 3.8 Γεωμετρία ανιχνευτή μαζί με τις νεκρές ζώνες για την πρότυπη πηγή φίλτρου

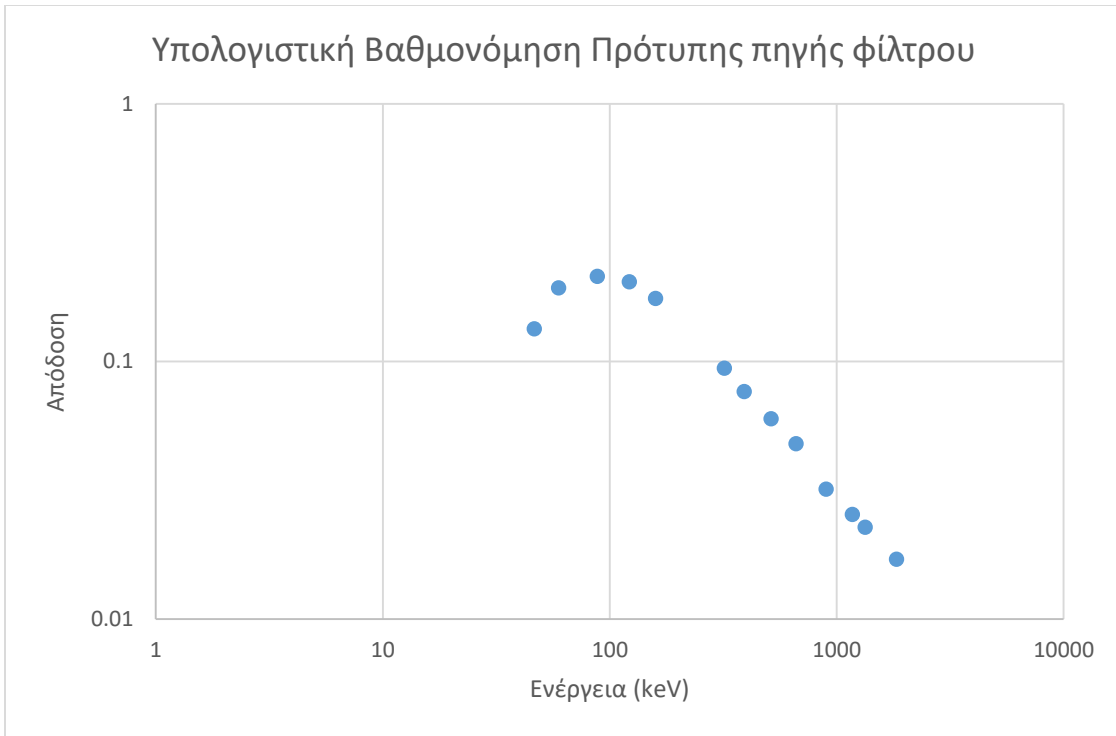
Όπως προηγουμένως, για την κατασκευή της γραφικής παράστασης της απόδοσης φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας, εκτελούνται προσομοιώσεις και για τα υπόλοιπα ραδιοϊσότοπα που υπήρχαν στην πηγή, οι πληροφορίες των οποίων δίνονται από το

πιστοποιητικό της. Παρακάτω φαίνονται ο πίνακας (3.22) των ισotόπων με τις αντίστοιχες ενέργειες τους και τις αντίστοιχες τιμές των αποδόσεων, η γραφική παράσταση της απόδοσης φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας για την πηγή βαθμονόμησης φίλτρου σε λογαριθμική κλίμακα καθώς (εικόνα 3.7) και η καμπύλη αναδρομής (εικόνα 3.8). Η καμπύλη αναδρομής ακολουθεί την εξίσωση (3.12):

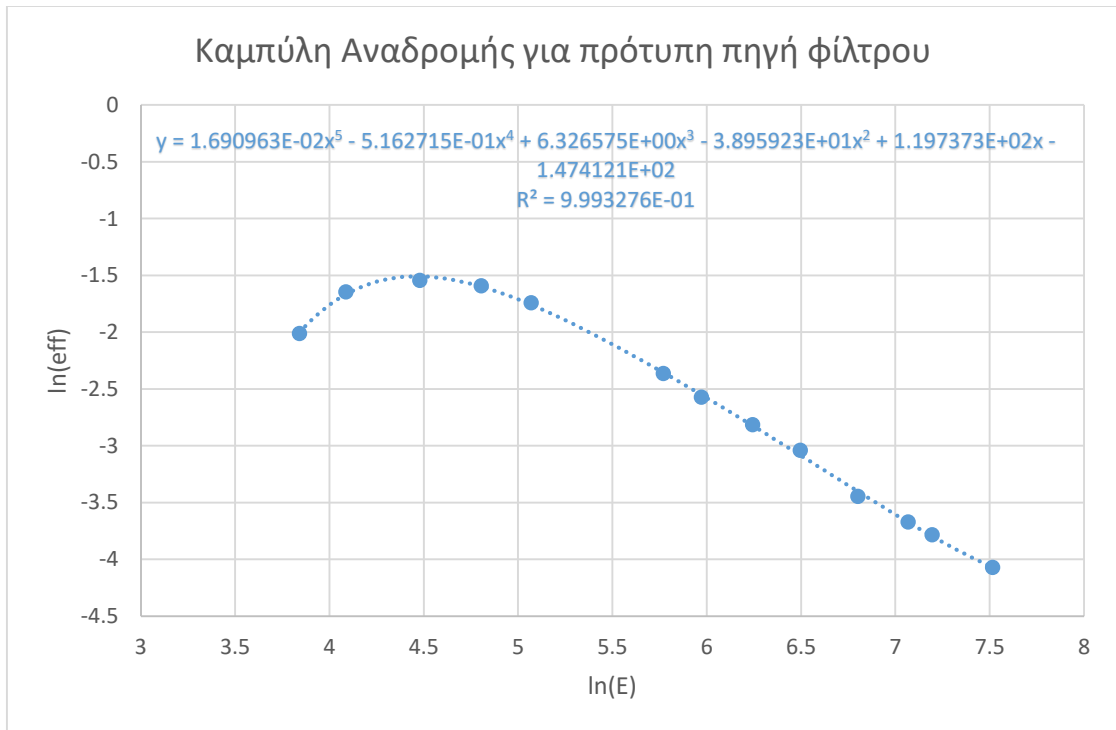
$$y = 1.690963 \cdot 10^{-2} \cdot x^5 - 0.5162715 \cdot x^4 + 6.326575 \cdot x^3 - 38.95923 \cdot x^2 - 119.7373 \cdot x - 147.121 \quad (3.12)$$

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση
Pb-210	46.54	0.13393±1.2%
Am-241	59.54	0.19314±0.7%
Cd-109	88.03	0.21405±1%
Co-57	122.06	0.20389±0.2%
Te-123m	158.99	0.17554±0.2%
Cr-51	320.08	0.09415±0.9%
Sn-113	391.70	0.07639±0.4%
Sr-85	514.01	0.05993±0.4%
Cs-137	661.65	0.04792±0.8%
Y-88	898.04	0.03195±0.5%
Co-60	1173.24	0.02546±0.6%
Co-60	1332.51	0.02274±0.6%
Y-88	1836.09	0.01707±0.7%

Πίνακας 3.22: Προσδιορισμός των υπολογιστικών αποδόσεων για τα ραδιοϊσότοπα που δίνονται για την πρότυπη πηγή φίλτρου.



Εικόνα 3.9 Γραφική παράσταση απόδοσης φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας για πρότυπη πηγή φίλτρου



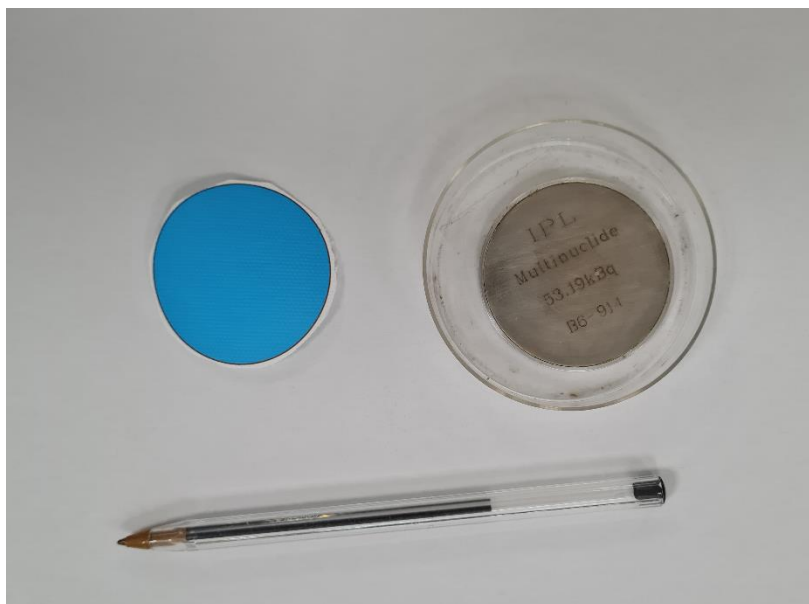
Εικόνα 3.10 Καμπύλη αναδρομής για πρότυπη πηγή φίλτρου

4.4 επικύρωση Βαθμονόμησης Γεωμετρίας φίλτρου – Άσκηση Διασύγκρισης.

Η παράγραφος που ακολουθεί αποσκοπεί στην επικύρωση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν μετά τον προσδιορισμό των νεκρών ζωνών για την πρότυπη πηγή φίλτρου. Για τον σκοπό αυτό, αναλύθηκε δείγμα το οποίο είχε λάβει το ΤΕΡΠ της ΕΕΑΕ κατά τη διεξαγωγή εργαστηριακής άσκησης διασύγκρισης το 2021, στα πλαίσια διεργαστηριακού ελέγχου ικανότητας του δικτύου ALMERA.

Το δίκτυο της ALMERA (Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity) εγκαθιδρύθηκε από τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Commission- IAEA) το 1995 και είναι μια συλλογική προσπάθεια των μελών του, να παρέχουν έγκαιρες και αξιόπιστες αναλύσεις περιβαλλοντικών δειγμάτων για περιπτώσεις πυρηνικών ατυχημάτων αλλά και σκόπιμης απελευθέρωσης ραδιενέργειας. Σήμερα, το δίκτυο της ALMERA αποτελείται από 195 εργαστήρια, ένα από αυτά είναι και το εργαστήριο του ΤΕΡΠ της ΕΕΑΕ (IAEA, 2021). Το δίκτυο της ALMERA διοργανώνει ετήσιες διασυγκρίσεις με σκοπό την αξιολόγηση της ποιότητας μετρήσεων των εργαστηρίων καθώς και την ανάδειξη βέλτιστων μεθοδολογιών.

Στα πλαίσια της εργαστηριακής άσκησης ελήφθησαν και δείγματα φίλτρων. Για την επικύρωση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το ένα εκ των δειγμάτων, και συγκεκριμένα το δείγμα 7-b. Το δείγμα αυτό περιείχε Cs-137 ενεργότητας 11.2 ± 0.6 Bq. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο. Στην εικόνα (3.9) παρουσιάζεται η γεωμετρία του δείγματος 7-b καθώς και η γεωμετρία της πρότυπης πηγής φίλτρου.



Εικόνα 3.11: Δείγμα 7-b και πρότυπη πηγή φίλτρου

Αρχικά το δείγμα 7-b τοποθετήθηκε στον υπό μελέτη ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου, σχετικής απόδοσης 40% του ΤΕΡΠ. Η διάρκεια της μέτρησης ήταν 9830.6 sec.

Παράλληλα, διεξήχθησαν προσομοιώσεις με τη βοήθεια του κώδικα PENELOPE χρησιμοποιώντας τις ίδιες διαστάσεις νεκρών ζωνών που είχαν βρεθεί για την πρότυπη πηγή φίλτρου. Επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες διαστάσεις νεκρών ζωνών καθώς οι γεωμετρία της πρότυπης πηγής φίλτρου με τη γεωμετρία του δείγματος 7-b θεωρούνται αντίστοιχες. Οι διαστάσεις του δείγματος- πηγή μετρήθηκαν από τον χρήστη και εισήχθησαν στο αρχείο γεωμετρίας. Γνωρίζοντας ότι το δείγμα περιείχε μόνο Cs-137, στο αρχείο εισόδου εισάχθηκε μονοενεργειακή πηγή Cs-137. Μετά το πέρας της προσομοίωσης και σύμφωνα με τη διαδικασία για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής που περιγράφηκε στη παράγραφο (3.7) υπολογίστηκε η απόδοση φωτοκορυφής του Cs-137 με τιμή $0.04616 \pm 0.63\%$. Για τον υπολογισμό της ενεργότητας του δείγματος χρησιμοποιήθηκε η σχέση (3.10):

$$R = \frac{(\text{Area})}{(\text{time}) \times (\text{yield}) \times (\text{eff})} \quad (3.10)$$

όπου:

Area : η καθαρή επιφάνεια της φωτοκορυφής συγκεκριμένης ενέργειας , η οποία λαμβάνεται από το φάσμα,

time : ο χρόνος μέτρησης του δείγματος στον ανιχνευτή,

yield : ποσοστό εκπομπής συγκεκριμένης ενέργειας φωτονίων από το σχετικό διάγραμμα διάσπασης του αντίστοιχου ραδιοϊσοτόπου

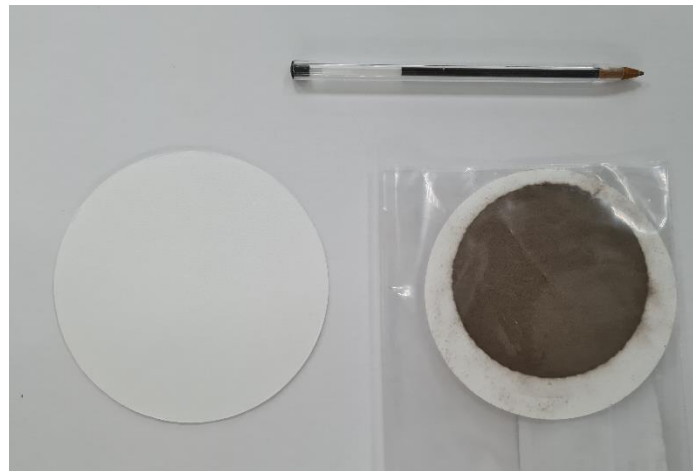
eff : η απόδοση φωτοκορυφής για συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίων.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το δείγμα περιείχε μόνο Cs-137, μελετάται μόνο η ενέργεια 661.65 keV, καθώς το Cs-137 εκπέμπει φωτόνια αυτής της ενέργειας. Το ποσοστό εκπομπής του συγκεκριμένου ραδιοϊσοτόπου είναι ίσο με $\text{yield} = 0.8499$. Οπότε εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση, η τιμή της ενεργότητας του δείγματος εκτιμήθηκε ως 10.64 Bq με αβεβαιότητα 1.6%. Η σχετική απόκλιση μεταξύ της τιμής που δόθηκε από την άσκηση διασύγκρισης και της τιμής που μετρήθηκε από τον ανιχνευτή, υπολογίζεται από την σχέση (3.10) και είναι ίση με 5%. Η απόκλιση αυτή θεωρείται αποδεκτή.

4.6 Καμπύλη Βαθμονόμησης για τη παλαιά γεωμετρία φίλτρου

Προκειμένου να πραγματοποιηθούν μετρήσεις για την παρακολούθηση των επιπέδων της ραδιενέργειας στον ατμοσφαιρικό αέρα, η ΕΕΑΕ διαθέτει αντλία συλλογής μεγάλου όγκου αέρα, η περιγραφή της οποίας γίνεται στην παράγραφο 4.2. Στην αντλία αυτή τοποθετούνται ειδικά φίλτρα για την συλλογή δειγμάτων. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται φίλτρα ινών γυαλιού (τύπου Quartz) και φίλτρα ενεργού άνθρακα (τύπου TEDA). Για τις ανάγκες της παρούσας ΔΕ θα χρησιμοποιηθεί η γεωμετρία των φίλτρων τύπου Quartz για να διεξαχθεί η βαθμονόμηση της απόδοσης φωτοκορυφής για την συγκεκριμένη γεωμετρία η οποία στο εξής θα χαρακτηρίζεται ως παλαιά γεωμετρία φίλτρου. Στην εικόνα (3.10) παρουσιάζονται τα φίλτρα

ινών γυαλιού. Στην αριστερή πλευρά φαίνεται το φίλτρο πριν την δειγματοληψία ενώ στο δεξιά μέρος φαίνεται το φίλτρο μετά την δειγματοληψία.



Εικόνα 3.12: Φίλτρα ινών γυαλιού πριν και μετά τη δειγματοληψία

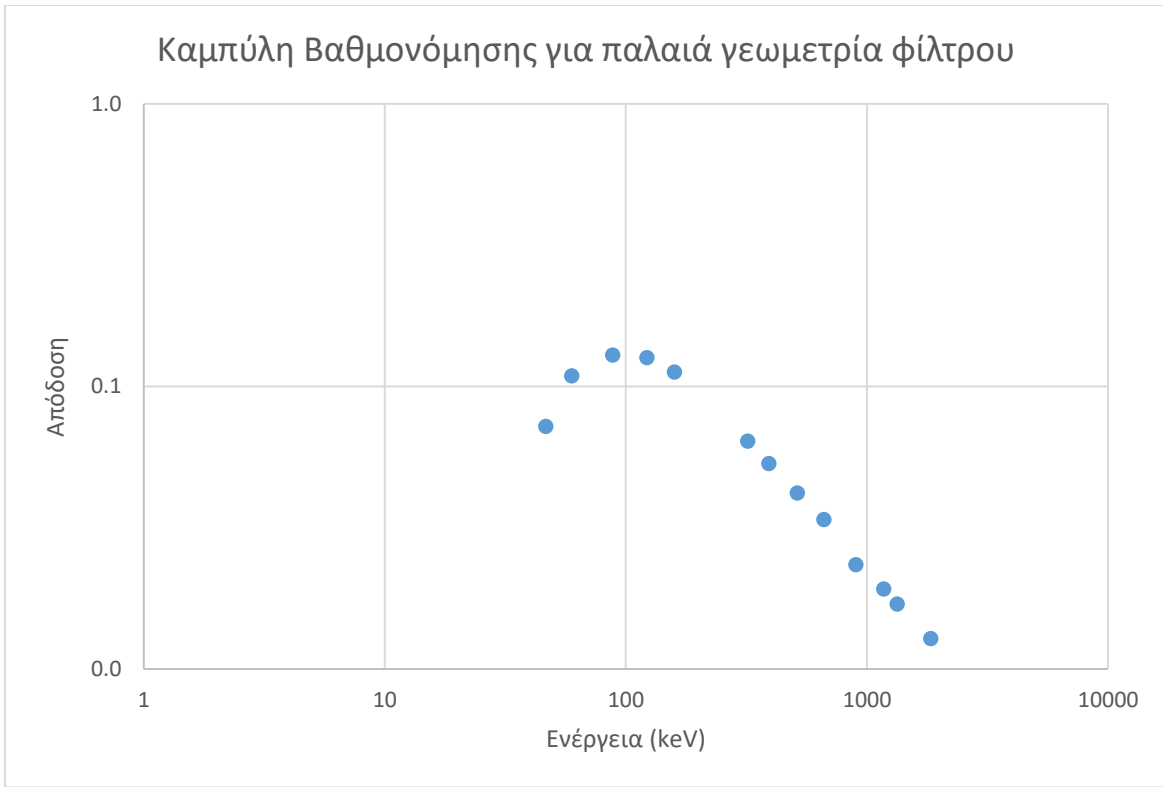
Οι διαστάσεις των νεκρών ζωνών που προέκυψαν από την βαθμονόμηση της πρότυπης πηγής φίλτρου δεν μεταβλήθηκαν, καθώς οι 2 γεωμετρίες πρότυπης πηγής φίλτρου και φίλτρου παλαιάς γεωμετρίας είναι πιο κοντά γεωμετρικά. Στη συνέχεια διενεργήθηκαν προσομοιώσεις για τον προσδιορισμό της απόδοσης φωτοκορυφής με χρήση του κώδικα PENELOPE, όπως περιγράφεται στην παράγραφο (3.6.1). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται στον πίνακα (3.23):

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση
Pb-210	46.54	0.07211±1.7%
Am-241	59.54	0.10896±0.5%
Cd-109	88.03	0.12899±1.3%
Co-57	122.06	0.12631±0.3%
Te-123m	158.99	0.11235±0.3%
Cr-51	320.08	0.06408±1.1%
Sn-113	391.70	0.05334±0.5%
Sr-85	514.01	0.04197±0.4%
Cs-137	661.65	0.03381±0.5%
Y-88	898.04	0.02341±0.6%
Co-60	1173.24	0.01920±0.7%
Co-60	1332.51	0.01696±0.7%
Y-88	1836.09	0.01282±0.8%

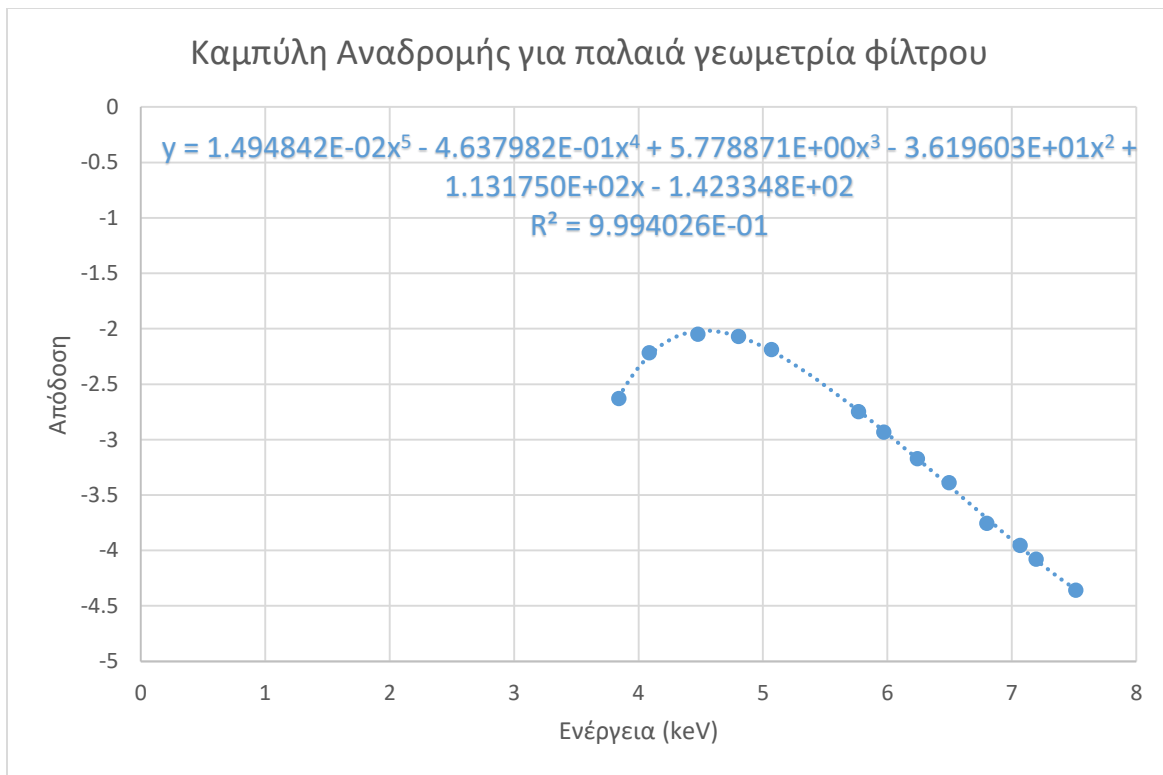
Πίνακας 3.23: Προσδιορισμός των υπολογιστικών αποδόσεων για τα ραδιοϊσότοπα που δίνονται για το φίλτρο παλαιάς γεωμετρίας.

Στις εικόνες (3.11) και (3.12) παρατίθενται η καμπύλη βαθμονόμησης της απόδοσης φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας για την παλαιά γεωμετρία φίλτρου καθώς και η καμπύλη αναδρομής της. Η καμπύλη αναδρομής ικανοποιεί την εξίσωση (3.13):

$$y = 1.494842 \cdot 10^{-2} \cdot x^5 - 0.4637982 \cdot x^4 + 5.778871 \cdot x^3 - 36.19603 \cdot x^2 - 113.1750 \cdot x - 142.3348 \quad (3.13)$$



Εικόνα 3.13 Γραφική παράσταση απόδοσης φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας για την παλαιά γεωμετρία φίλτρου



Εικόνα 3.14 Καμπύλη αναδρομής για παλαιά γεωμετρία φίλτρου

4.7 Καμπύλη βαθμονόμησης για τη νέα γεωμετρία φίλτρου

Καθώς η διάμετρος του ανιχνευτή (6.5 cm) είναι μικρότερη από την διάμετρο του προς μελέτη φίλτρου, ένα μέρος του φίλτρου βρίσκεται εκτός των ορίων του παραθύρου του ανιχνευτή. Δημιουργήθηκε, λοιπόν, η ανάγκη για τη δημιουργία νέας γεωμετρίας ανάλυσης φίλτρου, η οποία όχι μόνο να βρίσκεται εντός των ορίων του παραθύρου του ανιχνευτή αλλά να είναι και κατά το δυνατό ομοιόμορφη. Στόχος ήταν η αποδοτικότερη ανίχνευση φωτονίων που εκπέμπονται από τα ραδιενεργά ισότοπα που εναποτίθενται στον ανιχνευτή.

Η νέα γεωμετρία προέκυψε ύστερα από αναδίπλωση του ήδη υπάρχοντος φίλτρου και τον σχηματισμό γεωμετρίας τεταρτοκυκλίου και παρουσιάζεται στην εικόνα (3.13).



Εικόνα 3.15: Νέα γεωμετρία φίλτρου

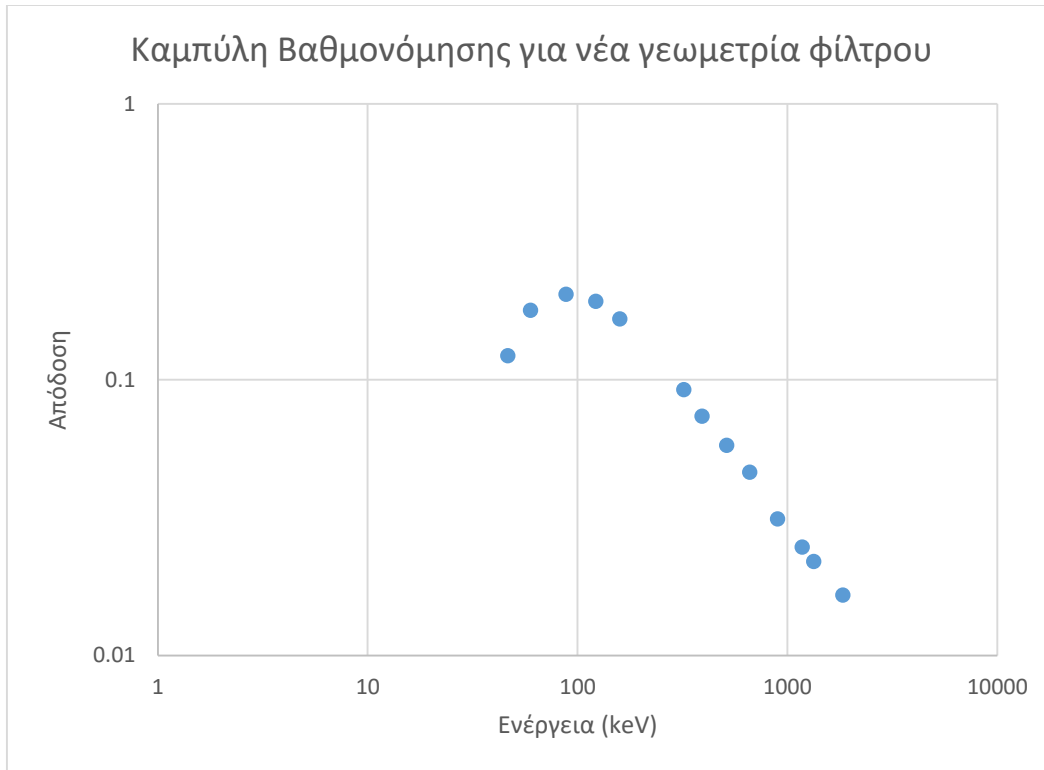
Ο υπολογισμός της απόδοσης φωτοκορυφής και κατ' επέκταση η βαθμονόμηση της απόδοσης για τη νέα γεωμετρία, πραγματοποιείται με προσομοίωση Monte Carlo, εφαρμόζοντας στο αρχείο γεωμετρίας τις διαστάσεις του ανιχνευτή, οι οποίες δίνονται από τον κατασκευαστή καθώς και τις διαστάσεις των νεκρών ζωνών που έχουν προκύψει από την βαθμονόμηση της πρότυπης πηγής φίλτρου, καθώς οι δύο γεωμετρίες δεν έχουν μεγάλες διαφορές. Από τις προσομοιώσεις που διενεργήθηκαν προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα αναφορικά με την απόδοση φωτοκορυφής για τη συγκεκριμένη γεωμετρία.

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Απόδοση
Pb-210	46.54	0.12221±1.3%
Am-241	59.54	0.17855±0.4%
Cd-109	88.03	0.20393±1%
Co-57	122.06	0.19237±0.2%
Te-123m	158.99	0.16620±0.2%
Cr-51	320.08	0.09208±1%
Sn-113	391.70	0.07380±0.4%
Sr-85	514.01	0.05786±0.4%
Cs-137	661.65	0.04626±0.5%
Y-88	898.04	0.03130±0.5%
Co-60	1173.24	0.02470±0.6%
Co-60	1332.51	0.02194±0.6%
Y-88	1836.09	0.01658±0.7%

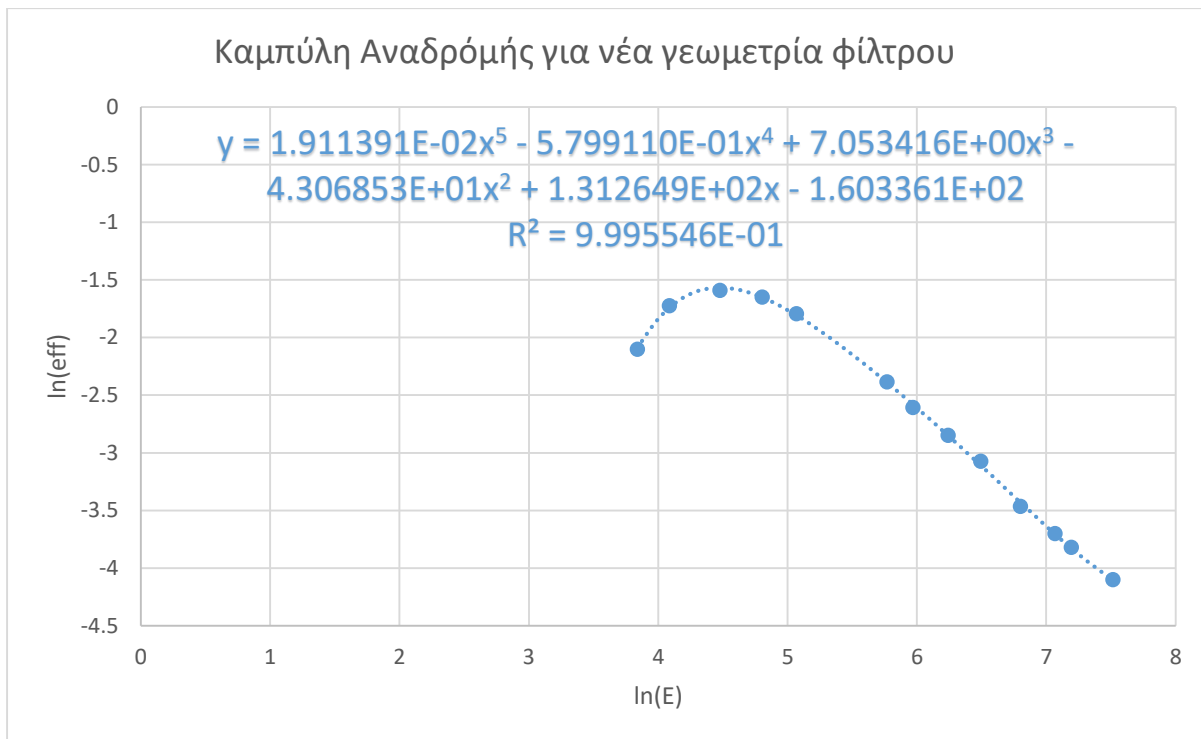
Πίνακας 3.24: Προσδιορισμός των υπολογιστικών αποδόσεων για τα ραδιοϊσότοπα που δίνονται για το φίλτρο νέας γεωμετρίας.

Στις εικόνες (3.14) και (3.15) παρατίθενται η καμπύλη βαθμονόμησης της απόδοσης φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας για τη νέα γεωμετρία φίλτρου καθώς και η καμπύλη αναδρομής για τη συγκεκριμένη γεωμετρία. Η καμπύλη αναδρομής ικανοποιεί την εξίσωση (3.14):

$$y = 1.911391 \cdot 10^{-2} \cdot x^5 - 0.579911 \cdot x^4 + 7.053416 \cdot x^3 - 43.06853 \cdot x^2 - 131.2649 \cdot x - 160.3361 \quad (3.14)$$



Εικόνα 3.16 Γραφική παράσταση απόδοσης φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας για τη νέα γεωμετρία φίλτρου



Εικόνα 3.17 Καμπύλη αναδρομής για τη νέα γεωμετρία φίλτρου

4.8 Σύγκριση της απόδοσης της νέας γεωμετρίας με την απόδοση της παλιάς.

Έχοντας εκτιμήσει τις υπολογιστικές αποδόσεις τόσο για την παλιά όσο και για την καινούργια γεωμετρία και κατασκευάσει τις καμπύλες απόδοσης, το επόμενο βήμα είναι η σύγκριση της απόδοσης φωτοκορυφής για τις δύο αυτές γεωμετρίες. Υπενθυμίζεται ότι και οι δύο αποδόσεις έχουν υπολογιστεί με την βοήθεια προσομοιώσεων Monte Carlo. Για τον σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθεί η απόδοση φωτοκορυφής για μία συγκεκριμένη ενέργεια και συγκεκριμένα για φωτόνια ενέργειας 661.6 keV. Το Cs-137 εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 661.6 keV και είναι ένα ραδιοϊσότοπο το οποίο ανιχνεύεται σε περιπτώσεις πυρηνικού ατυχήματος και έκτακτης ανάγκης.

Για την ήδη υπάρχουσα γεωμετρία (παλαιά γεωμετρία) η απόδοση φωτοκορυφής έχει τιμή:

$$\text{eff}_{\text{old,sim}}(661.6 \text{ keV}) = 0.03381 \pm 0.53\% \quad (3.12)$$

ενώ για την νέα γεωμετρία φίλτρων προέκυψε ότι η απόδοση φωτοκορυφής για την συγκεκριμένη ενέργεια ήταν υψηλότερη, με τιμή:

$$\text{eff}_{\text{new,sim}}(661.6 \text{ keV}) = 0.04626 \pm 0.45\% \quad (3.13)$$

Η σχετική απόκλιση των δύο αποδόσεων θα δίνεται από τον τύπο:

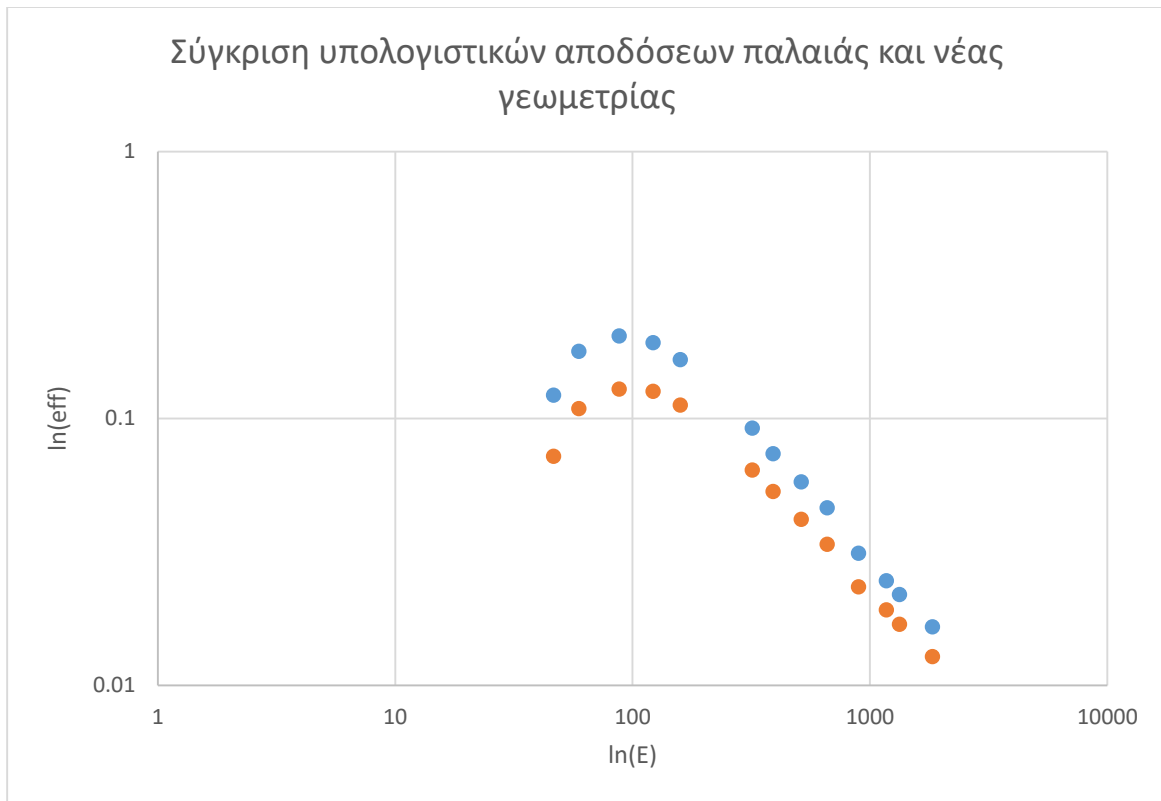
$$\text{relative bias}(\%) = \frac{\text{eff}_{\text{old,sim}} - \text{eff}_{\text{new,sim}}}{\text{eff}_{\text{old,sim}}} \cdot 100\% \quad (3.14)$$

οπότε προκύπτει ότι η απόδοση φωτοκορυφής της νέας γεωμετρίας φίλτρου οδηγεί σε αύξηση της απόδοσης της τάξης του 37%.

Η ίδια διαδικασία, για τον υπολογισμό της σχετικής απόκλισης μεταξύ παλαιάς και νέας γεωμετρίας, ακολουθήθηκε και για τις υπόλοιπες ενέργειες οπότε προκύπτει ο παρακάτω πίνακας (3.25):

Ενέργεια (keV)	Απόδοση φωτοκορυφής παλαιάς γεωμετρίας	Απόδοση φωτοκορυφής νέας γεωμετρίας	Σχετική απόκλιση (%)
46.539	0.07211	0.12221	-69.5%
59.54	0.10896	0.17855	-63.9%
88.03	0.12899	0.20393	-58.1%
122.06	0.12631	0.19237	-52.3%
158.99	0.11235	0.16620	-47.9%
320.08	0.06408	0.09208	-43.7%
391.7	0.05334	0.07380	-38.4%
514	0.04197	0.05786	-37.9%
661.65	0.03381	0.04626	-36.8%
898.04	0.02341	0.03130	-33.7%
1173.24	0.01920	0.02470	-28.6%
1332.51	0.01696	0.02194	-29.3%
183.09	0.01282	0.01658	-29.3%

Πίνακας 3.25: Σύγκριση των αποδόσεων της παλαιάς με τη καινούργια γεωμετρία



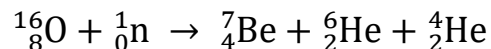
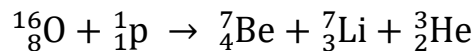
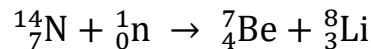
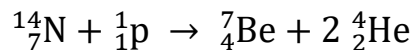
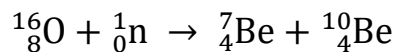
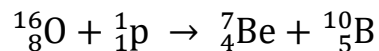
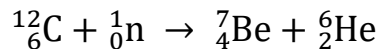
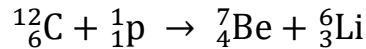
Εικόνα 18 Σύγκριση υπολογιστικών αποδόσεων παλαιάς και νέας γεωμετρίας

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα, παρατηρείται μια βελτίωση της απόδοσης για την ανίχνευση φωτονίων σε όλες της ενέργειες της τάξης του 30% και άνω. Η μεγαλύτερη αυτή απόδοση επιφέρει καλύτερα όρια ανίχνευσης¹, δηλαδή τη δυνατότητα μέτρησης της συγκέντρωσης του εκάστοτε ισότοπου σε δείγματα μικρής ενεργότητας. Επιπλέον, παρέχει τη δυνατότητα για τους ίδιους χρόνους μέτρησης των δειγμάτων να επιτυγχάνεται μικρότερη αβεβαιότητα, δηλαδή καλύτερη στατιστική.

¹ Ο όρος όρια ανίχνευσης (detection limit, L_D) αναφέρεται στην ελάχιστη ποσότητα ραδιενέργειας που μπορεί να ανιχνευθεί με ικανοποιητική αβεβαιότητα (Gilmore, 1995).

4.9 Μετρήσεις Be-7 στην ατμόσφαιρα

Το Be-7 είναι ένα από τα 12 ισότοπα του Βηρυλλίου, είναι ένα δραστικό ραδιενεργό στοιχείο με χρόνο υποδιπλασιασμού 53.44 ημέρες. Εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 477.59 keV με ποσοστό εκπομπής 10.4%. Ο κύριος τρόπος σχηματισμού του Be-7 προέρχεται από την αλληλεπίδραση των πυρήνων άνθρακα (C), αζώτου (N), και οξυγόνου (O), που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα με τα κύρια συστατικά της κοσμικής ακτινοβολίας που είναι τα πρωτόνια (p) και τα νετρόνια (n), σύμφωνα με τις παρακάτω πυρηνικές αντιδράσεις (Παπανδρέου, 2009):



Περίπου το 70% της ποσότητας του Be-7 σχηματίζεται στη στρατόσφαιρα, στην οποία παραμένει περίπου 1,5 έτη, ενώ το υπόλοιπο 30% σχηματίζεται στην ανώτερη τροπόσφαιρα, στην οποία παραμένει περίπου 28 ημέρες. Από μετρήσεις που έχουν γίνει, οι συγκεντρώσεις του Be-7 στην ατμόσφαιρα εξαρτώνται από τους εξής παράγοντες:

1. Από μετεωρολογικές συνθήκες: Η βροχή, η θερμοκρασία, η απόλυτη και η σχετική υγρασία και η ατμοσφαιρική πίεση επηρεάζουν σημαντικά τη συγκέντρωση του Be-7 στην ατμόσφαιρα. Πιο συγκεκριμένα στις εποχές με πολλές βροχοπτώσεις παρατηρούνται χαμηλές συγκεντρώσεις Be-7. Επιπλέον, Η θέρμανση της επιφάνειας της γης από το ήλιο έχει ως αποτέλεσμα τη θέρμανση των αέριων μαζών της ατμόσφαιρας που βρίσκονται σε επαφή με τη γη. Η πυκνότητα των θερμών αέριων αυτών μαζών μειώνεται με αποτέλεσμα οι μάζες αυτές ως ελαφρύτερες να ανέρχονται προς τα πάνω με ταυτόχρονη κίνηση προς τα κάτω των ψυχρότερων αέριων μαζών που βρίσκονται σε υψηλότερα ατμοσφαιρικά στρώματα. Αυτή η κατακόρυφη κίνηση των αέριων μαζών της ατμόσφαιρας έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας των ατόμων Be-7 που σχηματίστηκαν στα ανώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας. Για το λόγο αυτό, στους θερμούς μήνες του έτους η συγκέντρωση του Be-7 είναι αυξημένη. Το φαινόμενο της κατακόρυφης κίνησης των

αέριων μαζών της ατμόσφαιρας δεν εμφανίζεται στους ψυχρούς μήνες του έτους και για το λόγο αυτό το χειμώνα η συγκέντρωση του Be-7 στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρα είναι μικρότερη (Ιωαννίδου, 1994).

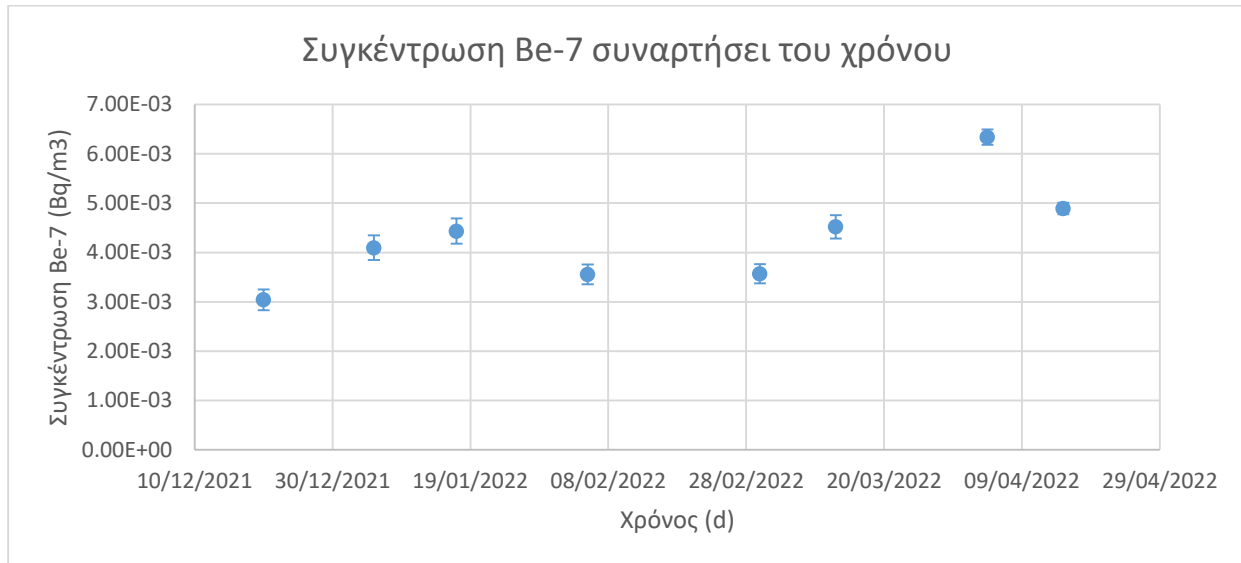
2. Από την Ηλιακή δραστηριότητα: Οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις του Be-7 (σε mBq/m³) μειώνονται με την αύξηση του αριθμού των ηλιακών κηλίδων. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του γεγονότος ότι το μαγνητικό πεδίο του ήλιου γίνεται ισχυρότερο κάθε φορά που δημιουργείται μια ηλιακή κηλίδα. Με την αύξηση του αριθμού των ηλιακών κηλίδων και την ταυτόχρονη ισχυροποίηση του μαγνητικού πεδίου του ήλιου, τα φορτισμένα σωματίδια (πρωτόνια) που συνιστούν την κοσμική ακτινοβολία παγιδεύονται περισσότερο στο ηλιακό μαγνητικό πεδίο οπότε στην ατμόσφαιρα της γης να φθάνουν λιγότερα κοσμικά πρωτόνια. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η μείωση του ρυθμού παραγωγής Be-7 με ταυτόχρονη μείωση της συγκέντρωσης Be-7 στην ατμόσφαιρα της γης.
3. Από το γεωμαγνητικό πλάτος και το υψόμετρο. Το γεωμαγνητικό πεδίο είναι ισχυρό πλησίον των πόλων της γης, δηλαδή στους γεωμαγνητικούς πόλους, και ασθενέστερο στις περιοχές της ατμόσφαιρας γύρω από τον ισημερινό της γης. Τα θετικά φορτισμένα πρωτόνια της κοσμικής ακτινοβολίας που κατευθύνονται προς τη γη παγιδεύονται στο γεωμαγνητικό πεδίο και με ελικοειδείς τροχιές κινούνται προς τις περιοχές με ισχυρότερο γεωμαγνητικό πεδίο, δηλαδή προς τις περιοχές των γεωμαγνητικών πόλων της γης, με αποτέλεσμα στις περιοχές αυτές οι συγκεντρώσεις των κοσμικών πρωτονίων είναι μεγαλύτερη. Για το λόγο αυτό, στις περιοχές πλησίον των γεωμαγνητικών πόλων ο ρυθμός παραγωγής Be-7 και κατά συνέπεια, οι συγκεντρώσεις Be-7 να είναι μεγαλύτερες.

Οι αλληλεπιδράσεις των κοσμικών πρωτονίων στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση του αριθμού των πρωτονίων αυτών στα χαμηλότερα ατμοσφαιρικά στρώματα με αποτέλεσμα ο ρυθμός παραγωγής Be-7, και κατά συνέπεια η συγκέντρωση του Be-7 να μειώνεται όσο τα πρωτόνια της κοσμικής ακτινοβολίας πλησιάζουν τα χαμηλότερα στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας, η ακόμα και την επιφάνεια της γης.

Ο ποσοτικός προσδιορισμός του Be-7 στον αέρα γίνεται με δειγματοληψία ατμοσφαιρικού αέρα (με αντλία αέρα) και υγρών κατακρημνίσεων (με ειδικούς δειγματολήπτες) και στη συνέχεια γίνεται ανάλυση δειγμάτων. Η πιο συνήθης τεχνική ανάλυσης είναι η τεχνική της γ-φασματοσκοπικής ανάλυσης με ανιχνευτές υπερκαθαρού γερμανίου. Ο χρόνος δειγματοληψίας κυμαίνεται σε διάστημα μεταξύ μερικών ημερών (Ioannidou, 2005).

Για την πραγματοποίηση της δειγματοληψίας αέρα, η ΕΕΑΕ χρησιμοποιεί αντλία αέρα υψηλής παροχής, τα χαρακτηριστικά της οποίας αναφέρονται στη παράγραφο 4.2, η οποία βρίσκεται στις εγκαταστάσεις της ΕΕΑΕ. Στην αντλία τοποθετούνται φίλτρα από ίνες γυαλιού (fiber-glass filters). Η διάρκεια της δειγματοληψίας ήταν 10 ημέρες. Μετά το πέρας της δειγματοληψίας, το φίλτρο διπλώνεται στη νέα του γεωμετρία (τεταρτοκύκλιο), τοποθετείται σε πλαστική σακούλα και σφραγίζεται αεροστεγώς. Στη συνέχεια το δείγμα τοποθετείται στον ανιχνευτή DIAS για γ-φασματοσκοπική ανάλυση. Ο χρόνος μέτρησης του δείγματος ήταν 1 ημέρα. Για τις ανάγκες της παρούσας ΔΕ λήφθηκαν οκτώ δείγματα κατά το χρονικό διάστημα Δεκεμβρίου- Απριλίου με σκοπό τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του Be-7 την περίοδο αυτή.

Στην Εικόνα (3.17) παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις του Be-7 κατά τη περίοδο Δεκεμβρίου-Απριλίου.



Εικόνα 3.19 Συγκέντρωση BE-7 κατά το χρονικό διάστημα Δεκεμβρίου 2021 - Απριλίου 2022

Από το παραπάνω διάγραμμα, διαπιστώνεται ότι οι συγκεντρώσεις του Be-7 κατά το χρονικό διάστημα Δεκεμβρίου- Απριλίου κυμαίνονται από 3.04 mBq/m³ (Δεκέμβριος 2021) έως 6.34 mBq/m³ (Απρίλιος 2022). Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές (EL-Hussein, 2001), (Azahra, Seasonal Be-7 concentrations in near-surface air of Granada (Spain) in the period 1993-2001, 2003), (Ιωαννίδου, 1994), (Azahra, The seasonal variations of Be-7 and Pb-210 concentrations in air, 2004), οι συγκεντρώσεις του Be-7 στην ατμόσφαιρα κυμαίνονται μεταξύ 1-14 mBq/m³. Πιο αυξημένες συγκεντρώσεις παρατηρούνται κυρίως το καλοκαίρι ή σε περιόδους με έντονη βροχόπτωση.

4.10 Συμπεράσματα

Στόχος του κεφαλαίου αυτού ήταν η βαθμονόμηση της απόδοσης του ανιχνευτή Γερμανίου χρησιμοποιώντας πρότυπη πηγή φίλτρου και ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που εφαρμόστηκε για την πρότυπη πηγή όγκου στο κεφάλαιο 3. Προσδιορίστηκαν οι διαστάσεις των νεκρών ζωνών για την πρότυπη πηγή φίλτρου και υπολογίστηκαν οι αποδόσεις φωτοκορυφών που αντιστοιχούν σε διάφορες ενέργειες. Μετά από κάθε υπολογισμό παρουσιάστηκαν οι διαστάσεις των νεκρών ζωνών, το διαγράμμα απόδοσης φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας καθώς και οι καμπύλη αναδρομής. Σημειώνεται ότι οι υπολογιστικές αποδόσεις για τις διάφορες ενέργειες αποκλίνουν σε ποσοστό μικρότερο του 2% για την πρότυπη πηγή φίλτρου. Οι αποκλίσεις αυτές κρίθηκαν ικανοποιητικές. Προκειμένου να επικυρωποιηθεί η βαθμονόμηση, μετρήθηκε δείγμα φίλτρου από άσκηση διασύγκρισης. Το δείγμα αυτό, περιείχε

Cs-137. Προσομοιώθηκε η νέα γεωμετρία ανιχνευτή- δείγματος, κρατώντας σταθερές τις διαστάσεις των νεκρών ζωνών που είχαν προκύψει από τις προσομοιώσεις με τη γεωμετρία φίλτρου, καθώς οι γεωμετρίες αυτές θεωρούνται αντίστοιχες. Η τιμή της απόδοσης για την ενέργεια που εκπέμπεται από το Cs-137 (661.6 keV) που προέκυψε από την προσομοίωση απέκλινε από την τιμή αναφοράς σε ποσοστό της τάξης του 5%.

Στη συνέχεια, διενεργήθηκαν προσομοιώσεις για τον υπολογισμό της απόδοσης για φίλτρα ινών γυαλιού (παλαιά γεωμετρία), φίλτρα τα οποία χρησιμοποιεί το ΤΕΡΠ για μετρήσεις της συγκέντρωσης ραδιενέργειας στον αέρα. Καθώς και η γεωμετρία του φίλτρου αυτού είναι παρόμοια με τη γεωμετρία της πρότυπης πηγής φίλτρου χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες διαστάσεις νεκρών ζωνών με της πρότυπης πηγής φίλτρου. Παρουσιάστηκαν οι υπολογιστικές αποδόσεις για τις διάφορες ενέργειες, το διάγραμμα απόδοσης φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας, καθώς και η καμπύλη αναδρομής. Προτάθηκε νέα γεωμετρία (αναδίπλωση του ήδη υπάρχοντος φίλτρου και σχηματισμός τεταρτοκυκλίου) έτσι ώστε όλο το δείγμα να βρίσκεται εντός των ορίων του παραθύρου του ανιχνευτή και παράλληλα να είναι ομοιόμορφη. Στόχος ήταν η αποδοτικότερη ανίχνευση φωτονίων που εκπέμπονται από τα ραδιενεργά ισότοπα που εναποτίθενται στον ανιχνευτή. Όπως και με την παλαιά γεωμετρία παρουσιάστηκαν οι υπολογιστικές αποδόσεις για τις διάφορες ενέργειες, το διάγραμμα απόδοσης φωτοκορυφής συναρτήσει της ενέργειας, καθώς και η καμπύλη αναδρομής. Αποδείχθηκε ότι η απόδοση φωτοκορυφής βελτιώνεται σε όλες τις ενέργειες σε ποσοστό 30% και άνω.

Τέλος, έγινε αναφορά στο ισότοπο Be-7, ένα ισότοπο που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στις μετρήσεις ραδιενέργειας περιβάλλοντος. Χρησιμοποιώντας τη νέα γεωμετρία, μετρήθηκαν δείγματα για τον προσδιορισμό του ισότοπου Be-7 στην ατμόσφαιρα σε χρονική περίοδο 4 μηνών. Πιο αυξημένες συγκεντρώσεις Be-7 παρατηρούνται κυρίως σε περιόδους με έντονη βροχόπτωση και το καλοκαίρι.

5. Βαθμονόμηση του δειγματολήπτη αέρα

5.1 Εισαγωγή

Όπως έχει αναφερθεί στη παράγραφο 2.2, σημαντική παράμετρος στην επόπτευση της ραδιενέργειας του περιβάλλοντος αποτελεί η παρακολούθηση των επιπέδων ραδιενέργειας της ατμόσφαιρας σύμφωνα με τα άρθρα 35, 36 της Συνηθήκης Ευρατόμ. Η ΕΕΑΕ διαθέτει σύστημα για συνεχείς μετρήσεις των επιπέδων ραδιενέργειας στο περιβάλλον με χρήση αντλίας συλλογής μεγάλου όγκου αέρα, στις οποίες τοποθετούνται ειδικά φίλτρα για τη συλλογή δειγμάτων. Τα φίλτρα αυτά συλλέγονται και αναλύονται με την τεχνική της γ-φασματοσκοπίας, χρησιμοποιώντας ανιχνευτές υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe detectors). Για την αξιοπιστία των μετρήσεων της αντλίας καθίσταται απαραίτητη η περιοδική και συστηματική βαθμονόμησης της με κατάλληλο βαθμονομητή. Στις παραγράφους 4.2 και 4.3 παρουσιάζονται η διαδικασία βαθμονόμησης της αντλίας του ΤΕΡΠ της ΕΕΑΕ, όπως πραγματοποιήθηκε στην παρούσα ΔΕ, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή. Τέλος, προκειμένου να διαπιστωθεί εάν η αντλία λειτουργεί ικανοποιητικά, διενεργήθηκε στατιστικός έλεγχος από τα δεδομένα που προέκυψαν από τον βαθμονομητή και από την αντλία.

5.2 Όργανα και διαδικασία μέτρησης

Για τις ανάγκες της παρούσας ΔΕ χρησιμοποιήθηκε η αντλία υψηλής παροχής τύπου DH-1240 της εταιρείας F&J SPECIALTY PRODUCTS που διαθέτει το ΤΕΡΠ-ΕΕΑΕ. Η αντλία, παρέχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης δειγματοληψίας φίλτρων ινών γυαλιού (τύπου Quartz) και φίλτρων ενεργού άνθρακα (τύπου TEDA). Μετά το τέλος της δειγματοληψίας, οι πληροφορίες που λαμβάνονται από την αντλία αφορούν την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης (σε mm Hg), τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας (σε °C), το συνολικό όγκο αέρα που διαπερνά την αντλία (σε SL= standard litres), τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της ροής που καταγράφεται στην αντλία (σε SLPM = standard litres per minute), καθώς και τη μέση ροή αέρα που διαπερνά την αντλία (σε SLPM) κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

Αναφορικά με τον βαθμονομητή που χρησιμοποιήθηκε για την διαδικασία βαθμονόμησης, είναι κατασκευασμένος από την ίδια εταιρεία (F&J SPECIALTY PRODUCTS) και πρόκειται για έναν βαθμονομητή που διαθέτει σωλήνα Venturi. Παρέχει πληροφορίες αναφορικά με την ατμοσφαιρική πίεση (σε mm Hg), τη θερμοκρασία (σε °C) και τη στιγμιαία ροή αέρα δειγματοληψίας (σε SLPM). Στις εικόνες (4.1) και (4.2) παρουσιάζονται η αντλία και ο βαθμονομητής που διαθέτει η ΕΕΑΕ.



Εικόνα 4.20: Η αντλία υψηλής παροχής της ΕΕΑΕ.



Εικόνα 4.21: Ο Βαθμονομητής της ΕΕΑΕ

Η αρχή λειτουργίας του βαθμονομητή βασίζεται στην εξίσωση Bernoulli και περιγράφεται ακολούθως. Η εξίσωση Bernoulli για μη συνεκτικό, ασυμπίεστο ρευστό και αστρόβιλη ροή δηλώνει τη διατήρηση της ενέργειας και σε σωλήνα – αγωγό μπορεί να γραφτεί ως:

$$P + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho gh = \text{const} \quad (4.1)$$

όπου:

P : η πίεση σε ένα σημείο του αγωγού,

ρ : η πυκνότητα,

V : η ταχύτητα του ρευστού,

g : η σταθερά της βαρύτητας,

h : το ύψος του σημείου που αφορά τη μέτρηση.

Διαμορφώνοντας το εσωτερικό του αγωγού, μειώνοντας τη διάμετρο του για την περίπτωση του αγωγού που χρησιμοποιήθηκε, η εξίσωση (4.1) μπορεί να γραφεί ως :

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho V_2^2 \quad (4.2)$$

Σημειώνεται ότι η ένδειξη 1 αναφέρεται σε σημείο του αγωγού πριν τη διαμόρφωση του, ενώ η ένδειξη 2 αναφέρεται σε σημείο του αγωγού μετά την διαμόρφωση. Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.2) την ταχύτητα του ρευστού με την αντίστοιχη ροή Q , η οποία είναι κοινή και για τα δύο σημεία προκύπτει η εξίσωση (4.3):

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \frac{Q^2}{A_1^2} = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \frac{Q^2}{A_2^2} \quad (4.3)$$

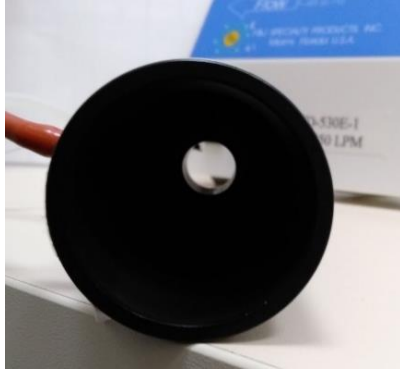
όπου A_1 και A_2 οι διατομές του αγωγού στα δύο σημεία αντίστοιχα. Τελικά, η ροή Q μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της διαφοράς της πίεσης του ρευστού στα δύο σημεία και προκύπτει η εξίσωση (4.4):

$$Q = A_1 A_2 \left[\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(A_1^2 - A_2^2)} \right]^{1/2} \quad (4.4)$$

Στη εικόνα (4.3) παρουσιάζονται τα σημεία μέτρησης της υψηλής (high) και της χαμηλής (low) πίεσης του βαθμονομητή, ενώ στην εικόνα (4.4) φαίνεται η εσωτερική διαμόρφωση στον αγωγό για τη μείωση της διατομής.



Εικόνα 4.22: Σημεία μέτρησης, της υψηλής και χαμηλής πίεσης στον Βαθμονομητή



Εικόνα 4.23:Εσωτερική διαμόρφωση για τη μείωση της διατομής στον αγωγό του Βαθμονομητή

Σημειώνεται ότι η μέτρηση της ροής αέρα στις αντλίες γίνεται επίσης με όμοιο σωλήνα Venturi και βασίζεται στην εξίσωση (4.4). Για την πραγματοποίηση της βαθμονόμησης, της σύγκρισης δηλαδή των ροών που εκτιμά η αντλία και ο βαθμονομητής, απαιτείται η σε σειρά σύνδεσή τους. Σημειώνεται ότι όλες οι συνδέσεις θα πρέπει να γίνονται με τρόπο στεγανό, δηλαδή χωρίς να επιτρέπεται η εισροή αέρα από επιπλέον σημεία. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το εξάρτημα που φαίνεται στην εικόνα (4.5) το οποίο είναι και αυτό της εταιρίας F&J Specialty Products. Τέλος στην εικόνα (4.6) φαίνεται η τελική συνδεσμολογία που εφαρμόστηκε για την διαδικασία βαθμονόμησης της αντλίας.



Εικόνα 4.24:Προσαρμογέας για τη μέτρηση διάταξης με φίλτρο τύπου Quartz



Εικόνα 4.25: Τελική συνδεσμολογία για τη βαθμονόμηση της αντλίας της ΕΕΑΕ

Η βαθμονόμηση της αντλίας καθίσταται απαραίτητη έτσι ώστε να ελεγχθεί εάν η αντλία λαμβάνει σωστά δεδομένα αναφορικά με την ροή του ατμοσφαιρικού αέρα και άρα του συνολικού όγκου αέρα που δειγματολήφθηκε. Με την βαθμονόμηση της αντλίας γίνεται σύγκριση της μέσης ροής της αντλίας και του βαθμονομητή για διάφορες περιοχές ροών που δύναται να δουλέψει η αντλία. Σημειώνεται ότι η αντλία παρέχει πληροφορίες τόσο για την τιμή του συνολικού όγκου αέρα της δειγματοληψίας (sl) όσο και τη μέση ροή (slrpm) στο χρονικό διάστημα που διήρκησε η δειγματοληψία. Ο βαθμονομητής ωστόσο, παρέχει πληροφορίες για τη στιγμιαία τιμή της ροής (slrpm).

Για να γίνει η βαθμονόμηση της αντλίας ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία. Πραγματοποιούνταν δειγματοληψίες χρονικής διάρκειας 10 λεπτών. Η κάθε δειγματοληψία αφορούσε διαφορετικές τιμές της ροής αέρα. Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας καταγράφονταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα οι τιμές της ροής που δίνονταν από τον βαθμονομητή. Για κάθε δειγματοληψία λήφθηκαν δέκα τιμές της στιγμιαίας ροής από τον βαθμονομητή. Μετά το πέρας της κάθε δειγματοληψίας υπολογίστηκε η μέση τιμή των ροών που προκύπτουν από τον βαθμονομητή και στη συνέχεια γινόταν σύγκριση της μέσης τιμής αυτής, με την μέση τιμή της ροής του αέρα, όπως αυτή καταγραφόταν από την αντλία για το ίδιο χρονικό διάστημα.

Πρέπει να σημειωθεί επίσης, ότι η ρύθμιση της ροής του αέρα δεν ήταν δυνατή από την ίδια την αντλία. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν φίλτρα αέρα, συγκεκριμένα τα φίλτρα με ινών γυαλιού που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του ανιχνευτή (Κεφάλαιο 3). Σε κάθε δειγματοληψία τοποθετούνταν σε διαφορετική θέση προκειμένου να καλυφθούν μετρήσεις, που καλύπτουν κατά το δυνατό όλο το εύρος των ροών που μπορεί να καταγραφεί από την αντλία. Σε κάθε περίπτωση έπρεπε να εξασφαλίζεται η ομαλή ροή στα σημεία της μέτρησης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται στον κεφάλαιο 4.3.1.

5.3 Μετρήσεις και Αποτελέσματα

5.3.1 Μετρήσεις

Στον Πίνακα 1.1 δίνονται οι μετρήσεις ροής για 5 διαφορετικές περιοχές ροών. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε ομάδα μετρήσεων δίνονται η μέση τιμή της ροής όπως παρέχεται από την αντλία στο τέλος της μέτρησης, οι στιγμιαίες τιμές της ροής όπως καταγράφηκαν από τον βαθμονομητή καθώς και η μέση τιμή των ροών του βαθμονομητή. Παράλληλα στον Πίνακα 1.2 παρατίθενται οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές που καταγράφονται από την αντλία σε κάθε δειγματοληψία.

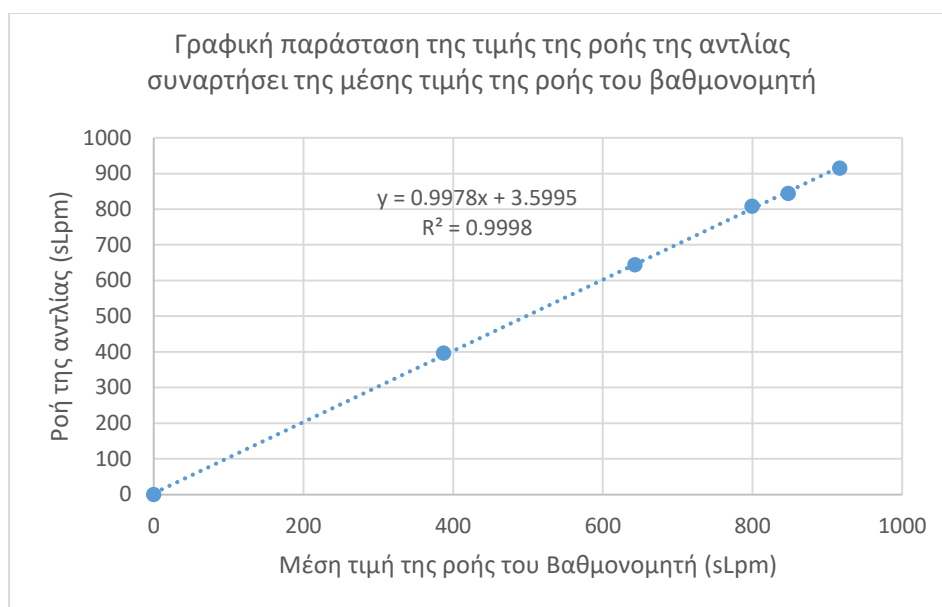
Μέτρηση ροής (sLpm)									
#1		#2		#3		#4		#5	
Αντλία	Βαθμονομητής	αντλία	Βαθμονομητής	αντλία	Βαθμονομητής	Αντλία	Βαθμονομητής	αντλία	Βαθμονομητής
915.3	917.5	844.1	845.6	808.1	798.8	644.3	642.6	395.8	384.6
	914.9		848.0		800.3		641.4		386.5
	919.2		848.8		800.7		642.1		389.6
	914.5		846.8		798.2		643.2		387.6
	918.8		849.1		799.1		643.4		390.3
	917.6		847.5		798.0		643.5		386.5
	915.6		847.7		800.5		641.8		386.3
	915.8		848.8		799.1		646.3		387.5
	914.6		847.2		799.1		642.5		387.9
	917.8		847.4		801.5		643.4		385.1
\bar{x}	916.6		847.7		799.5		643.0		387.2

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα που προκύπτουν από την κάθε μέτρηση.

Δειγματοληψία	Ελάχιστη τιμή ροής αντλίας	Μέγιστη τιμή ροής αντλίας
1	851.9	978.7
2	771	917.2
3	738.1	878.1
4	476.9	811.7
5	265.5	526.5

Πίνακας 4.2: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές της ροής που καταγράφονται στην αντλία.

Στο διάγραμμα (4.7) παρουσιάζεται η ισχυρή ($R^2=0.9998$) γραμμική συσχέτιση της ροής της αντλίας και της μέσης ροής του βαθμονομητή, όπως προέκυψε από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα ΔΕ.



Εικόνα 4.26 Διάγραμμα ροής αντλίας συναρτήσει της μέσης τιμής της ροής του βαθμονομητή

Η αβεβαιότητα της αντλίας δεν δίνεται από την ίδια την αντλία οπότε απαιτείται ο υπολογισμός της. Τα δεδομένα της κάθε μέτρησης που λαμβάνουμε από την αντλία αφορούν την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της ροής, δηλαδή το εύρος της ροής που καταγράφεται στο ροόμετρο, καθώς και τη μέση τιμή της ροής κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της. Με τη χρήση του εύρους της ροής και θεωρώντας ορθογωνική κατανομή, μπορεί να γίνει η εκτίμηση της αβεβαιότητας σύμφωνα με τη σχέση (4.5):

$$unc = \frac{x_{i,max} - x_{i,min}}{2\sqrt{3}} \quad (4.5)$$

οπότε προκύπτει ο πίνακας 4.3:

Ροή Αντλίας (sLpm)	unc (sLpm)
915.3	36.6
844.1	42.2
808.1	40.4
644.3	96.7
395.8	75.2

Πίνακας 4.3: Αβεβαιότητες για την κάθε μέτρηση που προκύπτουν από την αντλία

Ο υπολογισμός της αβεβαιότητας της μέσης τιμής της ροής του Βαθμονομητή υπολογίζεται από τη σχέση (4.6):

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{\sum_1^N (\bar{x} - x_i)^2}{N(N-1)}} \quad (4.6)$$

οπότε προκύπτει ο πίνακας 4.4 :

Μέση τιμή ροής Βαθμονομητή (sLpm)	unc (sLpm)
916.6	0.6
847.7	0.3
799.5	0.4
643.0	0.4
387.2	0.6

Πίνακας 4.4: Αβεβαιότητες μέσης τιμής της ροής του Βαθμονομητή

Προκειμένου να συγκρίνουμε την τιμή της ροής της αντλίας με τη μέση τιμή της ροής του Βαθμονομητή χρησιμοποιούμε τον τύπο της σχετικής απόκλισης, όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 3 και συγκεκριμένα η σχέση (3.10), και λαμβάνουμε τα εξής αποτελέσματα:

Μέτρηση	Σχετική Απόκλιση
1	0.15%
2	0.39%
3	1.06%
4	0.20%
5	2.18%

Πίνακας 4.5: Σχετική απόκλιση ροής της αντλίας με τη μέση τιμή της ροής του Βαθμονομητή για την κάθε μέτρηση.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 1.5 προκύπτει ότι η μέγιστη σχετική απόκλιση είναι της τάξης του 2.2%, ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις η σχετική απόκλιση δεν ξεπερνά την τιμή 1%. Για περιβαλλοντικές μετρήσεις οι αποκλίσεις αυτές θα πρέπει να θεωρούνται ικανοποιητικές..

5.3.2 Στατιστικός έλεγχος με U-test

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος σύγκρισης 2 τιμών και κατά πόσο θεωρούνται στατιστικά ίσες είναι ο στατιστικός έλεγχος με U- test. Πρόκειται για ένα δίπλευρο στατιστικό test που στηρίζεται στην τιμή της μεταβλητής U. Στον στατιστικό έλεγχο αυτόν είναι γνωστές και οι 2 τιμές του μεγέθους που μελετάται με δύο διαφορετικούς τρόπους/μεθόδους (x_1 και x_2) καθώς και οι αντίστοιχες απόλυτες αβεβαιότητες τους ($\delta(x_1)$ και $\delta(x_2)$). Αρχικά, ορίζεται η μηδενική και η εναλλακτική υπόθεση H_0 και H_1 .

$$H_0 : x_1 = x_2$$

$$H_1 : x_1 \neq x_2$$

Η τιμή της μεταβλητής U υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.7) :

$$U = \frac{|x_1 - x_2|}{\sqrt{(\delta(x_1))^2 + (\delta(x_2))^2}} \quad (4.7)$$

Σύμφωνα με το U- test:

- αν $U \leq 1.96$ οι δύο τιμές δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά σε βαθμό εμπιστοσύνης 95%. Τότε, ισχύει η μηδενική υπόθεση,

- αν $1.96 \leq U \leq 2.58$ δεν είναι σαφές αν οι δύο τιμές διαφέρουν στατιστικά σημαντικά,
- αν $U \geq 2.58$ τότε οι δύο τιμές διαφέρουν στατιστικά σημαντικά. (Σαλπαδήμος, 2020)

Στον Πίνακα 1.6 παρατίθενται τόσο η τιμή U όσο και η σχετική απόκλιση που προκύπτει για τα διαφορετικά επίπεδα ροής της αντλίας που μελετήθηκαν.

Μέτρηση	Ροή Αντλίας (sLpm)	Σχετική απόκλιση	Τιμή U
1	915.3	0.15%	0.04
2	844.1	0.39%	0.09
3	808.1	1.06%	0.21
4	644.3	0.20%	0.01
5	395.8	2.18%	0.11

Πίνακας 4.6: Έλεγχος σχετικής απόκλισης και τιμής U.

Τα αποτελέσματα σε κάθε περίπτωση είναι ικανοποιητικά. Η τιμή του U είναι μικρότερη της τιμής 1.96 σε κάθε περίπτωση. Επομένως τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις δεν διαφέρουν στατιστικά σημαντικά, σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Συμπερασματικά, τόσο από το κριτήριο της σχετικής απόκλισης όσο και από τον στατιστικό έλεγχο U, μπορεί να θεωρηθεί ότι το ροόμετρο της αντλίας υψηλής παροχής του ΤΕΡΠ-ΕΕΑΕ, λειτουργεί ικανοποιητικά, παρέχοντας αξιόπιστες τιμές για τον όγκο δειγματοληφθέντος αέρα. Η μέγιστη απόκλιση 3% που παρατηρήθηκε θα μπορούσε, σε μια συντηρητική προσέγγιση, να εισάγεται ως αβεβαιότητα τύπου B, στις μετρήσεις συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.

6. Επισκόπηση - Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται ανασκόπηση των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και διατυπώνονται σκέψεις και προτάσεις για μελλοντική επέκτασή τους. Βασικός στόχος της παρούσας ΔΕ ήταν η βαθμονόμηση της απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης με ανιχνευτή υπερκαθαρού Γερμανίου σχετικής απόδοσης 40%, η οποία είχε εγκατασταθεί πρόσφατα στο ΤΕΡΠ της ΕΕΑΕ. Η βαθμονόμηση αυτή έγινε τόσο με πειραματικές όσο και με υπολογιστικές μεθόδους χρησιμοποιώντας διάφορες γεωμετρίες.

Αρχικά έγινε λόγος για τα πεδία εφαρμογής των άρθρων 35 και 36 της συνθήκης Ευρατόμ, για μετρήσεις που αφορούν την ραδιενέργεια στο περιβάλλον και συγκεκριμένα μετρήσεις ραδιονουκλιδίων στο ατμοσφαιρικό αερόλυμα.

Στη συνέχεια της ΔΕ, περιεγράφηκε η πειραματική βαθμονόμηση της ανιχνευτικής διάταξης για τις πρότυπες πηγές όγκου 260 mL και πυκνότητας 0.9 gr/cm^3 και φίλτρου με ενεργό διάμετρο 45 mm. Για την υπολογιστική βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές προσομοίωσης Monte-Carlo και πιο συγκεκριμένα ο κώδικας PENELOPE. Με τη χρήση του κώδικα αυτού προσδιορίστηκαν τα ακριβή χαρακτηριστικά του ανιχνευτή για την εκάστοτε γεωμετρία. Επιπλέον, στην παρούσα ΔΕ έγινε και ο προσδιορισμός των νεκρών ζωνών του ανιχνευτή. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν τόσο από τις πειραματικές όσο και από τις υπολογιστικές μεθόδους, για τον προσδιορισμό της απόδοσης φωτοκορυφής, συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Αναφορικά με τη πρότυπη πηγή όγκου, σημειώνεται ότι οι υπολογιστικές αποδόσεις για διάφορες ενέργειες αποκλίνουν σε ποσοστό μικρότερο από 7% από τις αντίστοιχες πειραματικές. Αντίστοιχα, για την πρότυπη πηγή φίλτρου, σημειώνεται ότι οι υπολογιστικές αποδόσεις αποκλίνουν σε ποσοστό μικρότερο του 2% από τις αντίστοιχες πειραματικές. Οι αποκλίσεις αυτές κρίθηκαν ικανοποιητικές.

Για την επικύρωση της βαθμονόμησης μετρήθηκε δείγμα φίλτρου από άσκηση διασύγκρισης στην οποία συμμετείχε το ΤΕΡΠ. Πρόκειται για την άσκηση διασύγκρισης ALMERA του 2021 και το ισότοπο που εξετάστηκε ήταν το Cs-137. Πρόκειται για ισότοπο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος κυρίως σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Στα πλαίσια αυτής της επικύρωσης, με τη χρήση του κώδικα PENELOPE, προσομοιώθηκε η γεωμετρία ανιχνευτή – φίλτρου διασύγκρισης, κρατώντας τις διαστάσεις των νεκρών ζωνών, που προέκυψαν ύστερα από την βαθμονόμηση της πρότυπης πηγής φίλτρου, σταθερές. Το αποτέλεσμα δε διέφερε στατιστικά σημαντικά από την τιμή αναφοράς ενώ η τιμή που προέκυψε από την προσομοίωση απέκλινε από την τιμή αναφοράς σε ποσοστό της τάξης του 5%. Με τον τρόπο αυτό επικυρώθηκε η ορθότητα των μεθόδων που εφαρμόστηκαν στην παρούσα ΔΕ.

Στη συνέχεια διενεργήθηκαν προσομοιώσεις για τον υπολογισμό της απόδοσης φωτοκορυφής φίλτρων ινών γυαλιού, τα οποία χρησιμοποιεί το ΤΕΡΠ για την παρακολούθηση των επιπέδων της ραδιενέργειας στον ατμοσφαιρικό αέρα. Στις προσομοιώσεις αυτές, οι διαστάσεις των νεκρών ζωνών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ίδιες με τις διαστάσεις που προέκυψαν από την πρότυπη πηγή φίλτρου. Προτάθηκε νέα γεωμετρία η οποία προκύπτει

ύστερα από αναδίπλωση του ήδη υπάρχοντος φίλτρου και τον σχηματισμό γεωμετρίας τεταρτοκυκλίου. Στόχος αυτής της διαδικασίας ήταν η βελτιστοποίηση της απόδοσης φωτοκορυφής. Από τα αποτελέσματα προκύπτει βελτίωση της απόδοσης για την ανίχνευση φωτονίων σε όλες τις ενέργειες της τάξης του 30% και άνω.

Παράλληλα, μετρήθηκαν δείγματα χρησιμοποιώντας τη νέα γεωμετρία για τον προσδιορισμό του ισότοπου Be-7 στην ατμόσφαιρα σε χρονική περίοδο 4 μηνών (Δεκέμβριου 2021- Απριλίου 2022). Οι συγκεντρώσεις του Be-7 που προέκυψαν ύστερα από ανάλυση φασμάτων η συγκέντρωση του Be-7 κατά το χρονικό διάστημα αυτό κυμαίνεται από 3-6.5 mBq/m³. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία οι συγκεντρώσεις του Be-7 στην ατμόσφαιρα κυμαίνονται μεταξύ 1-14mBq/m³. Πιο αυξημένες συγκεντρώσεις παρατηρούνται κυρίως το καλοκαίρι ή σε περιόδους με έντονη βροχόπτωση.

Στο τέλος της ΔΕ, πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση της αντλίας παροχής μεγάλου όγκου, η οποία είναι εγκατεστημένη στην ΕΕΑΕ και στην οποία τοποθετούνται τα φίλτρα που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις. Στόχος της βαθμονόμησης αυτής ήταν η εξακρίβωση της σωστής λειτουργίας της αντλίας. Χρησιμοποιήθηκαν πληροφορίες που αφορούν τη ροή αέρα που διαπερνά την αντλία, οι οποίες λαμβάνονται τόσο από την ίδια την αντλία όσο και από τον βαθμονομητή. Διενεργήθηκε στατιστικός έλεγχος U- test για τη σύγκριση των τιμών και υπολογίστηκε η σχετική η απόκλιση μεταξύ της τιμής της ροής της αντλίας και τις μέσης τιμής της ροής του βαθμονομητή. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η μέγιστη σχετική απόκλιση είναι της τάξης του 2.2%, ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις η σχετική απόκλιση δεν ξεπερνά την τιμή του 1% και η τιμή της U είναι κατά πολύ μικρότερη της τιμής 1.96 και συγκεκριμένα κυμαίνεται από 0.01- 0.021.

Η παρούσα ΔΕ θα μπορούσε να επεκταθεί αξιοποιώντας διαφορετικά λογισμικά (λ.χ. MCNP, ETNA, EFFTRAN) για τον προσδιορισμό της απόδοσης φωτοκορυφής και σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Περαιτέρω μια επιπλέον προέκταση αφορά τη χρήση της μεθόδου της μεταφοράς της απόδοσης για τον προσδιορισμό της απόδοσης φωτοκορυφής για όλες τις γεωμετρίες δειγμάτων που αναλύονται στο ΤΕΡΠ. Για τη διαδικασία αυτή προτείνονται οι κώδικες μεταφοράς της απόδοσης ANGLE, EFFTRAN, ETNA, GESPECOR. Τέλος, μια επιπλέον εργασία αφορά τη τυποποίηση και την ένταξη της διαδικασίας της Βαθμονόμησης της αντλίας στο εφαρμοζόμενο σύστημα ποιότητας του ΤΕΡΠ.

7. Βιβλιογραφία

- [1] (2000/473/Ευρατόμ). (2000). *Σύσταση της Επιτροπής (8.6.2000) περι εφαρμογής του άρθρου 36 της Συνθήκης Ευρατόμ σχετικά με την παρακολούθηση των επιπέδων ραδιενέργειας στο περιβάλλον με στόχο την αξιολόγηση της έκθεσης του γενικού πληθυσμού*. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης.
- [2] Azahra, M., A. Camacho-Garcia, C. Gonzalez-Gomez, J.J. Lopez-Penalver, T. El Bardouni (2003). *Seasonal Be-7 concentrations in near-surface air of Granada (Spain) in the period 1993-2001*, Applied Radiation and Isotopes 59 (2003) 159–164.
- [3] Azahra, M., (2004). *The seasonal variations of Be-7 and Pb-210 concentrations in air*, Radiation Physics and Chemistry 71 (2004) 789–790.
- [4] Bochud, F. (2006). *Simple Monte-Carlo method to calibrate well-type HPGe detectors*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.
- [5] D.L. Aderson. (2004). *Handbook of Prompt Gamma Activation Analysis*, Kluwer Academic Publishers, America.
- [6] EL-Hussein, A. (2001). *Diurnal and seasonal variation of short-lived radon progeny concentration and atmospheric temporal variations of Pb-210 and Be-7 Egypt*, Atmospheric Environment 35 (2001) 4305–4313.
- [7] Ewa, I. (2001). *Monte Carlo determination of full energy peak efficiency for a HPGe detector*, Applied Radiation and Isotopes: Including Data, Instrumentation and Methods for Use in Agriculture, Industry and Medicine, (55(1): 103-8).
- [8] Gilmore, G. R. (1995). *Practical Gamma-ray Spectrometry*, Wiley, Second Edition.
- [9] Huy, N. (2010). The influence of dead layer thickness increase on efficiency decrease for a coaxial HPGe p-type detector, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, (Volume 621, Issues 1–3, 1–21 September 2010, Pages 390-394).
- [10] IAEA. (2021). *The ALMERA NETWORK*. Ανάκτηση από IAEA.org: <https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Pages/ALMERA.aspx>
- [11] Ioannidou, A. M. Manolopoulou, C. Papastefanou (2005). *Temporal changes of Be-7 and Pb-210 concentrations in surface air at temperate latitudes*, Applied Radiation and Isotopes 63 (2005) 277–284,.
- [12] Reguigui, N. (2006). *Gamma Ray Spectrometry*. ResearchGate.
- [13] Treaty establishing the European Atomic Energy Community (Euratom). (2007, October 19).
- [14] Vidmar, T. (1999). *Precise modeling of a coaxial HPGe detector*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, (Volume 438, Issues 2-3, Pages 421-428).

- [15] Βασιλοπούλου, Θ. (2008). *Προσδιορισμός συντελεστών διόρθωσης απόδοσης ανιχνευτή HPGe λόγω του φαινομένου πραγματικής σύμπτωσης, μέσω προσομοίωσης Monte-Carlo*. Αθήνα, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, ΕΜΠ.
- [16] ΕΕΑΕ. (2019, Δεκέμβριος). Ανάκτηση από www.eeae.gr:
https://eeae.gr/files/anakoynoseis/reports/art_35_technical_report_gr_19-04.pdf
- [17] ΕΕΑΕ. (n.d.). *Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας*. Ανάκτηση από
<https://eeae.gr/%CF%85%CF%80%CE%B7%CF%81%CE%B5%CF%83%CE%AF%CE%B5%CF%82/%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%AE%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82-%CF%81%CE%B1%CE%B4%CE%BF%CE%BD%CE%AF%CE%BF%CF%85/%CF%80%CF%89%CF%82-%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%AC%CE%BC%CE%B5-%CF%84%CE%B9%CF%82>
- [18] Ιωαννίδου, Α. (1994). *Βηρύλλιο-7: Ένα Κοσμογενετικό Ραδιονουκλίδιο στη Χαμηλή ατμόσφαιρα, Διδακτορική διατριβή, ΑΠΘ*.
- [19] Κεκκάτος, Δ. (2014). *Διερεύνηση της επίδρασης της γεωμετρίας δέσμης κατά τον πειραματικό προσδιορισμό του ολικού γραμμικού συντελεστή εξασθένησης μ φωτονίων πολύ χαμηλών ενεργειών*. Αθήνα, Διπλωματική Εργασία.
- [20] Παναγιώτου, Β. (2014). *Εκτίμηση Αβεβαιότητας νέας μεθόδου προσδιορισμού οριακών προσμίξεων Πετρελαίου Ντήζελ σε Βενζίνη*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [21] Παπαδιονυσίου, Μ. (2015). *Μελέτη της απόκρισης ανιχνευτή Γερμανίου πειραματικά και με τεχνικές προσομοίωσης Monte-Carlo*. Αθήνα, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ.
- [22] Παπανδρέου, Σ. (2009). *Προσδιορισμός του ισοτοπού κοσμικής προέλευσης Be-7 στο ατμοσφαιρικό αεροζόλ, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ*.
- [23] Σαλπαδήμος, Ν. (2020). *Βαθμονόμηση απόδοσης του ανιχνευτή υπερκαθαρού Γερμανιού του Τμήματος Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας*. Αθήνα, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΚΠΑ.

Παράρτημα 1 : Πιστοποιητικό και διαστάσεις του ανιχνευτή.

CANBERRA

DETECTOR SPECIFICATION AND PERFORMANCE DATA CERTIFICATE OF CONFORMITY

Specifications

Detector Model GX4018 Serial number b 21207
 Cryostat Model 7500SL Order number GOR7033
 Preamplifier Model iPA-SL

The purchase specifications and therefore the warranted performance of this detector are as follows :

Nominal volume _____ cc Relative efficiency 40 %
 Resolution 1.8 keV (FWHM) at 1.33 MeV
 _____ keV (FWTM) at 1.33 MeV
.875 keV (FWHM) at 122 keV
 _____ keV (FWTM) at _____

Peak/Compton 62:1 Cryostat well diameter _____ Well depth _____ mm

Cryostat description or Drawing Number if special 7500SL

Physical Characteristics

Geometry Coaxial one open end, closed end facing window
 Diameter 60.5 mm Active volume _____ cc
 Length 62.3 mm Crystal well depth _____ mm
 Distance from window (outside) 6 mm Crystal well diameter _____ mm

Electrical Characteristics

Depletion voltage (+)3000 Vdc
 Recommended bias voltage Vdc (+)3500 Vdc
 Leakage current at recommended bias 0.01 nA
 Preamplifier test point voltage at recommended voltage -1.6 Vdc
 Preamplifier output polarity Neg

Resolution and Efficiency

With amp time constant of 4 μ s - 7.2 μ s Rise Time , 0.8 μ s Flat Top

Isotope	⁵⁷ Co	⁶⁰ Co			
Energy (keV)	122	1332			
FWHM (keV)	.858	1.73			
FWTM (keV)		3.15			
Peak/Compton		74.1:1			
Rel. Efficiency		45.5%			

Cooldown Time 8h

Coldtip setpoint (if CP5 config) : _____ °C

- Tests are performed following IEEE standard test ANSI/IEEE std325-1996
- Standard Canberra electronics used - See Germanium detector manual Section 7

Tested by : _____ Date :30/03/2021

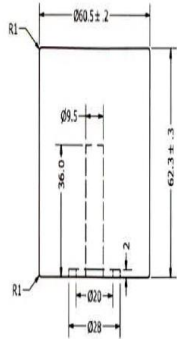


Approved by : _____ Date :30/03/2021

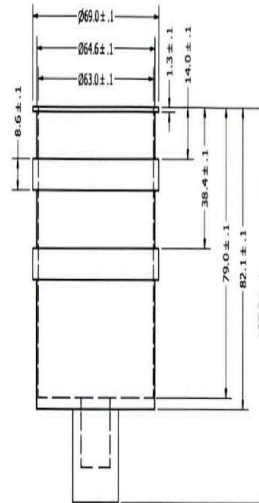


PROPERTY OF CANBERRA SEMICONDUCTOR NV.
 COMPANY CONFIDENTIAL MATERIAL.
 UNAUTHORIZED DUPLICATION OF ANY OR ALL OF THE
 MATERIAL CONTAINED HEREIN IS STRICTLY PROHIBITED.

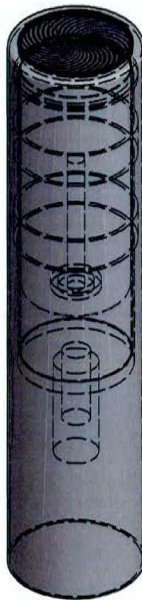
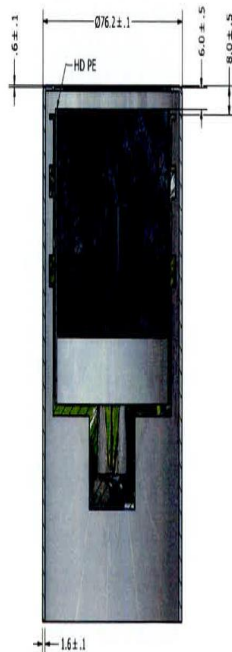
CRYSTAL



HOLDER



ASSEMBLY



S/N: 21207

Front Dead Layer: 0.4 μm
 Outer Electrode Thickness: 0.6 mm
 Inner Electrode Thickness: 0.3 μm eq. Ge

Ge front to center endcap outside: 6.0 mm
 Window Material: Carbon Epoxy
 Endcap Material: Al
 Holder Material: Al

Milion Technologies (Canberra Olen) NV		Title	
Lambricqse-Over 25 2550 Den Belgium Tel: 32-11-422-895		MCNP - DATA	
Drawn	m/verheydt	6/03/2015	Calculated Weight:
Checked			Part
Approved			Sheet 1
Scale			Revision
EAO Item:		CAGE Code	24114 A2
		Drawn/Number	OLE0014776 1
		Sheet	1
		Revision	C
EAO Item: C:\Workspace\Vault\Documents\Germanium Orders\go7033\OLE014776.dwg, V15			

Παράρτημα 2: Αρχεία εισόδου και εξόδου του κώδικα PENELOPE.

Αρχείο εισόδου τύπου .in για Cs-137 για τη νέα γεωμετρία φίλτρου:

```
TITLE  DETECTOR A WITH POINT SOURCE - INCIDENT ENERGY = 100 keV
.
>>>>>>> Source definition.
SKPAR  0          [Primary particles: 1=electron, 2=photon, 3=positron]
SRNUCL  Cs137.nuc          [NUCLEIDE data file]
SPOSIT  0 0 0.37          [Coordinates of the source]
SBOX    3.9 5.5154 0.24    [Source box dimensions]
SBODY   29          [Active source body; one line for each body]
SCONE   0 0 180          [Beam direction: THETA,PHI in deg]
.
>>>>>>> Material data and simulation parameters.
MFNAME  Ge.mat
MSIMPA  1.0e3 1.0e3 1.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3    [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME  Cu.mat
MSIMPA  1.0e3 1.0e3 1.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3    [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME  Al.mat
MSIMPA  1.0e3 1.0e3 1.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3    [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME  C.mat
MSIMPA  1.0e3 1.0e3 1.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3    [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME  Polprop.mat
MSIMPA  1.0e3 1.0e3 1.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3    [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME  Cd.mat
MSIMPA  1.0e3 1.0e3 1.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3    [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME  Pb.mat
MSIMPA  1.0e3 1.0e3 1.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3    [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME  epoxy_0.9.mat
MSIMPA  1.0e3 1.0e3 1.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3    [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
MFNAME  fiberglass.mat
MSIMPA  1.0e3 1.0e3 1.0e4 0.1 0.1 1e4 1e3    [EABS(1:3),C1,C2,WCC,WCR]
.
>>>>>>> Geometry definition file.
GEOMFN  dias.geo          [Geometry file name, 18 characters]
.
>>>>>>> Energy deposition detectors (up to 25).
ENDETC  1e3 6.65E5 1000    [Energy window and number of channels]
EDBODY  28          [Active body; one line for each body]
.
>>>>>>> Job properties.
RESUME  dump.dat          [Resume from this dump file, 20 chars]
DUMPTO  dump.dat          [Generate this dump file, 20 chars]
DUMPP   60          [Dumping period, in sec]
.
NSIMSH  1.2e06          [Desired number of showers, max=2**31-1]
TIME    50000000        [Allotted simulation time, in sec]
END      [Ends the reading of input data]
```


Παράρτημα 3: Πιστοποιητικά πρότυπων πηγών.

Πρότυπη πηγή όγκου:

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux

Akkreditiert durch die / accredited by the
Akkreditierungsstelle des DKD bei der
PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)

Isotope Products Laboratories
DBA Isotope Products Laboratories
24937 Avenue Tibbitts
Valencia, CA 91355

Eckert & Ziegler
Isotope Products
Valencia, California 91355
Tel 661-309-1010

ISOTOPE: Multinuclide
ACTIVITY: 1.45 µCi
ACTIVITY: 53.7 kBq
REF DATE: 1 Mar 07
SOURCE #: 1232-29-4



NOT FOR DRUG USE



DKD-K-36901

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

000485
DKD-K-36901
07-03

Gegenstand Object	Multiple gamma ray emitting large volume source
Hersteller Manufacturer	Eckert & Ziegler Isotope Products
Typ Type	EG-ML
Fabrikat/Serien-Nr. Serial number	1232-29-4
Auftraggeber Customer	Eckert & Ziegler/Isotope Prod. Europe Robert-Rossle-Str. 10 Berlin, 13125 Germany
Auftragsnummer Order No.	110788
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines Number of pages of the certificate	3
Datum der Kalibrierung Date of calibration	1 Mar 07

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem internationalen Einheitensystem (SI).
Der DKD ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine.
Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.
This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).
The DKD is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.
The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel Seal	Datum Date	Leiter des Kalibrierlaboratoriums Head of the calibration laboratory	Stellvertreter Deputy	Bearbeiter Person in charge
	15 Mar 07	 Dr. Van Dalsem	 Catterson	Catterson / Dey / Millford Van Dalsem

24937 Avenue Tibbitts
Valencia, CA 91355

Tel: +1-661-309-1010 Fax: +1-661-257-8303
www.isotopeproducts.com

1800 North Keystone Street
Burbank, CA 91504

- **Object Calibrated:**

Customer supplied 260mL container

Nature of Active Deposit: Multinuclide distributed in 0.9 ± 0.1 g/cc epoxy matrix
 Active Volume: Approximately 260mL (232.8 ± 0.2 grams)
 Backing: Plastic
 Cover: Plastic

- **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using an efficiency curve to determine the concentration of each nuclide according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The germanium spectrometer's efficiency curve was generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

- **Place of Calibration:**

Eckert & Ziegler Isotope Products
 DBA Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355
 USA

- **Measurement Conditions:**

The source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches according to Eckert & Ziegler Isotope Products procedure PM8-10, Revision B "Large Volume Gamma Standards - Epoxies, Low Density Using Microbubbles". When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

- **Environmental Conditions:**

Temperature: (22 ± 2) °C
 Relative humidity: (40 ± 5) %

- **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	12.3 kBq (0.332 μ Ci)	514.1	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.23 kBq (0.0332 μ Ci)	442.8	3.6%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	17.3 kBq (0.468 μ Ci)	628.0	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.648 kBq (0.0175 μ Ci)	554.7	2.9%
166	Ce-139	137.640 ± 0.023 days	79.9	0.809 kBq (0.0219 μ Ci)	646.4	2.9%
279	Hg-203	46.595 ± 0.013 days	81.5	2.45 kBq (0.0662 μ Ci)	1997	2.9%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.9	2.93 kBq (0.0792 μ Ci)	1902	2.9%
514	Str-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	3.92 kBq (0.106 μ Ci)	3857	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	2.60 kBq (0.0703 μ Ci)	2213	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	6.25 kBq (0.169 μ Ci)	5875	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	3.25 kBq (0.0878 μ Ci)	3245	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	3.25 kBq (0.0878 μ Ci)	3249	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.4	6.25 kBq (0.169 μ Ci)	6213	2.9%
Total:				53.7 kBq (1.45 μ Ci)		

See **Additional Information** section for a detailed explanation of Pb-210 total uncertainty value.

000485

DKD-K-
36901

07-03

- **Uncertainty of Measurement:**


The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.


15 Mar 07
Matthew Dey, Spectroscopist

- **Additional Information:**

- This is an original calibration certificate.
- This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI test number: none).
- Eckert & Ziegler Isotope Products' reference number: 1232-29.
- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.
- The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST.
- This document uses the numerical convention where $1.000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.
- The source has a recommended working life of 1 year.
- Eckert & Ziegler Isotope Products participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (as in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).
- The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

Πρότυπη πηγή φίλτρου:

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD** FL#2

Kalibrierlaboratorium für Radioaktivität
Calibration laboratory for activity, specific activity, photon flux and particle flux

Akkreditiert durch die / accredited by the

Akkreditierungsstelle des DKD bei der

PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)



Isotope Products Laboratories
24937 Avenue Tibbitts
Valencia, CA 91355

Deutscher
Akkreditierungs-
Rat
DAK
DKD-K-36901

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

000045
DKD-K-36901
04-04

Gegenstand
Object
Multiple gamma ray emitting large area source

Hersteller
Manufacturer
Isotope Products Laboratories

Typ
Type
EAB-ML

Fabrikat/Serien-Nr.
Serial number
B6-914

Auftraggeber
Customer
**Isotope Products Europe, Blaseg GmbH
Am Schlossberg 38
Waldburg, D-88289 Germany**

Auftragsnummer
Order No
86078

Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines
Number of pages of the certificate
3

Datum der Kalibrierung
Date of calibration
15 Apr 04

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).

Der DKD ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine.

Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.




This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DKD is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.

The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Stempel Seal	Datum Date	Leiter des Kalibrierlaboratoriums Head of the calibration laboratory	Stellvertreter Deputy	Bearbeiter Person in charge
	12 Apr 04	 Dr. Van Dalsem	Catterson	 Catterson / Dey / Milford Van Dalsem
Isotope Products Laboratories 24937 Avenue Tibbitts Valencia, CA 91355	Tel: (661) 309-1010 Fax: (661) 257-8303 www.isotopeproducts.com	Isotope Products Laboratories 1800 North Keystone Street Burbank, CA 91504		

000045

DKD-K-
36901

04-04

- **Object Calibrated:**

Multiple gamma ray emitting large area source (50.8 mm outer diameter x 3.2 mm thick)

Nature of Active Deposit: Evaporated metallic salts
 Active Diameter: 45 mm
 Backing: Filter paper
 Cover: 0.9 mg/cm² aluminized Mylar

- **Calibration Procedure:**

Master nuclide batches were calibrated using one or more efficiency curves to determine the concentration of each nuclide according to Isotope Products Laboratories procedure LP05-24, Revision B "Operating Procedure for Calibration of Multiline Sources". The aforementioned efficiency curves were generated using standards traceable to a national metrology laboratory. The energies and branching ratios for the gamma rays used are listed in the Measurement Results section.

- **Place of Calibration:**

Isotope Products Laboratories
 24937 Avenue Tibbitts
 Valencia, CA 91355
 USA

- **Measurement Conditions:**

This source was manufactured using gravimetric aliquots from previously calibrated master nuclide batches. When applicable, decay corrections were performed using the half life values listed in the Measurement Results section.

- **Environmental Conditions:**

Temperature: (25 ± 2) °C
 Relative humidity: (36 ± 5) %

- **Measurement Results:**

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity	Gammas per second	Total Uncert.
47	Pb-210	22.3 ± 0.2 years	4.18	12.5 kBq (0.338 µCi)	523.3	11.4%
60	Am-241	432.17 ± 0.66 years	36.0	1.39 kBq (0.0376 µCi)	500.8	3.7%
88	Cd-109	462.6 ± 0.7 days	3.63	11.4 kBq (0.308 µCi)	413.5	3.1%
122	Co-57	271.79 ± 0.09 days	85.6	0.408 kBq (0.0110 µCi)	349.6	3.0%
159	Te-123m	119.7 ± 0.1 days	84.0	0.534 kBq (0.0144 µCi)	448.1	2.9%
320	Cr-51	27.706 ± 0.007 days	9.86	13.9 kBq (0.375 µCi)	1367	3.0%
392	Sn-113	115.09 ± 0.04 days	64.89	2.06 kBq (0.0557 µCi)	1337	2.9%
514	Sr-85	64.849 ± 0.004 days	98.4	2.55 kBq (0.0690 µCi)	2511	3.0%
662	Cs-137	30.17 ± 0.16 years	85.1	1.74 kBq (0.0471 µCi)	1482	2.9%
898	Y-88	106.630 ± 0.025 days	94.0	4.11 kBq (0.111 µCi)	3861	2.9%
1173	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.86	2.21 kBq (0.0598 µCi)	2210	2.9%
1333	Co-60	5.272 ± 0.001 years	99.98	2.21 kBq (0.0598 µCi)	2213	2.9%
1836	Y-88	106.630 ± 0.025 days	99.36	4.11 kBq (0.111 µCi)	4081	2.9%
	Total:			52.8 kBq (1.43 µCi)		

See **Additional Information** section for a detailed explanation of Pb-210 total uncertainty value.

000045

DKD-K-
36901

04-04

- **Uncertainty of Measurement:**

The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DKD-3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

- **Radioimpurities:**

This source contains trace level radioimpurities, all of which have been determined not to adversely affect the source's intended usage.

- **Leak Test Results:**

The source was wiped over its entire surface with a moistened filter paper disk. After drying, the disk was checked for activity using both a beta-gamma plastic scintillation counter and a ZnS alpha scintillation counter. Measured removable activity levels were <37 Bq (1 nCi) beta-gamma and <3.7 Bq (0.1 nCi) alpha.

- **Additional Information:**

-This is an original calibration certificate.

-This is not a registered sealed source (Registration number: none, ANSI test number: none).

-Isotope Products Laboratories' reference number: 1058-13.

-Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991, for all nuclides except Pb-210. The larger than expected total uncertainty for the Pb-210 contained activity was due to the uncertainty in its gamma-ray branching ratio, $(4.18 \pm 0.23)\%$, taken from NCRP Report No. 58, 1985. Without the gamma-ray branching ratio uncertainty included, the total uncertainty for the Pb-210 contained activity was 2.9% at $k=2$.

-The date of calibration is referenced to 12:00 p.m. PST.

-This document uses the numerical convention where $1.000 = 1$ and $1,000 = 10^3$.

-The source has a recommended working life of 1 year.

-Isotope Products Laboratories participates in a National Institute of Standards and Technology (United States national metrology laboratory) measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later National Institute of Standards and Technology certification) of Standard Reference Materials (As in Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 4.15).

-The Deutscher Kalibrierdienst is on the signatories to the Multilateral Agreement of the European co-operation for Accreditation (EA) and the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of the calibration certificates. The other signatories at present are the accreditation bodies in Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Ireland, Italy, the Netherlands, Norway, Portugal, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom. Corresponding agreements have been concluded with the accreditation bodies of Australia, Brazil, Canada, China, India, Japan, New Zealand, Singapore, South Africa, Taiwan, the United States of America and Vietnam.

m	8	335-	358	353.90	87.27	1.21	2.381E+02	30.39	8.824E+02
	9	369-	383	375.70	92.67	1.04	5.354E+02	59.43	1.040E+03
	10	746-	759	751.43	185.75	0.98	3.062E+02	53.46	9.198E+02
	11	958-	970	965.15	238.70	0.97	9.649E+02	54.22	7.521E+02
	12	1113-	1124	1120.44	277.17	0.83	6.039E+01	37.86	5.486E+02
	13	1322-	1331	1326.46	328.21	0.35	5.621E+01	28.40	3.318E+02
	14	1387-	1394	1390.85	344.16	0.70	3.156E+01	23.31	2.534E+02
	15	1415-	1431	1422.44	351.99	1.07	2.288E+02	43.12	5.202E+02
	16	1921-	1939	1930.30	477.81	1.19	4.035E+03	72.24	3.508E+02
	17	2053-	2075	2064.78	511.12	2.21	1.428E+03	59.10	5.332E+02
	18	2351-	2366	2356.62	583.42	1.33	3.563E+02	30.98	1.977E+02
	19	2455-	2473	2462.09	609.55	1.33	2.252E+02	33.16	2.558E+02
	20	3582-	3592	3587.68	888.41	0.52	1.875E+01	13.99	7.425E+01
	21	3671-	3691	3681.49	911.64	1.90	1.319E+02	23.81	1.181E+02
	22	3909-	3922	3915.10	969.52	0.78	4.937E+01	17.56	9.363E+01
	23	4039-	4051	4044.64	1001.61	1.32	4.871E+01	16.44	8.329E+01
	24	4518-	4533	4524.79	1120.56	1.09	3.793E+01	18.75	1.041E+02
	25	5887-	5912	5900.56	1461.40	1.77	3.996E+02	26.75	7.435E+01
	26	7119-	7135	7127.61	1765.39	0.52	6.453E+01	14.07	4.247E+01
	27	7417-	7430	7423.45	1838.68	0.27	5.607E+00	10.31	3.639E+01

M = First peak in a multiplet region
m = Other peak in a multiplet region
F = Fitted singlet

Errors quoted at 1.000 sigma
Interference Corrected Activity Report 20/9/2022 1:14:23 PM Page 3

NUCLIDE IDENTIFICATION REPORT

Sample Title: FL00109
Nuclide Library Used: C:\GENIE2K\CAMFILES\STDLIB.NLB

IDENTIFIED NUCLIDES

Nuclide Name	Id Confidence	Energy (keV)	Yield (%)	Activity (Bq /M3)	Activity Uncertainty
BE-7	0.990	477.59*	10.42	3.569201E-03	1.943441E-04
K-40	0.976	1460.81*	10.67	4.392163E-04	4.050389E-05
SC-46	0.972	889.25*	99.98	2.369509E-06	1.815805E-06
		1120.51*	99.99	6.088766E-06	3.135063E-06
CD-109	0.959	88.03*	3.72	8.017072E-05	1.230257E-05
PB-210	1.000	46.54*	4.25	6.791338E-04	6.092173E-05
BI-211	0.404	72.87*	1.20	2.153872E-04	3.214568E-05
		351.10*	12.20	5.241478E-05	1.100711E-05
		404.80	4.10		
		426.90	1.90		
		831.80	3.30		
PB-212	0.895	74.81*	9.60	7.156761E-05	6.070282E-06
		77.11*	17.50	2.382280E-05	2.563880E-06
		87.20*	6.30	4.273738E-05	6.416478E-06
		89.80	1.75		
		115.19	0.60		
		238.63*	44.60	4.231851E-05	3.450114E-06
		300.09	3.41		
BI-214	0.553	609.31*	46.30	2.348732E-05	3.974689E-06
		768.36	5.04		
		806.17	1.23		
		934.06	3.21		

		1120.29*	15.10	2.280546E-05	1.174237E-05
		1155.19	1.69		
		1238.11	5.94		
		1280.96	1.47		
		1377.67	4.11		
		1385.31	0.78		
		1401.50	1.39		
		1407.98	2.48		
		1509.19	2.19		
		1661.28	1.15		
		1729.60	3.05		
		1764.49*	15.80	5.598201E-05	1.340713E-05
		1847.44	2.12		
		2118.54	1.21		
PA-234M	0.522	766.36	0.29		
		1001.03*	0.84	4.710102E-04	1.687797E-04
U-235	0.490	89.96	1.50		
		93.35*	2.50	2.425595E-04	3.245004E-05
		105.00	1.00		

Interference Corrected Activity Report 20/9/2022 1:14:23 PM Page 4

Nuclide Name	Id Confidence	Energy (keV)	Yield (%)	Activity (Bq /M3)	Activity Uncertainty
U-235	0.490	109.14	1.50		
		143.76	10.50		
		163.35	4.70		
		185.71*	54.00	9.023774E-06	1.780674E-06
		202.12	1.00		
		205.31	4.70		

* = Energy line found in the spectrum.
 @ = Energy line not used for Weighted Mean Activity
 Energy Tolerance : 1.500 keV
 Nuclide confidence index threshold = 0.30
 Errors quoted at 1.000 sigma

Interference Corrected Activity Report 20/9/2022 1:14:23 PM Page 5

 ***** I N T E R F E R E N C E C O R R E C T E D R E P O R T *****

Nuclide Name	Nuclide Id Confidence	Wt mean Activity (Bq /M3)	Wt mean Activity Uncertainty
BE-7	0.990	3.5692006E-03	1.9434412E-04
K-40	0.976	4.3921626E-04	4.0503892E-05
SC-46	0.972	1.5998435E-06	1.5726286E-06
CD-109	0.959	1.2796547E-05	1.0897185E-05
PB-210	1.000	6.7913379E-04	6.0921730E-05
BI-211	0.404	7.1176780E-05	1.0861643E-05
PB-212	0.895	3.5915800E-05	2.3859178E-06
BI-214	0.553	2.5173652E-05	3.7827532E-06
X PB-214	0.494		
X RA-226	0.985		
PA-234M	0.522	4.7101020E-04	1.6877968E-04
U-235	0.490	9.8246619E-06	1.7963502E-06

? = Nuclide is part of an undetermined solution
 X = Nuclide rejected by the interference analysis
 @ = Nuclide contains energy lines not used in Weighted Mean Activity

Errors quoted at 1.000 sigma

Interference Corrected Activity Report 20/9/2022 1:14:23 PM Page 6

***** UNIDENTIFIED PEAKS *****

Peak Locate Performed on: 20/9/2022 1:14:22 PM
 Peak Locate From Channel: 1
 Peak Locate To Channel: 8192

Peak No.	Energy (keV)	Peak Size in Counts per Second	Peak CPS % Uncertainty	Peak Type	Tol. Nuclide
1	30.24	2.49549E-03	15.64		
3	63.36	2.58720E-03	25.66		
M 7	84.57	4.38003E-03	8.89	Tol.	TH-227 TH-231
12	277.17	6.98977E-04	62.68	Sum	
13	328.21	6.50602E-04	50.52	Tol.	LA-140 AC-228
14	344.16	3.65314E-04	73.87	Tol.	KR-89 EU-152
17	511.12	1.65258E-02	4.14		
18	583.42	4.12405E-03	8.69		
21	911.64	1.52616E-03	18.06	Tol.	AC-228
22	969.52	5.71460E-04	35.57	Tol.	SB-124 AC-228
27	1838.68	6.48975E-05	183.80	Sum	

M = First peak in a multiplet region
 m = Other peak in a multiplet region
 F = Fitted singlet

Errors quoted at 1.000 sigma

Nuclide MDA Report 20/9/2022 1:14:23 PM Page 7

 ***** N U C L I D E M D A R E P O R T *****

Detector Name: DIAS
 Sample Geometry: FILTER
 Sample Title: FL00109
 Nuclide Library Used: C:\GENIE2K\CAMFILES\STDLIB.NLB

	Nuclide Name	Energy (keV)	Yield (%)	Line MDA (Bq /M3)	Nuclide MDA (Bq /M3)	Activity (Bq /M3)
+	K-40	1460.81*	10.67	6.72392E-05	6.724E-05	4.39216E-04
+	SC-46	889.25*	99.98	5.87130E-06	5.871E-06	2.36951E-06
		1120.51*	99.99	9.78695E-06		6.08877E-06
	CO-57	122.06	85.51	3.54441E-06	3.544E-06	9.62980E-07
		136.48	10.60	3.06774E-05		2.19233E-07
	CO-60	1173.22	100.00	7.90434E-06	7.904E-06	3.88580E-06
		1332.49	100.00	7.91355E-06		1.88486E-06
	SE-75	96.73	3.41	9.43424E-05	6.852E-06	-4.83291E-06

		121.11	16.70	2.24605E-05		-3.62164E-06
		136.00	59.20	6.85170E-06		1.86763E-06
		198.60	1.45	3.59148E-04		1.71593E-05
		264.65	59.80	1.02348E-05		9.05534E-07
		279.53	25.20	2.51056E-05		-1.24410E-06
		303.91	1.32	5.16068E-04		3.70476E-04
		400.65	11.40	6.01494E-05		1.28581E-05
	KR-85	513.99	0.43	2.12895E-03	2.129E-03	-2.18002E-03
@	KR-85M	151.18	75.30	3.70000E+24	3.700E+24	3.70000E+24
@		304.87	14.00	3.70000E+24		3.70000E+24
	SR-85	513.99	99.27	1.90326E-05	1.903E-05	-1.94892E-05
	Y-88	898.02	93.40	1.09160E-05	1.092E-05	-5.27467E-07
		1836.01	99.38	1.38317E-05		4.77410E-06
+	CD-109	88.03*	3.72	4.74402E-05	4.744E-05	8.01707E-05
	SN-113	255.12	1.93	2.98471E-04	1.060E-05	2.72463E-06
		391.69	64.90	1.06024E-05		5.80387E-06
	CS-134	475.35	1.46	8.84148E-04	6.765E-06	-3.75279E-05
		563.23	8.38	6.74149E-05		-1.60134E-05
		569.32	15.43	3.68447E-05		9.42828E-06
		604.70	97.60	6.76540E-06		-2.40827E-06
		795.84	85.40	7.78105E-06		-2.30359E-06
		801.93	8.73	7.60066E-05		2.25064E-05
		1038.57	1.00	7.47731E-04		1.17393E-04
		1167.94	1.80	4.53495E-04		4.14240E-04
		1365.15	3.04	2.55311E-04		8.93154E-06
	CS-136	66.91	12.50	7.35474E-04	2.301E-04	-5.60998E-04
		86.29	6.30	1.51034E-03		-2.25304E-04
		153.22	7.46	1.42827E-03		-1.04229E-04
		163.89	4.61	2.37360E-03		-1.20689E-03
		176.55	13.56	8.52066E-04		3.80163E-04
		273.65	12.66	1.23775E-03		3.45452E-04
		340.57	48.50	3.45252E-04		2.06542E-05

Nuclide MDA Report

20/9/2022 1:14:23 PM Page 8

Nuclide Name	Energy (keV)	Yield (%)	Line MDA (Bq /M3)	Nuclide MDA (Bq /M3)	Activity (Bq /M3)	
CS-136	818.50	99.70	2.30149E-04	2.301E-04	-1.41882E-05	
	1048.07	79.60	3.25013E-04		-2.70975E-04	
	1235.34	19.70	1.55476E-03		1.87222E-03	
CS-137	661.65	85.12	6.63900E-06	6.639E-06	5.21087E-06	
@ CS-138	138.10	1.49	3.70000E+24	3.700E+24	3.70000E+24	
@	227.76	1.51	3.70000E+24		3.70000E+24	
@	408.98	4.66	3.70000E+24		3.70000E+24	
@	462.79	30.70	3.70000E+24		3.70000E+24	
@	546.94	10.80	3.70000E+24		3.70000E+24	
@	871.80	5.11	3.70000E+24		3.70000E+24	
@	1009.78	29.80	3.70000E+24		3.70000E+24	
@	1147.22	1.24	3.70000E+24		3.70000E+24	
@	1343.59	1.14	3.70000E+24		3.70000E+24	
@	1435.86	76.30	3.70000E+24		3.70000E+24	
CE-139	165.85	80.35	5.24915E-06	5.249E-06	-2.26717E-07	
HG-203	279.19	77.30	1.52871E-05	1.529E-05	8.07754E-06	
+	PB-210	46.54*	4.25	8.00602E-05	8.006E-05	6.79134E-04
+	BI-214	609.31*	46.30	1.04293E-05	1.043E-05	2.34873E-05
		768.36	5.04	1.25280E-04		1.03551E-04
		806.17	1.23	5.05753E-04		-5.51370E-05
		934.06	3.21	2.06980E-04		-1.76092E-04
		1120.29*	15.10	3.66570E-05		2.28055E-05
		1155.19	1.69	4.56177E-04		1.28436E-04
		1238.11	5.94	1.36955E-04		4.71738E-05
		1280.96	1.47	5.03577E-04		2.31886E-04

		1377.67	4.11	1.95132E-04		1.20291E-04
		1385.31	0.78	1.00408E-03		-5.19870E-04
		1401.50	1.39	5.53670E-04		-1.06950E-05
		1407.98	2.48	3.12418E-04		1.61798E-04
		1509.19	2.19	3.72011E-04		1.13260E-05
		1661.28	1.15	6.78920E-04		8.48785E-04
		1729.60	3.05	2.82805E-04		1.37267E-04
		1764.49*	15.80	3.53106E-05		5.59820E-05
		1847.44	2.12	3.69636E-04		-5.23642E-05
>		2118.54	1.21	0.00000E+00		0.00000E+00
	PB-214	74.81*	6.33	2.57708E-05	1.018E-05	1.08547E-04
		77.11*	10.70	1.46792E-05		3.89657E-05
		87.20*	3.70	4.30638E-05		7.27750E-05
		89.80	1.03	2.49636E-04		-2.06959E-05
		241.98	7.49	6.48161E-05		-1.24929E-04
		295.21	19.20	2.34500E-05		7.47911E-06
		351.92*	37.20	1.01833E-05		1.71912E-05
		785.91	1.10	5.64377E-04		1.47584E-04

+ = Nuclide identified during the nuclide identification

* = Energy line found in the spectrum

> = Calculated MDA is zero due to zero counts in the region, or the region is outside the spectrum, or has not been calculated

@ = Half-life too short to be able to perform the decay correction