

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ-ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΜΕ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ ΣΤΗ ΦΥΣΙΚΗ

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ
ΤΗΣ IN-SITU ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ- γ

ΘΕΜΕΛΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

A.ΜΗΤΡΩΟΥ: 7110112100210

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΜΕΡΤΖΙΜΕΚΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ:ΙΩΝ ΣΤΑΜΑΤΕΛΑΤΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΕΡΕΥΝΗΤΡΙΑ:ΘΕΟΔΩΡΑ ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΥ

ΑΘΗΝΑ

ΜΑΡΤΙΟΣ 2023

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το πρόβλημα του χαρακτηρισμού των ιστορικών ραδιενεργών καταλοίπων σε μια πυρηνική εγκατάσταση αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα που σχετίζεται με το σχέδιο αποξήλωσης της εγκατάστασης, την τελική διαχείριση των υλικών αυτών, καθώς και την ακτινοπροστασία των εργαζομένων, του πληθυσμού και του περιβάλλοντος. Ραδιενεργά αντικείμενα, καθώς και δοχεία που περιέχουν διάφορα ραδιενεργά υλικά, πρέπει να χαρακτηρισθούν ως προς τη συγκέντρωση των ραδιονουκλιδίων πριν από την τελική τους διάθεση σαν ραδιενεργά κατάλοιπα.

Οι καταστροφικές μέθοδοι χαρακτηρισμού των υλικών, αν και είναι οι πιο ακριβείς, έχουν υψηλό κόστος και σημαντικό βαθμό δυσκολίας συμπεριλαμβανομένης της ακτινοπροστασίας του προσωπικού καθώς προϋποθέτουν την αντιπροσωπευτική δειγματοληψία των αντικειμένων. Αντίθετα, η μέθοδος της in-situ φασματοσκοπίας-γ έχει αποδειχθεί ως αξιόπιστη και αποτελεσματική μέθοδος για το μη καταστροφικό ραδιολογικό χαρακτηρισμό των αντικειμένων αυτών.

Ωστόσο, η μη ομοιογενής σύσταση και τα διαφορετικά γεωμετρικά σχήματα των ραδιενεργών υλικών και αντικειμένων καθιστούν τον ποσοτικό χαρακτηρισμό τους ως ιδιαίτερα δύσκολο έργο.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται πειραματικές μελέτες in-situ φασματοσκοπίας-γ σε συνδυασμό με προσομοιώσεις Monte-Carlo για την ανάπτυξη μεθοδολογίας που έχει σαν σκοπό τον χαρακτηρισμό ραδιενεργών υλικών. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε στον χαρακτηρισμό και στη κατηγοριοποίηση ενός συνόλου ενεργοποιημένων ή ρυπασμένων αντικειμένων που βρίσκονται στη προσωρινή αποθήκη ραδιενεργών υλικών στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου του ερευνητικού πυρηνικού αντιδραστήρα του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. **Εισαγωγή** (σελ. 5 έως 7)
 - 1.1) Σκοπός

2. **Μέθοδος** (σελ. 8 έως 17)
 - 2.1) Πειραματικό Μέρος
 - 2.2) Θεωρητικό Μέρος

3. **Αποτελέσματα** (σελ. 18 έως 27)
 - 3.1) Βαθμονόμηση Ανιχνευτή
 - 3.2) Υπολογιστικά Αποτελέσματα MCNP
 - 3.3) Διορθωτικοί Παράγοντες
 - 3.4) Υπολογισμός Ενεργότητας
 - 3.5) Πειραματικά Αποτελέσματα

4. **Συζήτηση** (σελ. 28 έως 30)
 - 4.1) Μέθοδοι χαρακτηρισμού
 - 4.2) Συζήτηση αποτελεσμάτων

5. **Συμπεράσματα** (σελ. 31)

6. **Βιβλιογραφία** (σελ. 32)

7. **Παραρτήματα** (σελ. 33 έως 40)
 - 7.1) Κώδικας MCNP
 - 7.2) Φωτογραφίες Δειγμάτων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ραδιενεργά κατάλοιπα λόγω της επικινδυνότητάς τους για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, χρήζουν είτε άμεσης εγκεκριμένης διαχείρισης, είτε μακροπρόθεσμης και οργανωμένης εναπόθεσης σε εγκεκριμένες από την Πολιτεία για τον σκοπό αυτό ειδικές εγκαταστάσεις [1]. Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα, η τελική διαχείριση των ραδιενεργών καταλοίπων μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- a) με αποδέσμευση στο περιβάλλον, εφόσον πληρούνται τα θεσμοθετημένα επίπεδα αποδέσμευσης, όπως περιγράφεται στους Κανονισμούς Ακτινοπροστασίας (π.δ. 101/2018). Τα θεσμοθετημένα αυτά επίπεδα αποδέσμευσης έχουν τεθεί με κριτήριο, ώστε οποιοδήποτε άτομο του πληθυσμού να μην δέχεται δόση ακτινοβολίας πάνω από 10 μSv ανά έτος από την αποδέσμευση του συγκεκριμένου ραδιοϊσοτόπου στο περιβάλλον. Επισημαίνεται ότι το όριο δόσης για ένα άτομο του πληθυσμού από το σύνολο των πρακτικών ιονιζουσών ακτινοβολιών είναι 1000 μSv ανά έτος.
- b) με διάθεση (δηλαδή μόνιμη και οριστική εναπόθεση, χωρίς πρόθεση επανάκτησης) σε εγκεκριμένη εγκατάσταση εναπόθεσης ραδιενεργών καταλοίπων. Υπάρχουν διάφοροι τύποι εγκαταστάσεων εναπόθεσης ραδιενεργών αποβλήτων, όπως η εναπόθεση σε επιφανειακή εγκατάσταση μικρού βάθους (near surface disposal), η εναπόθεση σε γεώτρηση κάποιων δεκάδων μέτρων (bore hole), κλπ. Η επιλογή του τύπου της εγκατάστασης διάθεσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το είδος, η μορφή και η ποσότητα των ραδιενεργών καταλοίπων, η συσκευασία των ραδιενεργών αποβλήτων, οι υφιστάμενες και μελλοντικές περιβαλλοντικές συνθήκες (γεωλογικές, σεισμολογικές, υδρολογικές, κλπ), τα αναπτυξιακά σχέδια διαμόρφωσης περιοχών, οι υπάρχουσες και οι μελλοντικές υποδομές και διαθεσιμότητα χώρων, οικονομικοί-κοινωνικοί παράγοντες, κλπ.

Στη χώρα μας δεν υπάρχει εγκατάσταση οριστικής εναπόθεσης ραδιενεργών καταλοίπων. Επιπλέον, δεν υφίστανται εγκαταστάσεις ανακύκλωσης ραδιενεργών υλικών, και ως εκ τούτου, η τελική διαχείρισή τους προϋποθέτει την εξαγωγή τους από τη χώρα σε εγκεκριμένη εγκατάσταση ανακύκλωσης ραδιενεργών υλικών του εξωτερικού. Για τις πηγές και τα υλικά που δεν μπορούν να εξαχθούν σε εγκατάσταση ανακύκλωσης ραδιενεργών υλικών ο αναμενόμενος τρόπος διάθεσης είναι η εναπόθεση σε επιφανειακή εγκατάσταση μικρού βάθους ("engineered near surface disposal facility").

Οι κυριότερες πηγές των ραδιενεργών καταλοίπων στο ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος είναι:

- a) Στερεά και υγρά ραδιενεργά απόβλητα που προέρχονται από τις προηγούμενες δραστηριότητες και τη λειτουργία του ερευνητικού αντιδραστήρα του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος». Ενδεικτικά, αναφέρονται ρητίνες, ιζήματα, ιστορικά κατάλοιπα (historical waste), ενεργοποιημένα και ραδιορυπασμένα υλικά.
- b) Ραδιενεργά υλικά που θα προκύψουν από την αποξήλωση του ερευνητικού αντιδραστήρα του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» και άλλων εγκαταστάσεων του Κέντρου (π.χ. επιταχυντής Tandem).
- c) Ραδιενεργές πηγές εκτός χρήσης, ορφανές πηγές και ραδιενεργά υλικά, τα οποία φυλάσσονται προσωρινά στην Εγκατάσταση Διαχείρισης Ραδιενεργών Πηγών και Αποβλήτων του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος».

Ο ραδιολογικός χαρακτηρισμός των υλικών αυτών αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την επιλογή των μεθόδων για την επεξεργασία τους και περαιτέρω διαχείρισης τους όπως για παράδειγμα της ασφαλούς φύλαξης τους σε εγκατάσταση εναπόθεσης ραδιενεργών αποβλήτων, της ανακύκλωσης ή της απόρριψής τους σαν κοινά απόβλητα.

Οι καταστροφικές μέθοδοι χαρακτηρισμού των ραδιενεργών υλικών, αν και είναι οι πιο ακριβείς, έχουν υψηλό κόστος και σημαντικό βαθμό δυσκολίας συμπεριλαμβανομένης της ακτινοπροστασίας του προσωπικού καθώς προϋποθέτουν την αντιπροσωπευτική δειγματοληψία των αντικειμένων και ραδιοχημικές τεχνικές ανάλυσης που απαιτούν μεγάλη προσπάθεια και είναι χρονοβόρες.

Ωστόσο, κάποια ραδιονουκλίδια, όπως για παράδειγμα το Co-60 και το Cs-137, εκπέμπουν χαρακτηριστική ακτινοβολία γ , πράγμα που καθιστά δυνατή την ανίχνευση των ραδιονουκλιδίων αυτών και την ποσοτικοποίηση της ενεργότητας τους χρησιμοποιώντας μη καταστροφικές μεθόδους, όπως η φασματοσκοπία γ .

Η βασική αρχή της φασματοσκοπίας γ είναι η ανίχνευση των φωτονίων που εκπέμπονται από το δείγμα με κατάλληλο ανιχνευτή που μας δίνει σήμα ανάλογο της ενέργειας των φωτονίων το οποίο στη συνέχεια αναλύεται και μας δίνει ένα ιστόγραμμα στη μορφή του ενεργειακού φάσματος των φωτονίων που καταμετρώνται.

1.1) Σκοπός

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας για τον in-situ χαρακτηρισμό ραδιενεργών υλικών. Η μέθοδος βασίζεται σε επιτόπου μετρήσεις με

ανιχνευτή NaI(Tl) και προσομοιώσεις Monte-Carlo για τη διόρθωση της απόκρισης του ανιχνευτή ως προς το υλικό και το γεωμετρικό σχήμα της πηγής ακτινοβολίας-γ.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε στον χαρακτηρισμό και στην κατηγοριοποίηση ενός συνόλου ενεργοποιημένων ή ρυπασμένων αντικειμένων που βρίσκονται στη προσωρινή αποθήκη ραδιενεργών υλικών στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου του ερευνητικού πυρηνικού αντιδραστήρα του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος.

2. ΜΕΘΟΔΟΣ

2.1) Πειραματικό Μέρος

2.1.1 Ανιχνευτής (Exploranium GR-135 MiniSpec)



Σχήμα 1: Απεικόνιση του ανιχνευτή Exploranium GR-135 MiniSpec

Ο ανιχνευτής Exploranium GR-135 MiniSpec (Σχήμα 1) που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις της παρούσας εργασίας είναι ανιχνευτής σπινθηρισμού με κρύσταλλο Ιωδιούχου Νατρίου (NaI(Tl)) [3]. Ο ανιχνευτής επιτρέπει τον προσδιορισμό του ενεργειακού φάσματος της ακτινοβολίας-γ που καταμετρήθηκε. Τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή δίνονται στον Πίνακα 1:




Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά του ανιχνευτή






Όνομασία	Exploranium GR-135 MiniSpec
Είδος	Σπινθηριστής Ιωδιούχου Νατρίου
Όγκος	4.5 κυβικές ίντσες
Περίβλημα	Πολυαιθυλενίου






2.1.2 Δείγματα

Στην εργασία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις δειγμάτων που βρίσκονται στο θωρακισμένο χώρο προσωρινής αποθήκευσης ραδιενεργών υλικών του ερευνητικού πυρηνικού αντιδραστήρα του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος. Τα δείγματα που μετρήθηκαν δίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Κατάλογος ραδιενεργών δειγμάτων που μετρήθηκαν στη παρούσα εργασία

a/a Δείγμα	Φωτογραφία	Περιγραφή	Διαστάσεις (mm)	Μάζα (g)	Υλικό
1		Δοχείο θαλάμου ιονισμού	Πάχος: 4 Διάμετρος:45	1846	Al
2		Βάση Ράβδου	Πάχος: 5 Διάμετρος:65	1795	Al
3		Σωλήνας περιστροφικής ακτινοβόλησης	Πάχος: 4 Διάμετρος:74	4254	Al
4		Σωλήνας μεταφοράς δειγμάτων	Πάχος: 4 Διάμετρος:45	1867	Al
5		Θάλαμος Ιονισμού	Πάχος: 4 Διάμετρος:80	1040	Al
6		Τάπα grid plate	Πάχος: 4 Διάμετρος:61	999	Al
7		Τάπα grid plate	Πάχος: 4 Διάμετρος:12.7	68	Al

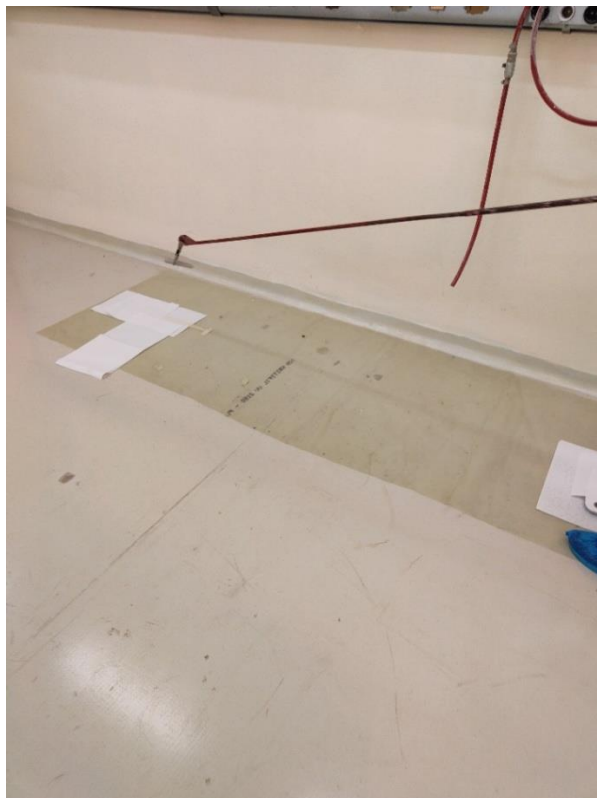
α/α Δείγμα	Φωτογραφία	Περιγραφή	Διαστάσεις (mm)	Μάζα (g)	Υλικό
8		Δοχείο θαλάμου σχάσεως	Πάχος: 3 Διάμετρος:90	2779	Al
9		Δοχείο θαλάμου ιονισμού	Πάχος: 4 Διάμετρος:57	1668	Al
10		Τάπα grid plate	Πάχος: 23 Διάμετρος:61	1064	Al
11		Οδηγός ράβδου ασφαλείας	Πάχος: 3.3 Διάμετρος:76	15000	Al
12		Περιστροφική Βάση	Πάχος: 3 Διάμετρος:70	77	Al

a/a Δείγμα	Φωτογραφία	Περιγραφή	Διαστάσεις (mm)	Μάζα (g)	Υλικό
13		Δοχείο ακτινοβόλησης δειγμάτων	Πάχος: 2 Διάμετρος:40	231	Al
14		Δαχτυλίδι κεντραρίσματος	Πάχος: 2 Διάμετρος:30	24	Al
15		Τάπα grid plate	Πάχος: 4 Διάμετρος:12.72	68	Al
16		Θάλαμος Ιονισμού	Πάχος: 4 Διάμετρος:80	1431	Al
17		Τάπα grid plate	Πάχος: 4 Διάμετρος:12.72	68	Al

2.1.3 Μέθοδος Μετρήσεων

Οι μετρήσεις των δειγμάτων λόγω της ακτινοβολίας πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρωτόκολλο μετρήσεων του εργαστηρίου του αντιδραστήρα.

Χρησιμοποιήθηκαν ειδικές στολές, γάντια, καλύμματα υποδημάτων και ειδικά εργαλεία για την συλλογή και μετακίνηση των δειγμάτων.



Σχήμα 2: Μεταφορά μικρής τάπας με ειδική τσιμπίδα

Οι μετρήσεις έγιναν παρουσία τεχνικών υγειοφυσικής που με ειδικά όργανα μετρούσαν τον ρυθμό δόσης του εκάστοτε δείγματος και ενέκριναν την διεξαγωγή των μετρήσεων. Τα δείγματα τοποθετούνταν σε φύλλο πλαστικού για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας ρύπανσης στο χώρο διεξαγωγής της μέτρησης. Ο ανιχνευτής τοποθετούνταν 25cm από το κέντρο του αντικειμένου.

Ο χρόνος μέτρησης καθοριζόταν από τον αριθμό κρούσεων του ανιχνευτή , έτσι ώστε να συλλεχθεί ικανοποιητικός αριθμός κρούσεων στις προς εξέταση φωτοκορυφές, για να επιτευχθεί στατιστική καλύτερη από 3%.

Μετά το τέλος της μέτρησης, το δείγμα ζυγιζόταν, μετριόταν οι διαστάσεις του, καταγραφόταν και επανατοποθετείτο στην αποθήκη φύλαξης. Η ανάλυση του φάσματος γινόταν με τον ανιχνευτή σε διαφορετικό χώρο με χαμηλό υπόβαθρο ακτινοβολίας ώστε να μην επηρεάζεται η μέτρηση του αντικειμένου που εξετάζεται από την παρουσία άλλων ραδιενεργών υλικών.

2.2) Θεωρητικό Μέρος

2.2.1 Κώδικας MCNP

Ο κώδικας MCNP αναπτύχθηκε από το Los Alamos National Laboratory [2]. Ο κώδικας επιτρέπει την ανάλυση της μεταφοράς νετρονίων, φωτονίων, ηλεκτρονίων και φορτισμένων σωματιδίων στην ύλη χρησιμοποιώντας την μέθοδο Monte Carlo.

Ο κώδικας MCNP αντιμετωπίζει το πρόβλημα των γεωμετριών ως περιοχές ή όγκους που περιβάλλονται από πρώτου και δεύτερου βαθμού επιφάνειες. Τα κελιά ορίζονται από τα σημεία τομής, τις ενώσεις και των συμπληρωμάτων των γεωμετρικών σχημάτων που όρισε ο χρήστης.

Ο καθορισμός των υλικών που πληρούν τα κελιά, περιλαμβάνει:

- Τον ορισμό ενός μοναδικού αριθμού που θα καθορίζει το υλικό
- Την ποσοτική (%) ή ατομική σύσταση του υλικού
- Τις ενεργές διατομές των ισοτόπων που αποτελούν το υλικό
- Την πυκνότητα του υλικού

Συνήθως οι ενεργές διατομές εξαρτώνται από το είδος του προβλήματος που έχουμε να προσομοιώσουμε καθώς και τα δεδομένα που έχουμε διαθέσιμα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν διατομές από τη βιβλιοθήκη MCPLIB84 [2].

Ο τύπος της ακτινοβολίας που εκπέμπει η πηγή και τα χαρακτηριστικά της καθορίζονται με την εντολή SDEF. Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία ήταν μονοενεργειακές πηγές όγκου με ομοιογενή κατανομή της εκπομπής ακτινοβολίας-γ.

Οι εικονικοί ανιχνευτές (Tallies) περιγράφονται στον Πίνακα 3.

Mnemonic	Tally Type	particles <i>pl</i>	Fn Units	*Fn Units
F1: <i>pl</i>	surface current	N or P or N,P or E	#	MeV
F2: <i>pl</i>	average surface flux	N or P or N,P or E	#/cm ²	MeV/cm ²
F4: <i>pl</i>	average flux in a cell	N or P or N,P or E	#/cm ²	MeV/cm ²
FMESH4: <i>pl</i>	track-length tally over 3D mesh	N or P or E	#/cm ²	MeV/cm ²
F5a: <i>pl</i>	flux at a point or ring	N or P	#/cm ²	MeV/cm ²
FIP5: <i>pl</i>	pin-hole flux image	N or P	#/cm ²	MeV/cm ²
FIR5: <i>pl</i>	planar radiograph flux image	N or P	#/cm ²	MeV/cm ²
FIC5: <i>pl</i>	cylindrical radiograph flux image	N or P	#/cm ²	MeV/cm ²
F6: <i>pl</i>	energy deposition	N or P or N,P	MeV/g	jerks/g
F7: <i>pl</i>	fission energy deposition in a cell	N	MeV/g	jerks/g
F8: <i>pl</i>	pulse height distribution in a cell	P or E or P,E	pulses	MeV

Πίνακας 3: Εικονικοί Ανιχνευτές

Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκε η Tally F8, η οποία καταμετρά τους παλμούς ανά φωτόνιο (pulses per photon) σε ένα συγκεκριμένο κελί (κρύσταλλος του ανιχνευτή) και σε μια καθορισμένη ενεργειακή περιοχή.

2.2.2 Προσομοίωση Ανιχνευτή

Ο ανιχνευτής Exploranium GR-130 MiniSpec προσομοιώθηκε ως ένα παραλληλεπίπεδο κιβώτιο από πολυαιθυλένιο που στο εσωτερικό του βρίσκεται ο κύλινδρος του Ιωδιούχου Νατρίου που καταμετρά τα φωτόνια.

Οι διαστάσεις των παραλληλεπίπεδων αλλά και του κυλίνδρου καθώς και οι αποστάσεις του κρυστάλλου από τα τοιχώματα, αναγράφονται στο εγχειρίδιο του ανιχνευτή. Ο κρύσταλλος του Ιωδιούχου Νατρίου προσομοιώθηκε ως κύλινδρος ύψους 3.62 cm και ακτίνας 2.54 cm.

Η πυκνότητα και η σύσταση των υλικών δίνεται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Πυκνότητα και σύσταση των υλικών

Υλικό	Πυκνότητα (g/cm ³)	Σύσταση (%)
Πολυαιθυλένιο	1.05	C (77.4)
		H (12.6)
		N (10.0)
Αέρας	0.0012	N (78.08)
		O (20.95)
		Ar (0.93)
NaI	3.67	Na (15.34)
		I (84.66)

Στο παράρτημα 7.1 βλέπουμε αναλυτικά το αρχείο εισόδου.

2.2.3 Προσομοίωση Πηγής

Τα γεωμετρικά σχήματα των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σημειακή πηγή, παραλληλεπίπεδη πηγή (πλάκα), σφαιρική πηγή, κυλινδρική πηγή και κοίλη κυλινδρική πηγή (σωλήνας). Το υλικό των παραπάνω αντικειμένων ήταν αλουμίνιο πυκνότητας 2.7 g/cm³. Το γεωμετρικό κέντρο του ανιχνευτή τοποθετήθηκε σε απόσταση 25 cm από την επιφάνεια της πηγής στον αέρα.

Τα δείγματα θεωρήθηκαν ομογενή και με ομοιόμορφη κατανομή μονοενεργειακών πηγών φωτονίων που αντιστοιχούν στις ενέργειες των ραδιοϊσοτόπων που μας ενδιαφέρουν. Οι ισοτοπικές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν και οι κύριες ενέργειες εκπομπής τους δίνονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Πίνακας ισοτοπικών πηγών και κύριων ενεργειών εκπομπής φωτονίων

Ισότοπο	Ενέργεια (MeV)
Am-241	0.595
Cd-109	0.088
Ce-139	0.165
Co-60	1.173,1.333
Cs-137	0.661
Eu-152	0.121,0.344,0.778, 0.964, 1.080,1.110, 1.400
Mn-54	0.834
Na-22	1.274
Sn-113	0.391
Zn-65	1.115

Αναλυτικά οι γεωμετρίες των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

i. Σημειακή πηγή

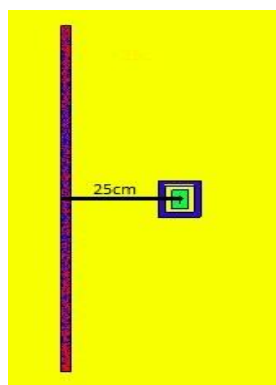
Για την σημειακή πηγή τοποθετήθηκαν οι μονοενεργειακές πηγές του παραπάνω πίνακα σε απόσταση 25 cm από το γεωμετρικό κέντρο του κυλίνδρου του ανιχνευτή στον αέρα.



Σχήμα 4:Σημειακή πηγή

ii. Παραλληλεπίπεδη Πηγή

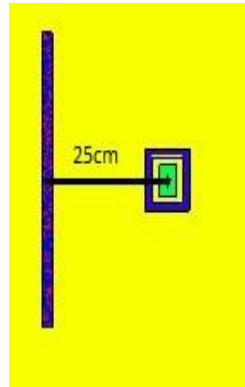
Για την παραλληλεπίπεδη πηγή χρησιμοποιήθηκε παραλληλεπίπεδο ύψους 50 cm και σε απόσταση 25 cm από το γεωμετρικό κέντρο του κυλίνδρου του ανιχνευτή στον αέρα. Οι υπολογισμοί έγιναν για πάχη πηγής $d=0.1$ cm, 0.5 cm, 1 cm, 2 cm, 5 cm.



Σχήμα 5: Παραλληλεπίπεδη πηγή

iii. Κυλινδρική πηγή

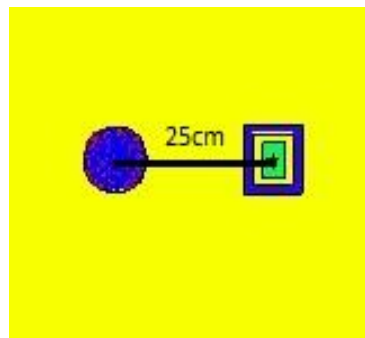
Για τις κυλινδρικές πηγές χρησιμοποιήθηκε κύλινδρος, ύψους 50 cm και σε απόσταση 25 cm από το γεωμετρικό κέντρο του κυλίνδρου του ανιχνευτή στον αέρα. Οι ακτίνες των κυλίνδρων ήταν: $R=0.1\text{cm}$, 0.5cm , 1 cm , 2 cm , 5 cm .



Σχήμα 6: Πηγή Συμπαγής Κύλινδρος

iv. Σφαιρική πηγή

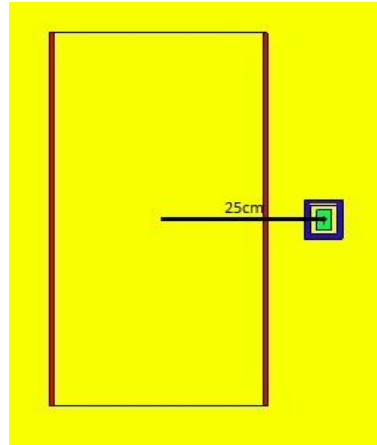
Για τις σφαιρικές πηγές χρησιμοποιήθηκαν σφαίρες σε απόσταση 25 cm από το γεωμετρικό κέντρο του κυλίνδρου του ανιχνευτή στον αέρα. Οι ακτίνες των σφαιρών ήταν: $R=1\text{ cm}$, 2 cm , 5 cm , 7 cm , 10 cm .



Σχήμα 7: Πηγή Σφαίρα

v. Κοίλη Κυλινδρική Πηγή (Σωλήνας)

Για τις κοίλες κυλινδρικές πηγές χρησιμοποιήθηκαν δύο κύλινδροι ύψους 50 cm. Οι κοίλοι κύλινδροι βρίσκονταν σε απόσταση 25 cm από το γεωμετρικό κέντρο του κυλίνδρου του ανιχνευτή στον αέρα. Οι ακτίνες των σωλήνων ήταν: $R=3.85\text{ cm}$, 15.99 cm , 21.12 cm , 23 cm , 26.3 cm . Το πάχος του σωλήνα ήταν 0.9 cm .



Σχήμα 8: Πηγή Σωλήνας

Για να πάρουμε τους παλμούς ανά φωτόνιο από τις παραπάνω πηγές, χρησιμοποιήθηκε η Tally F8 στις συντεταγμένες του κυλίνδρου NaI(Tl), σε καθορισμένο ενεργειακό εύρος.

Άξιο αναφοράς είναι η επίδραση σκεδάσεων στα οικοδομικά υλικά και το δάπεδο, καθώς σε πολλές περιπτώσεις οι μετρήσεις με τον ανιχνευτή δεν ήταν δυνατό να γίνουν στον αέρα και σε μεγάλη απόσταση από τα υλικά αυτά, με αποτέλεσμα φωτόνια να σκεδάζονται στα υλικά του δαπέδου και στη συνέχεια να καταγράφονται από τον ανιχνευτή.

2.2.4 Χαρακτηριστικά εκτέλεσης του κώδικα

Το τρέξιμο του κώδικα του MCNP έγινε σε ειδικό περιβάλλον, πληκτρολογώντας την εντολή <<MCNP6 n=Όνομα Αρχείου Εισόδου>>. Το αρχείο εισόδου ήταν μία αλληλουχία εντολών γραμμένες με την μορφολογία και σύνταξη που αναγράφεται στο εγχειρίδιο του MCNP.

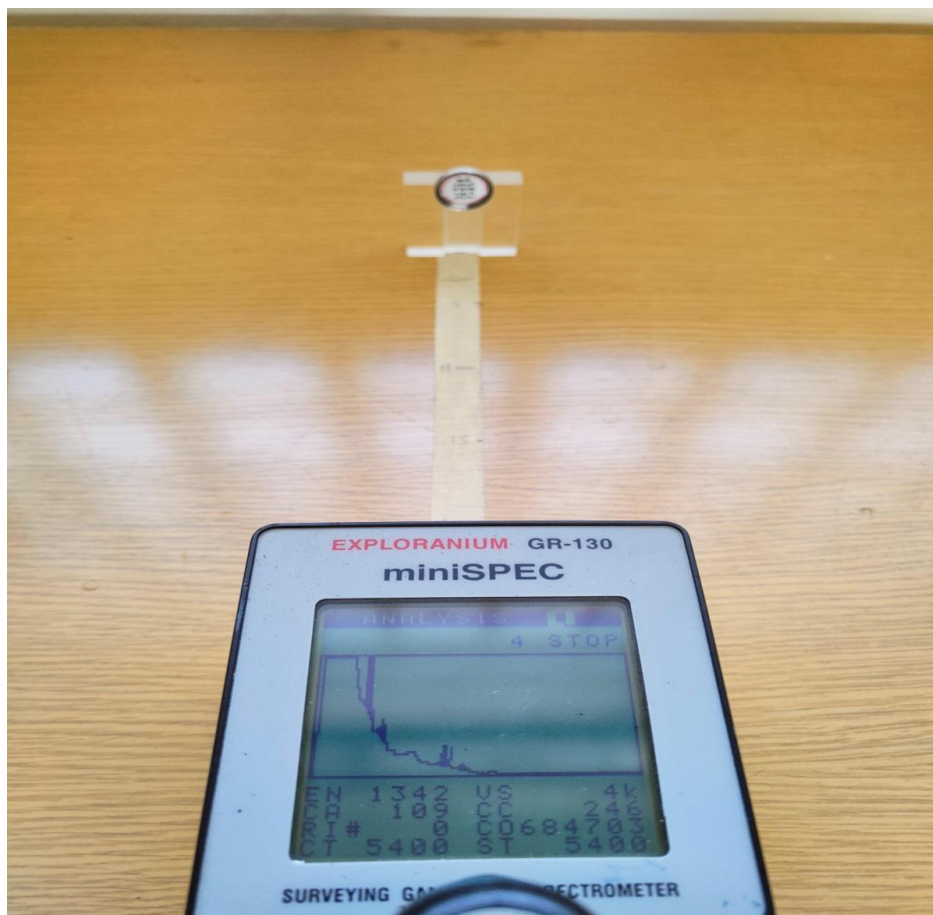
Όλες οι εκτελέσεις του κώδικα είχαν διάρκεια 1 λεπτό που αντιστοιχούσε σε 10^{10} επαναλήψεις (χαρακτηριστικά PC) και το αποτέλεσμα εμφανιζόταν σε αρχείο output. Ειδικό εργαλείο του πακέτου MCNP ήταν το αρχείο MCNP_Vised, που μας έδινε τη δυνατότητα να έχουμε σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας που είχαμε σχεδιάσει με τον MCNP.

3. Αποτελέσματα

3.1) Βαθμονόμηση Ανιχνευτή

3.1.1 Πειραματικό Μέρος

Ο ανιχνευτής τοποθετήθηκε σε απόσταση 25 cm από τις σημειακές πηγές βαθμονόμησης. Οι πηγές τοποθετούνταν σε βάση στήριξης από plexi-glass ύψους 4.5cm.



Σχήμα 9: Πειραματική Διάταξη για την βαθμονόμηση του ανιχνευτή

Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική βαθμονόμηση του ανιχνευτή δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πηγές	Ενεργότητα (kBq)	Ημερομηνία (t_0)	Χρόνος Ημιζωής (y)
^{60}Co	413.2	1983	5.27
^{137}Cs	447.9	1983	30.05
^{22}Na	37.59	2015	2.60

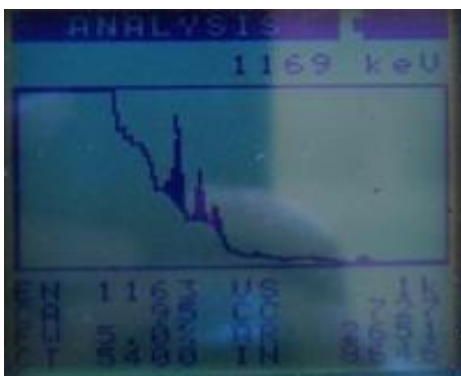
Πίνακας 6: Πίνακας πηγών, ενεργότητας και ημερομηνία αναφοράς

Χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 1 και σύμφωνα με τα δεδομένα του Πίνακα 6 υπολογίζουμε την ενεργότητα των σημειακών πηγών στον χρόνο των μετρήσεων [4].

$$A=A_0e^{-0.693 \cdot t/T_{1/2}} \quad (1)$$

Όπου A_0 είναι η ενεργότητα την χρονική στιγμή t_0 , $T_{1/2}$ είναι ο χρόνος ημιζωής του ισότοπου σύμφωνα με την βιβλιογραφία και t είναι ο χρόνος που πέρασε από την t_0 μέχρι την στιγμή που έγινε η μέτρηση.

Πριν από κάθε μέτρηση δείγματος, γινόταν μετρήσεις του υποστρώματος ακτινοβολίας στον χώρο. Οι μετρήσεις του υποστρώματος λαμβάνονταν στον ίδιο χρόνο καταμέτρησης με αυτόν των προς εξέταση δειγμάτων. Ο ανιχνευτής κατέγραφε τους παλμούς κάτω από την επιλεγμένη φωτοκορυφή. Ο καθαρός αριθμός παλμών από την πηγή υπολογίζεται μετά την αφαίρεση του υποστρώματος. Το τελικό αποτέλεσμα της μέτρησης εκφράζεται σε **παλμούς ανά δευτερόλεπτο**.



Σχήμα 10: Φωτοκορυφές σημειακών πηγών

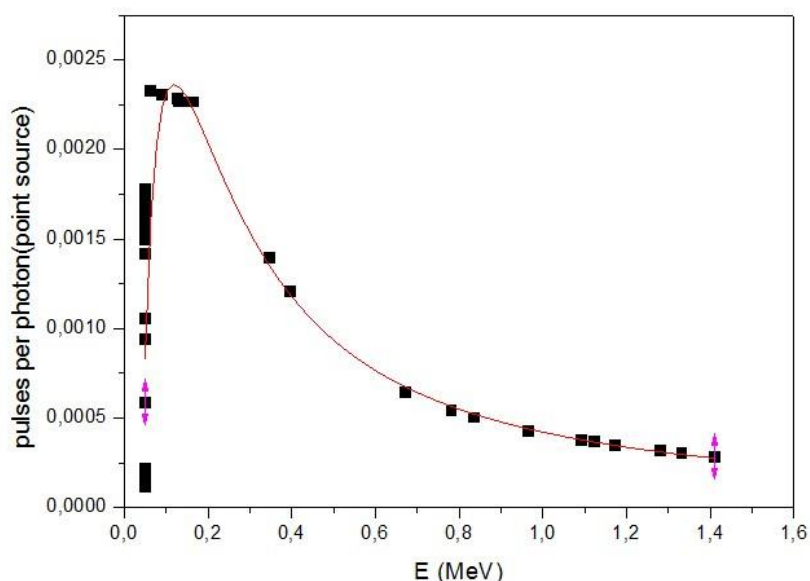
Τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων με τα αντίστοιχα σφάλματα τους καταγράφονται στον Πίνακα 7:

Πίνακας 7: Πίνακας Πειραματικών Αποτελεσμάτων

Ισότοπο	Ενέργεια (MeV)	I (%)	Ενεργότητα (kBq)	(παλμοί/φωτόνιο) · 10 ⁻⁴
¹³⁷ Cs	0.66	85.3	447.9	4.40 (±0.132)
⁶⁰ Co	1.17	99.88	413.2	2.50 (±0.075)
²² Na	1.27	99.95	37.59	1.70 (±0.051)
⁶⁰ Co	1.33	99.98	413.2	1.90 (±0.057)

3.1.2 Υπολογιστικό Μέρος

Στο υπολογιστικό μέρος έγινε η προσομοίωση του ανιχνευτή και των σημειακών πηγών με τον τρόπο που αναφέρθηκε στο **Κεφάλαιο 2**. Η γραφική παράσταση, καθώς και η προσαρμογή των θεωρητικών τιμών φαίνεται στο Σχήμα 11 [5]:



Σχήμα 11: Θεωρητική προσομοίωση σημειακών πηγών, για την βαθμονόμηση του ανιχνευτή, με τον MCNP.

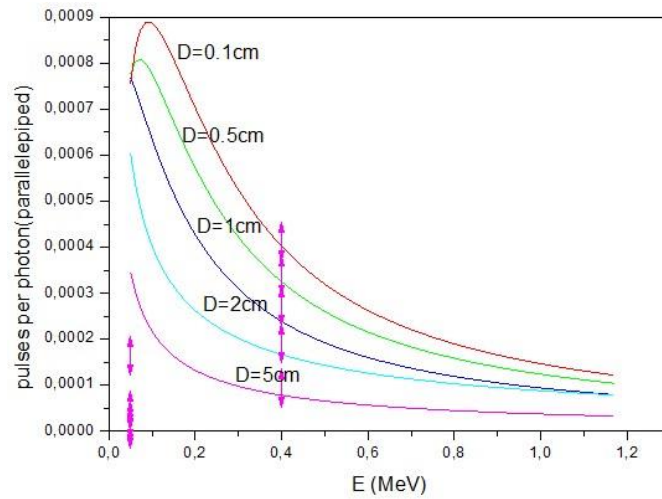
Στο σχήμα τα θεωρητικά αποτελέσματα του κώδικα προσαρμόστηκαν με την μαθηματική σχέση 3:

$$\text{Παλμοί ανά φωτόνιο} = A \cdot (1 - ke^{-B \cdot E^F})(g \cdot e^{-C \cdot E^D}) \quad (3)$$

Σημαντικός είναι ο υπολογισμός του σφάλματος [6] $R^2=1-\Sigma_{\text{residuals}}/\Sigma_{\text{totals}}$. Όπου το $\Sigma_{\text{residuals}}=\Sigma(\gamma-\gamma_{\text{expected}})^2$ και $\Sigma_{\text{totals}}=\Sigma(\gamma-\gamma_{\text{mean}})^2$. Το αποτέλεσμα που παίρνουμε είναι $R^2=0.95$. Το αποτέλεσμα κρίνεται ικανοποιητικό για τους σκοπούς της μελέτης που αφορούν στη διαχείριση ραδιενεργών υλικών.

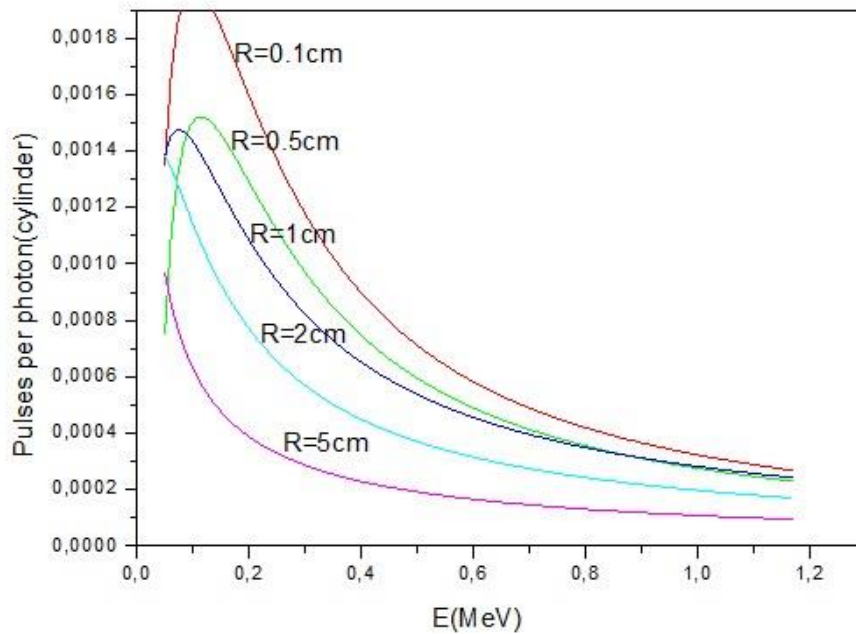
3.2 Υπολογιστικά Αποτελέσματα MCNP

Σε αυτή τη παράγραφο δίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τον κώδικα MCNP για τα διαφορετικά γεωμετρικά σχήματα δειγμάτων που εξετάστηκαν. Η προσαρμογή των αποτελεσμάτων έγινε με την Μαθηματική σχέση 3.



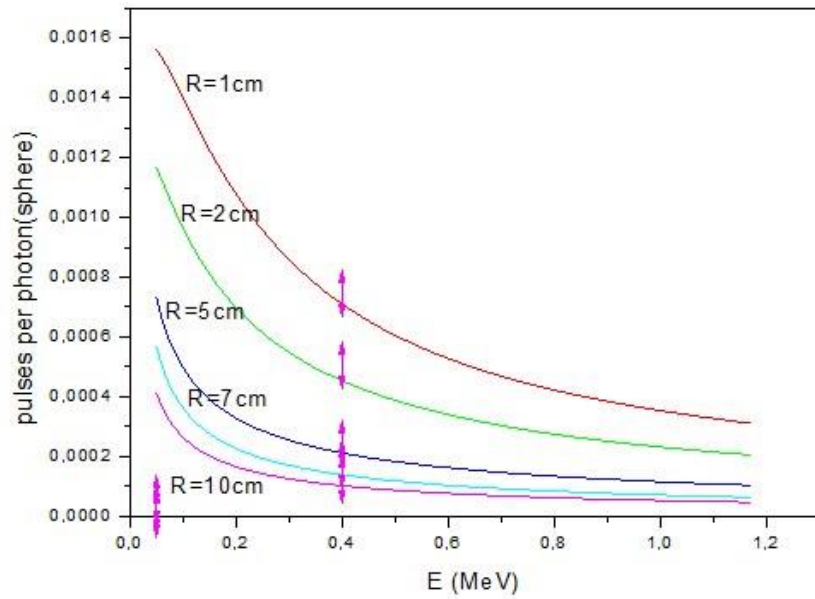
Σχήμα 12: Παραλληλεπίπεδη πηγή

Στο σχήμα 12 απεικονίζονται παραλληλεπίπεδες πηγές με πάχη $D = 0.1 \text{ cm}$, 0.5 cm , 1 cm , 2 cm , 5 cm αντίστοιχα. Οι πηγές τοποθετήθηκαν 25 cm από το γεωμετρικό κέντρο του ανιχνευτή.



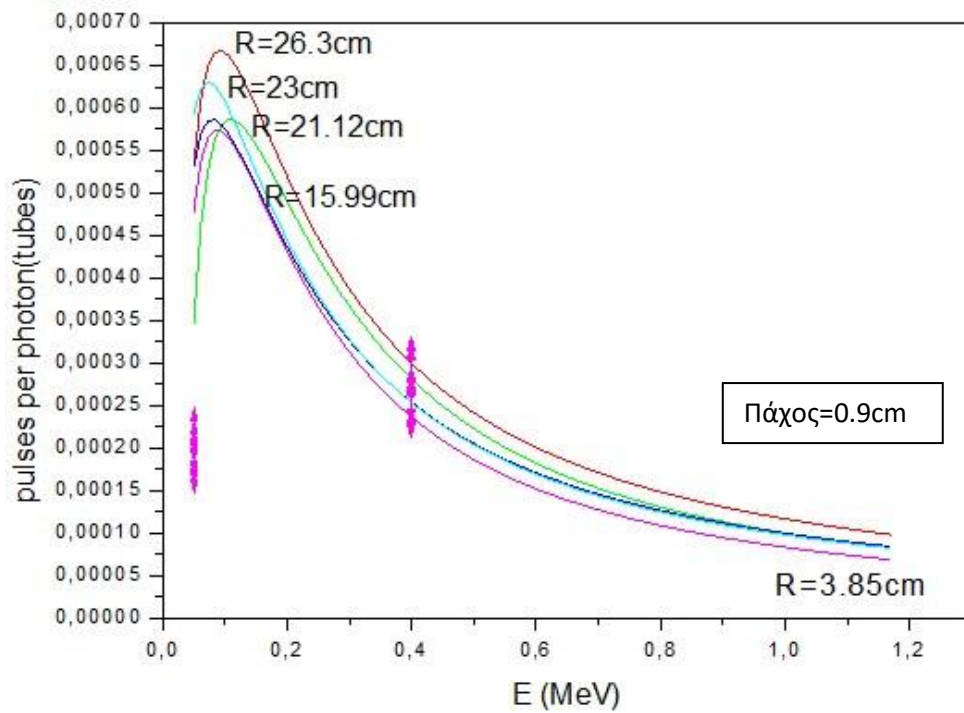
Σχήμα 13: Κυλινδρικές πηγές

Στο σχήμα 13 απεικονίζονται κυλινδρικές πηγές με ακτίνες $R = 0.1 \text{ cm}$, 0.5 cm , 1 cm , 2 cm , 5 cm αντίστοιχα. Οι πηγές τοποθετήθηκαν 25 cm από το γεωμετρικό κέντρο του ανιχνευτή.



Σχήμα 14: Σφαιρικές πηγές

Στο σχήμα 14 απεικονίζονται σφαιρικές πηγές με ακτίνες $R=1\text{ cm}$, 2 cm , 5 cm , 7 cm , 10 cm αντίστοιχα. Οι πηγές τοποθετήθηκαν 25 cm από το γεωμετρικό κέντρο του ανιχνευτή.



Σχήμα 15: Πηγές σωλήνες

Στο σχήμα 15 απεικονίζονται πηγές σωλήνες με ακτίνες R= 3.85 cm, 15.99 cm, 21.12 cm, 23 cm, 26.3 cm αντίστοιχα. Οι πηγές τοποθετήθηκαν 25 cm από το γεωμετρικό κέντρο του ανιχνευτή.

3.3 Διορθωτικοί Παράγοντες

3.3.1 Διορθωτικός Παράγοντας Βαθμονόμησης (f_{corr})

Λόγω της φύσης του ανιχνευτή και της απώλειας φωτονίων που δεν καταγράφονται από τα ηλεκτρονικά του ανιχνευτή, αλλά και των διαφόρων υποθέσεων και απλουστεύσεων που έγιναν στην προσομοίωση του ανιχνευτή, υπάρχει διαφορά μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών μετρήσεων. Προκειμένου να βρεθεί ο αντίστοιχος διορθωτικός παράγοντας υπολογίστηκε η μέση τιμή του λόγου των πειραματικών και υπολογιστικών μετρήσεων, όπως φαίνεται στον πίνακα 8:

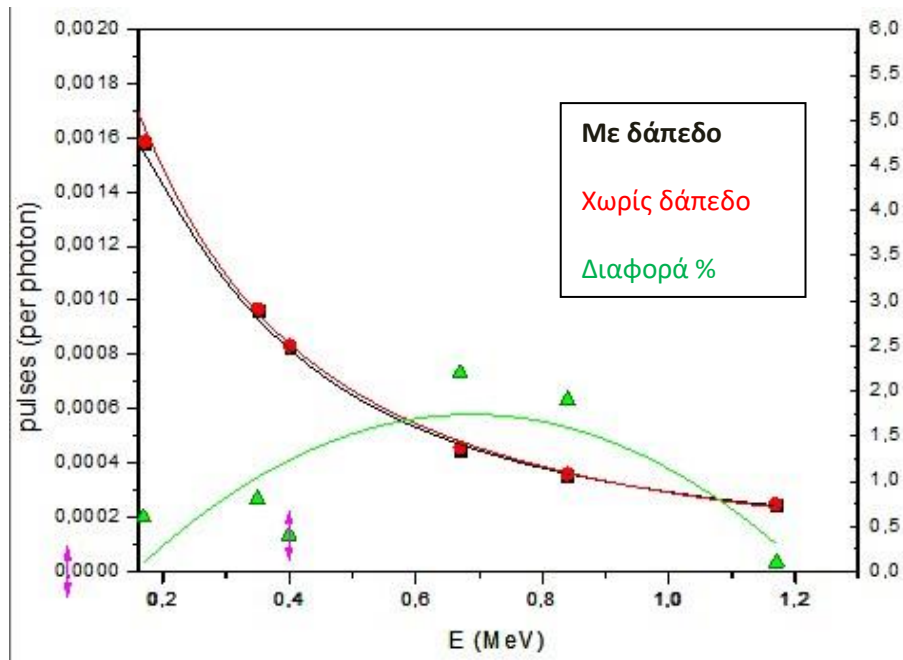
Πίνακας8: Διορθωτικός Παράγοντας Βαθμονόμησης

Ισότοπο	Ενέργεια (MeV)	Πειραματικά (παλμοί/φωτόνιο) $\times 10^{-4}$	Υπολογιστικά (παλμοί/φωτόνιο) $\times 10^{-4}$	Πειρ./Υπολ.
^{60}Co	1.169	2.50±0.075	3.50 ±0.001	0.728 ±0.075
^{60}Co	1.333	1.90 ±0.057	3.00 ±0.001	0.625 ±0.057
^{137}Cs	0.665	4.40 ±0.132	6.45 ±0.001	0.685 ±0.132
^{22}Na	1.266	1.70 ±0.051	3.19 ±0.001	0.550 ±0.051
Μέση Τιμή				0.647 ±0.077
Εύρος				0.177

Συνεπώς, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας και το εύρος των ενεργειών που εξετάστηκαν (~1 MeV) εφαρμόστηκε διορθωτικός συντελεστής **0.647±0.077**.

3.3.2 Διορθωτικός παράγοντας σκεδάσεων (f_{floor})

Σε πολλές περιπτώσεις, η διεξαγωγή των μετρήσεων δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί μακριά από κέντρα σκεδάσεων (στον αέρα) αλλά έπρεπε τα δείγματα να τοποθετηθούν στο δάπεδο. Προκειμένου να υπολογιστεί η επίδραση του δαπέδου στις μετρήσεις, έγινε προσομοίωση της μέτρησης ενός κυλίνδρου ακτίνας 1cm τοποθετημένου στο έδαφος και στον αέρα (χωρίς σκεδάσεις).



Σχήμα 16: Σύγκριση μετρήσεων με ενδιάμεσο μέσο αέρα και πάτωμα.

Στο σχήμα 16 δίνονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών στον αέρα (κόκκινο χρώμα) και στο δάπεδο (μαύρο χρώμα). Ο διορθωτικός παράγοντας που προκύπτει είναι <math><2.5\%</math> για ενέργειες φωτονίων στο εύρος 0.2-1.2MeV.

3.3.3 Διορθωτικός Παράγοντας Εσωτερικής Απορρόφησης Ακτινοβολίας (f_{abs})

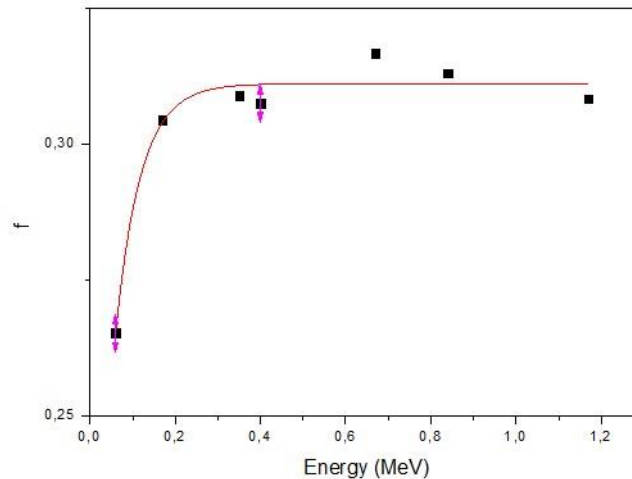
Στη προσομοίωση των δειγμάτων, θεωρήθηκε ότι οι πηγές είναι ομοιογενώς κατανομημένες στο δείγμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει απορρόφηση της ακτινοβολίας των πηγών λόγω του υλικού του ίδιου του δείγματος [7].

Ο συντελεστής ενδο-απορρόφησης δίνεται από τη **σχέση 4**:

$$f = \frac{N_{vol}}{N_{point}} \quad (4)$$

Όπου N_{vol} είναι οι μετρήσεις των δειγμάτων (παλμοί ανά φωτόνιο) και N_{point} είναι οι μετρήσεις σημειακής πηγής (παλμοί ανά φωτόνιο).

Θεωρητική εκτίμηση του διορθωτικού συντελεστή και της εξίσωσης που περιγράφει την εξάρτηση του από την ενέργεια, έγινε με θεωρητική προσομοίωση σωλήνα ακτίνας 23cm. Σημειώνεται ότι τα περισσότερα δείγματα που μετρήθηκαν προσομοιώθηκαν με γεωμετρία σωλήνα.



Σχήμα 17: Θεωρητική εκτίμηση του διορθωτικού παράγοντα f

Στο σχήμα 17 απεικονίζεται η μεταβολή του συντελεστή f σε συνάρτηση με την ενέργεια. Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή των υπολογιστικών μετρήσεων ήταν:

$$f = a + b \cdot e^{-k \cdot E}$$

Με $R^2=0.95$

3.4) Υπολογισμός Ενεργότητας

Η σχέση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ενεργότητας των δειγμάτων με βάση των μετρήσεων του δείγματος και της σημειακής πηγής ήταν:

$$A_{vol}(Bq) = A_{point} \cdot f \cdot \frac{N_{vol}}{N_{point}}$$

Όπου A_{vol} είναι η ενεργότητα του δείγματος, A_{point} είναι η ενεργότητα της σημειακής πηγής, f είναι ο συνολικός διορθωτικός παράγοντας, δηλαδή το γινόμενο του συντελεστή εσωτερικής απορρόφησης, σκεδάσεων και απωλειών. N_{vol} είναι οι παλμοί ανά δευτερόλεπτο από τις μετρήσεις των δειγμάτων και N_{point} είναι οι παλμοί ανά δευτερόλεπτο από τις μετρήσεις της σημειακής πηγής.

Στους παρακάτω υπολογισμούς χρησιμοποιήσαμε ως σημειακή πηγή αναφοράς την πηγή ^{60}Co και συγκεκριμένα οι παλμοί που καταμετρήθηκαν στη φωτοκορυφή ενέργειας 1.17 MeV.

3.5) Πειραματικά Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της ειδικής ενεργότητας για τα 17 δείγματα καταγράφονται στον πίνακα 9:

Πίνακας 9: Ειδική Ενεργότητα δειγμάτων (Bq/kg)

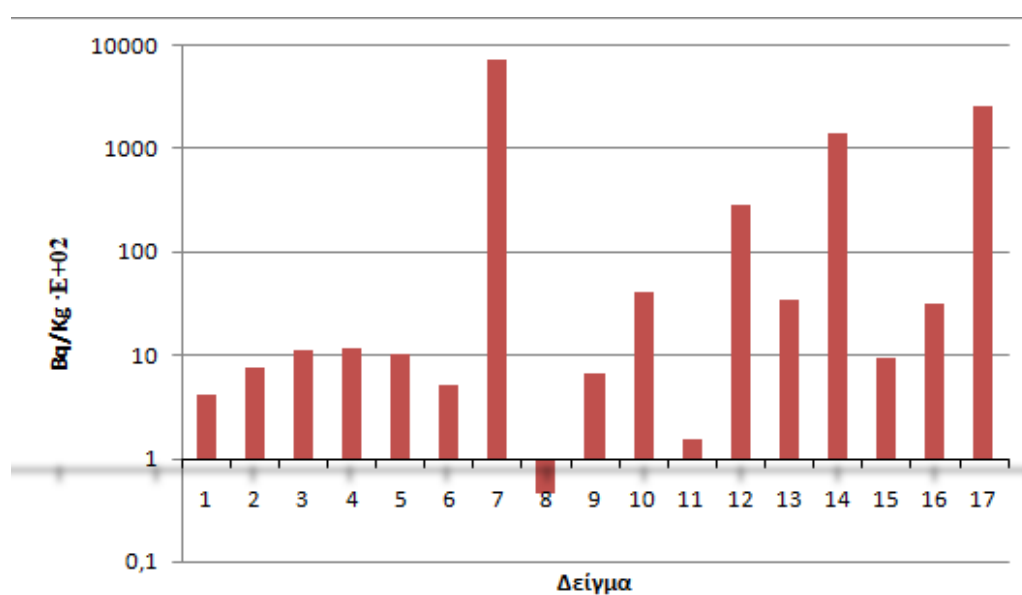
Δείγμα	Περιγραφή	Ειδική Ενεργότητα (Bq/kg)
1	Δοχείο θαλάμου ιονισμού	(4.22± 0.72)E+02
2	Βάση ράβδου	(7.55± 1.29)E+02
3	Σωλήνας περιστροφικής ακτινοβόλησης	(11.1± 1.90)E+02
4	Σωλήνας μεταφοράς δειγμάτων	(11.7± 2.00)E+02
5	Θάλαμος ιονισμού	(10.2± 1.75)E+02
6	Τάπα grid plate	(5.06± 0.86)E+02
7	Τάπα grid plate	(7.23± 1.24)E+05
8	Δοχείο θαλάμου σχάσεως	(0.45± 0.07)E+02
9	Δοχείο θαλάμου ιονισμού	(6.78± 1.16)E+02
10	Τάπα grid plate	(41.6± 7.14)E+02
11	Οδηγός ράβδου ασφαλείας	(1.54± 0.26)E+02
12	Περιστροφική βάση	(284.39± 48.91)E+02
13	Δοχείο ακτινοβόλησης δειγμάτων	(34.52± 5.92)E+02
14	Δαχτυλίδι κεντραρίσματος	(1.43± 0.24)E+05
15	Τάπα grid plate	(9.60± 1.64)E+02
16	Θάλαμος ιονισμού	(31.64± 5.43)E+02
17	Τάπα grid plate	(2.67± 0.45)E+05

Η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων προέρχεται από τις παρακάτω πηγές:

- a) Στατιστική των μετρήσεων (~5-10%)
- b) Αβεβαιότητα ενεργότητας πηγών (~3%)
- c) Στατιστική στοχαστικών υπολογισμών (~3%)
- d) Αβεβαιότητα διορθωτικών παραγόντων (~3-8%)

Αν ληφθούν υπόψη οι παραπάνω αβεβαιότητες, προκύπτει συνολική αβεβαιότητα ~15-20%. Τονίζεται ότι για τον σκοπό της εργασίας είναι αρκετά ικανοποιητική. Ωστόσο, πρέπει να τονισθεί ότι πολλά από τα δείγματα δεν είναι ομοιόμορφα ενεργοποιημένα αλλά μόνο στο κάτω μέρος τους που ήταν και πλησιέστερα στον πυρήνα του αντιδραστήρα. Συμπεριλαμβανομένου και άλλων παρόμοιων παραδοχών, η συνολική αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων είναι μεγαλύτερη.

Λαμβάνοντας υπόψη τα όρια της Εθνικής Νομοθεσίας και τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα, προκύπτει:



Σχήμα 18: Ειδική ενεργότητα Co-60 των δειγμάτων. Το όριο εξαιρέσεως είναι 100 Bq/kg.

Στο σχήμα 18 φαίνονται οι ειδικές ενεργότητες των δειγμάτων. Συγκεκριμένα η έντονη μαύρη γραμμή είναι το όριο εξαιρέσεως της Εθνικής Νομοθεσίας για το Co-60 (100 Bq/kg) [9]. Έτσι προκύπτει ότι όλα τα δείγματα βρίσκονται πάνω από το όριο για το Co-60 εκτός από το δείγμα 8.

4. Συζήτηση

4.1) Μέθοδοι χαρακτηρισμού

Πληροφορίες για τον ραδιολογικό χαρακτηρισμό υλικών παίρνουμε με διάφορα τεκμήρια. Για παράδειγμα:

- a) Με υπολογισμούς στην περίπτωση των ενεργοποιημένων προϊόντων.
- b) Με έμμεσες εκτιμήσεις από άλλες πληροφορίες που χαρακτηρίζουν το δείγμα, όπως για παράδειγμα ο υπολογισμός της ενεργότητας.

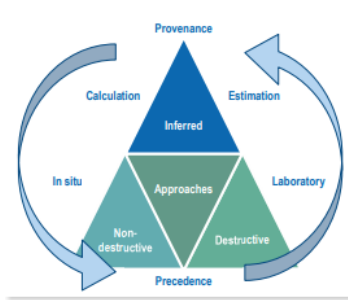
Υπάρχουν δύο γενικές πειραματικές μέθοδοι για να πάρουμε αυτά τα τεκμήρια:

- a) Μη καταστροφικές τεχνικές, χρησιμοποιώντας συνήθως την μέθοδο in-situ-φασματοσκοπίας
- b) Καταστροφικές τεχνικές, με χρήση ραδιοχημικών τεχνικών, που γίνονται συνήθως σε εργαστήρια.

Συνήθως ένας συνδυασμός των δύο τεχνικών μας δίνει τη πιο αποτελεσματική εκτίμηση της ισοτοπικής συγκέντρωσης του δείγματος. Για παράδειγμα σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε υπολογισμούς της ενεργότητας, για να εκτιμήσουμε τα ενεργοποιημένα ραδιοϊσότοπα στο υλικό.

Επίσης με λεπτομερή δειγματοληψία και εργαστηριακή ανάλυση μπορούμε να υπολογίσουμε συντελεστές αναλογίας για τον χαρακτηρισμό συγκεκριμένων δειγμάτων.

Εφόσον με άλλες τεχνικές χαρακτηρισμού, όπως για παράδειγμα υπολογιστικές ή ραδιοχημικές τεχνικές, έχει γίνει εκτίμηση της συγκέντρωσης των ραδιονουκλιδίων σε ένα δείγμα και με την υπόθεση ότι ο λόγος αυτών των νουκλιδίων μπορεί να θεωρηθεί σταθερός ως προς ένα ραδιοϊσότοπο το οποίο εκπέμπει ακτινοβολία γ και μπορεί να μετρηθεί με χρήση της τεχνικής in-situ γ -φασματοσκοπίας, τότε προσδιορίζοντας πειραματικά την ενεργότητα του συγκεκριμένου ισοτόπου (όπως για παράδειγμα το Co-60 στην παρούσα εργασία) μπορούμε να εκτιμήσουμε την συγκέντρωση και των άλλων ραδιοϊσοτόπων στο δείγμα, που δεν εκπέμπουν ακτινοβολία γ (όπως για παράδειγμα το Fe-55 που εκπέμπει ακτινοβολία β) [8].



Σχήμα 19: Μεθοδολογία χαρακτηρισμού

Στο σχήμα 19 απεικονίζεται η ροή του ραδιολογικού χαρακτηρισμού. Φαίνονται οι δύο προσεγγίσεις καταστροφικές (εργαστηριακές τεχνικές) και μη καταστροφικές (τεχνική in-situ γ-φασματοσκοπία) και με συνδυασμό των δύο βγαίνει το τελικό συμπέρασμα.

4.2) Συζήτηση αποτελεσμάτων

Στο υπολογιστικό μέρος κάναμε προσομοιώσεις της πειραματικής διάταξης ανιχνευτή Exploranium GR-135 MiniSpec για τον προσδιορισμό της ενεργότητας 17 δειγμάτων, που βρίσκονται σε προσωρινό αποθηκευτικό χώρο του εργαστηρίου του ερευνητικού αντιδραστήρα, με χρήση του κώδικα MCNP. Οι προσομοιώσεις έγιναν για απλές γεωμετρίες ομογενών πηγών.

Στο πειραματικό μέρος έγινε η πειραματική βαθμονόμηση του ανιχνευτή. Η σύγκριση των θεωρητικών τιμών με τα αποτελέσματα των μετρήσεων επέτρεψε την εκτίμηση διορθωτικού συντελεστή που υπολογίστηκε 0.647 ± 0.77 . Επιπλέον υπολογίστηκε ο διορθωτικός παράγοντας λόγω της παρουσίας πλάκας σκυροδέματος στις μετρήσεις που οφείλεται στις σκεδάσεις φωτονίων στο δάπεδο και υπολογίστηκε μικρότερος από **2.5%** για ενέργειες φωτονίων 0.2-1.2 MeV.

Επίσης υπολογίστηκε ο διορθωτικός παράγοντας εσωτερικής απορρόφησης f_{abs} και η ειδική ενεργότητα (Bq/kg) των δειγμάτων.

Μετρήθηκαν 17 δείγματα ραδιενεργών αντικειμένων που φυλάσσονται στη θωρακισμένη αποθήκη προσωρινής φύλαξης ραδιενεργών υλικών του ερευνητικού αντιδραστήρα. Αφού καταγράφηκαν οι διαστάσεις και η μάζα των δειγμάτων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις φασματοσκοπίας-γ με τον ανιχνευτή σε απόσταση 25 cm από το δείγμα.

Τα κύρια ραδιοϊσότοπα που ανιχνεύτηκαν ήταν το Co-60 και το Cs-137. Τα υπόλοιπα ραδιοϊσότοπα είναι εκπομποί ακτινοβολίας-β, έχουν μικρό χρόνο ημιζωής και

επομένως η ενεργότητα τους έχει μειωθεί λόγω των ραδιενεργών διασπάσεων, είτε βρίσκονται σε συγκεντρώσεις κάτω από το ελάχιστο όριο ανίχνευσης της μέτρησης.

Για να προσδιορισθούν οι πιθανοί εκπομποί ακτινοβολίας-β θα πρέπει να πραγματοποιηθούν ραδιοχημικές αναλύσεις των δειγμάτων, διαδικασία αρκετά χρονοβόρα και με μεγάλο οικονομικό κόστος.

Με βάση τα όρια της Εθνικής Νομοθεσίας προστασίας για το Co-60 (**100 Bq/kg**) η ρύπανση όλων των δειγμάτων είναι άνω των επιτρεπτών ορίων εξαίρεσης από τους κανονισμούς ακτινοπροστασίας και επομένως πρέπει να διαχειριστούν σαν ραδιενεργά κατάλοιπα (Very Low Level Radioactive Waste) [9].

Συγκεκριμένα τα δείγματα 7, 14 και 17 παρουσιάζουν ειδική ενεργότητα πολύ υψηλότερη από το όριο 10^2 Bq/kg και πρέπει να φυλαχθούν σε ειδικό χώρο. Ενώ το δείγμα 8 είναι κάτω του ορίου υπεξαίρεσης με ειδική ενεργότητα 45 Bq/kg και μπορεί να δοθεί σαν κοινό κατάλοιπο για ανακύκλωση.

Τα υπόλοιπα δείγματα εφόσον εξακολουθούν να βρίσκονται πάνω από τα όρια εξαίρεσης, θα πρέπει να αποθηκευτούν σε θωρακισμένο ειδικό αποθηκευτικό χώρο.

5. Συμπεράσματα

Σκοπός της εργασίας μας ήταν η ανάπτυξη μιας τεχνικής με συνδυασμό πειραματικών μετρήσεων με τον ανιχνευτή Explorerium GR-135 MiniSpec και θεωρητικών υπολογισμών μέσω προσομοιώσεων με τον κώδικα MCNP. Σκοπός μας ήταν η χρήση της τεχνικής για τον προσδιορισμό της ειδικής ενεργότητας διάφορων ραδιενεργών δειγμάτων που φυλάσσονται στον ερευνητικό πυρηνικό αντιδραστήρα του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος.

Τα δεδομένα εισόδου του κώδικα ήταν οι απλές γεωμετρίες των δειγμάτων, η πυκνότητα και η σύσταση των υλικών και η απόσταση από το γεωμετρικό κέντρο του ανιχνευτή, όπως αναγράφονται στο Κεφάλαιο 2.

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, οι διαστάσεις, το βάρος και οι μετρήσεις των δειγμάτων καταγράφηκαν σε ειδικό πίνακα και με το τέλος της διαδικασίας τα δείγματα τοποθετήθηκαν πίσω στον χώρο αποθήκευσής τους.

Με τη σύγκριση των πειραματικών και των υπολογιστικών μετρήσεων υπολογίστηκαν οι διορθωτικοί παράγοντες των απωλειών λόγω των υποθέσεων της προσομοίωσης του ανιχνευτή, σκεδάσεων λόγω της παρουσίας δαπέδου και της εσωτερικής απορρόφησης των δειγμάτων.

Ο υπολογισμός της ειδικής ενεργότητας των δειγμάτων έδειξε ότι τα δείγματα είναι άνω του ορίου εξαίρεσης της Ελληνικής Νομοθεσίας και μέχρι να μειωθεί η ενεργότητα τους δεν μπορούν να δοθούν για ανακύκλωση αλλά πρέπει να αποθηκευτούν σε θωρακισμένο χώρο.

Τέλος, συμπεραίνουμε ότι η τεχνική που αναπτύχθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για μελλοντικούς υπολογισμούς με τον συγκεκριμένο ανιχνευτή για δείγματα διαφορετικής γεωμετρίας και ρύπανσης.

6.Βιβλιογραφία

1. <https://eeae.gr/ασφάλεια-ακτινοβολιών/διαχείριση-ραδιενεργών-αποβλήτων>
2. J. K. Shultis, R. E. Faw, MCNP Primer, Kansas State University, KS 6650 (2011).
3. Exploranium, GR-135G Plus The Identifier System Manual, Revision 1.0 (2006).
4. J. E. Martin, Physics for Radiation Protection, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, (2006), ISBN: 3-527-40611-5.
5. T. J. Eckert, Efficiency calibration of NaI detectors for a measurement of the $^{12}\text{C}(n, 2n)^{11}\text{C}$ cross section, BSc Thesis, Department of Physics Houghton College (2016).
6. G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, Inc. New York, Third Edition, (2000).
7. G. R. Gilmore, Practical Gamma-ray Spectrometry – 2nd Edition, John Wiley & Sons, (2008), Ltd. ISBN: 978-0-470-86196-7.
8. Nuclear energy agency organisation for economic co-operation and development, Radiological Characterisation from a Waste and Materials End-State Perspective: Practices and Experience, NEA No. 7373,(2017).
9. IAEA Safety standards series No. SSR-6 (Rev. 1), Regulations for the safe transport of radioactive material 2018 edition specific safety requirements, international atomic energy agency Vienna, (2018).

7. Παραρτήματα

7.1) Κώδικας MCNP

```

Chr1-Am241-E1 - Notepad
File Edit Format View Help
CHRISTOS THEMELIS Co-60 WITH EXPLORANIUM DETECTOR GR-130 MINISPEC
c
c NaI detector inside ABS plastic box inside Air cube with Am-241 source
c
c cell cards
c
1 1 -3.67 -1 imp:p=1 $ NaI detector
2 2 -0.0012 2 -3 4 -5 6 -7 #1 imp:p=1 $ air box
3 3 -1.05 8 -9 10 -11 12 -13 #1 #2 imp:p=1 $ ABS box
4 2 -0.0012 14 -15 16 -17 18 -19 #1 #2 #3 imp:p=1 $ air box
5 0 -14 : 15 : -16 : 17 : -18 : 19 imp:p=0 $ outside
c
c
c surface cards
c
1 rcc -1.81 0 0 3.62 0 0 2.54 $ NaI detector
2 px -3.23 $ Air box
3 px 3.23
4 py -3.88
5 py 3.88
6 pz -3.88
7 pz 3.88
8 px -4.5 $ ABS box
9 px 4.5
10 py -5.15
11 py 5.15
12 pz -5.15
13 pz 5.15
14 px -40 $ Air Box
15 px 40
16 py -40
17 py 40
18 pz -40
19 pz 40
c
c
c data cards
c
mode p
c

```

```

mode p
c
c source specification Am241
c
sdef pos=-25 0 0 erg=d1
sil L 0.0595
spl 0.359
E8 0.05 0.055 0.06 0.07 0.08 0.09 0.1 0.11 0.12 0.13 0.14
0.15 0.16 0.17 0.18 0.19 0.2 0.21 0.22 0.23 0.24
0.25 0.26 0.27 0.28 0.29 0.3 0.31 0.32 0.33 0.34
0.35 0.36 0.37 0.38 0.39 0.4 0.41 0.42 0.43 0.44
0.45 0.46 0.47 0.48 0.49 0.5 0.51 0.52 0.53 0.54
0.55 0.56 0.57 0.58 0.59 0.6 0.61 0.62 0.63 0.64
0.65 0.66 0.67 0.68 0.69 0.7 0.71 0.72 0.73 0.74
0.75 0.76 0.77 0.78 0.79 0.8 0.81 0.82 0.83 0.84
0.85 0.86 0.87 0.88 0.89 0.9 0.91 0.92 0.93 0.94
0.95 0.96 0.97 0.98 0.99 1.0 1.01 1.02 1.03 1.04
1.05 1.06 1.07 1.08 1.09 1.1 1.11 1.12 1.13 1.14
1.15 1.16 1.17 1.18 1.19 1.2 1.21 1.22 1.23 1.24
1.25 1.26 1.27 1.28 1.29 1.3 1.31 1.32 1.33 1.34
1.35 1.36 1.37 1.38 1.39 1.4 1.41 1.42 1.43 1.44
c tallies specification
c
f8:p 1
c material cards
c
m3 6000 15 $ ABS
1000 17
7000 1
m1 11000 -15.34 $ NaI
53000 -84.66
m2 7014 -0.7808 $ air
8016 -0.2095
18000 -0.0093
c
c problem cut-offs
c
ctme 1
nps 10000000000

```

Σχήμα 21: Κώδικας MCNP για σημειακές πηγές

```

c cell cards
c
1 1 -3.67 -1 imp:p=1 $ NaI detector
2 2 -0.0012 2 -3 4 -5 6 -7 #1 imp:p=1 $ air box
3 3 -1.05 8 -9 10 -11 12 -13 #1 #2 imp:p=1 $ ABS box
4 2 -0.0012 -14 #1 #2 #3 imp:p=1 $ air box
5 0 14 imp:p=0 $ Outside
c
c
c surface cards
c
1 rcc -1.81 0 0 3.62 0 0 2.54 $ NaI detector
2 px -3.23 $ Air box
3 px 3.23
4 py -3.88
5 py 3.88
6 pz -3.88
7 pz 3.88
8 px -4.5 $ ABS box
9 px 4.5
10 py -5.15
11 py 5.15
12 pz -5.15
13 pz 5.15
14 rcc -26 0 0 50 0 0 50 $ Air Box
c
c
c data cards
c
mode p
c
c source specification Cd109

```

```

sdef pos=-25 0 0 axs=1 0 0 ext=0 rad=d1 par=2 erg=0.0595
si1 0 50
sp1 -21 1
E8 0.05 0.055 0.06 0.07 0.08 0.085 0.09 0.1 0.11 0.12 0.13 0.14
0.15 0.16 0.17 0.18 0.19 0.2 0.21 0.22 0.23 0.24
0.25 0.26 0.27 0.28 0.29 0.3 0.31 0.32 0.33 0.34
0.35 0.36 0.37 0.38 0.39 0.4 0.41 0.42 0.43 0.44
0.45 0.46 0.47 0.48 0.49 0.5 0.51 0.52 0.53 0.54
0.55 0.56 0.57 0.58 0.59 0.6 0.61 0.62 0.63 0.64
0.65 0.66 0.67 0.68 0.69 0.7 0.71 0.72 0.73 0.74
0.75 0.76 0.77 0.78 0.79 0.8 0.81 0.82 0.83 0.84
0.85 0.86 0.87 0.88 0.89 0.9 0.91 0.92 0.93 0.94
0.95 0.96 0.97 0.98 0.99 1.0 1.01 1.02 1.03 1.04
1.05 1.06 1.07 1.08 1.09 1.1 1.11 1.12 1.13 1.14
1.15 1.16 1.17 1.18 1.19 1.2 1.21 1.22 1.23 1.24
1.25 1.26 1.27 1.28 1.29 1.3 1.31 1.32 1.33 1.34
1.35 1.36 1.37 1.38 1.39 1.4 1.41 1.42 1.43 1.44
c
c tallies specification
c
f8:p 1
c material cards
c
m3 6000 15 $ ABS
1000 17
7000 1
m1 11000 -15.34 $ NaI
53000 -84.66
m2 7014 -0.7808 $ air
8016 -0.2095
18000 -0.0093
c
c problem cut-offs
c
ctme 1
nps 10000000000

```

Σχήμα 22: Κώδικας MCNP για παραλληλεπίπεδες πηγές

```

c cell cards
c
1 1 -3.67 -1 imp:p=1 $ NaI detector
2 2 -0.0012 2 -3 4 -5 6 -7 #1 imp:p=1 $ air box
3 3 -1.05 8 -9 10 -11 12 -13 #1 #2 imp:p=1 $ ABS box
4 4 -2.7 -14 imp:p=1
5 2 -0.0012 -15 #1 #2 #3 #4 imp:p=1 $ air box
6 0 15 imp:p=0 $ Outside
c
c
c surface cards
c
1 rcc -1.81 0 0 3.62 0 0 2.54 $ NaI detector
2 px -3.23 $ Air box
3 px 3.23
4 py -3.88
5 py 3.88
6 pz -3.88
7 pz 3.88
8 px -4.5 $ ABS box
9 px 4.5
10 py -5.15
11 py 5.15
12 pz -5.15
13 pz 5.15
14 rcc -25 -25 0 0 50 0 0.5
15 rcc -52 0 0 100 0 0 60
c
c
c data cards
c
mode p

c source specification Am241
c
sdef cell=4 erg=0.0595 pos= -25 -25 0 axs=0 1 0 rad=d1 ext=d2
si1 0 0.5
sp1 -21 1
si2 0 50
sp2 -21 0
c
c tallies specification
c
f8:p 1
E8 0.05 0.055 0.06 0.07 0.08 0.09 0.1 0.11 0.12 0.13 0.14
0.15 0.16 0.17 0.18 0.19 0.2 0.21 0.22 0.23 0.24
0.25 0.26 0.27 0.28 0.29 0.3 0.31 0.32 0.33 0.34
0.35 0.36 0.37 0.38 0.39 0.4 0.41 0.42 0.43 0.44
0.45 0.46 0.47 0.48 0.49 0.5 0.51 0.52 0.53 0.54
0.55 0.56 0.57 0.58 0.59 0.6 0.61 0.62 0.63 0.64
0.65 0.66 0.67 0.68 0.69 0.7 0.71 0.72 0.73 0.74
0.75 0.76 0.77 0.78 0.79 0.8 0.81 0.82 0.83 0.84
0.85 0.86 0.87 0.88 0.89 0.9 0.91 0.92 0.93 0.94
0.95 0.96 0.97 0.98 0.99 1.0 1.01 1.02 1.03 1.04
1.05 1.06 1.07 1.08 1.09 1.1 1.11 1.12 1.13 1.14
1.15 1.16 1.17 1.18 1.19 1.2 1.21 1.22 1.23 1.24
1.25 1.26 1.27 1.28 1.29 1.3 1.31 1.32 1.33 1.34
1.35 1.36 1.37 1.38 1.39 1.4 1.41 1.42 1.43 1.44
c
c material cards
c
m3 6000 15 $ ABS
1000 17
7000 1
m1 11000 -15.34 $ NaI
53000 -84.66
m2 7014 -0.7808 $ air
8016 -0.2095
18000 -0.0093
<
m2 7014 -0.7808 $ air
8016 -0.2095
18000 -0.0093
m4 13000 1 $ Fe
c
c problem cut-offs
c
ctme 1
nps 10000000000

```

Σχήμα 23: Κώδικας MCNP για κυλινδρικές πηγές

```

c cell cards
c
1 1 -3.67 -1 imp:p=1 $ NaI detector
2 2 -0.0012 2 -3 4 -5 6 -7 #1 imp:p=1 $ air box
3 3 -1.05 8 -9 10 -11 12 -13 #1 #2 imp:p=1 $ ABS box
4 4 -2.7 -14 imp:p=1
5 2 -0.0012 -15 #1 #2 #3 #4 imp:p=1 $ air box
6 0 15 imp:p=0 $ Outside
c
c
c
c surface cards
c
1 rcc -1.81 0 0 3.62 0 0 2.54 $ NaI detector
2 px -3.23 $ Air box
3 px 3.23
4 py -3.88
5 py 3.88
6 pz -3.88
7 pz 3.88
8 px -4.5 $ ABS box
9 px 4.5
10 py -5.15
11 py 5.15
12 pz -5.15
13 pz 5.15
14 sph -25 0 0 1
15 rcc -52 0 0 100 0 0 60
c
c
c data cards
c
mode p

sdef cell=4 erg=0.0595 pos= -25 0 0 rad=d1
si1 0 1
sp1 -21 2
E8 0.05 0.055 0.06 0.07 0.08 0.09 0.1 0.11 0.12 0.13 0.14
0.15 0.16 0.17 0.18 0.19 0.2 0.21 0.22 0.23 0.24
0.25 0.26 0.27 0.28 0.29 0.3 0.31 0.32 0.33 0.34
0.35 0.36 0.37 0.38 0.39 0.4 0.41 0.42 0.43 0.44
0.45 0.46 0.47 0.48 0.49 0.5 0.51 0.52 0.53 0.54
0.55 0.56 0.57 0.58 0.59 0.6 0.61 0.62 0.63 0.64
0.65 0.66 0.67 0.68 0.69 0.7 0.71 0.72 0.73 0.74
0.75 0.76 0.77 0.78 0.79 0.8 0.81 0.82 0.83 0.84
0.85 0.86 0.87 0.88 0.89 0.9 0.91 0.92 0.93 0.94
0.95 0.96 0.97 0.98 0.99 1.0 1.01 1.02 1.03 1.04
1.05 1.06 1.07 1.08 1.09 1.1 1.11 1.12 1.13 1.14
1.15 1.16 1.17 1.18 1.19 1.2 1.21 1.22 1.23 1.24
1.25 1.26 1.27 1.28 1.29 1.3 1.31 1.32 1.33 1.34
1.35 1.36 1.37 1.38 1.39 1.4 1.41 1.42 1.43 1.44
c tallies specification
c
f8:p 1
c material cards
c
m3 6000 15 $ ABS
1000 17
7000 1
m1 11000 -15.34 $ NaI
53000 -84.66
m2 7014 -0.7808 $ air
8016 -0.2095
18000 -0.0093
m4 13000 1 $ Fe
c
c problem cut-offs
c
ctme 1
nps 1000000000

```

Σχήμα 24: Κώδικας MCNP για σφαιρικές πηγές

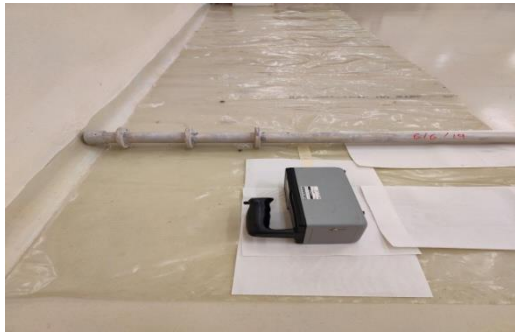
```

c cell cards
c
1 1 -3.67 -1 imp:p=1 $ NaI detector
2 2 -0.0012 2 -3 4 -5 6 -7 #1 imp:p=1 $ air box
3 3 -1.05 8 -9 10 -11 12 -13 #1 #2 imp:p=1 $ ABS box
4 2 -0.0012 -14 imp:p=1 $ Air tube
5 4 -2.7 -15 #4 imp:p=1 $ Al tube
6 2 -0.0012 -16 #1 #2 #3 #4 #5 imp:p=1 $ air cylinder
7 0 16 imp:p=0 $ Outside
c
c
c surface cards
c
1 rcc -1.81 0 0 3.62 0 0 2.54 $ NaI detector
2 px -3.23 $ Air box
3 px 3.23
4 py -3.88
5 py 3.88
6 pz -3.88
7 pz 3.88
8 px -4.5 $ ABS box
9 px 4.5
10 py -5.15
11 py 5.15
12 pz -5.15
13 pz 5.15
14 rcc -33.3 -50 0 0 100 0 3.47
15 rcc -33.3 -50 0 0 100 0 3.8
16 rcc -90 0 0 150 0 0 90
c
c
c data cards
mode p
c
c source specification Am241
c
sdef cel=5 erg=1.17 pos=-33.3 -50 0 axs=0 1 0 rad=d1 ext=d2
si1 3.47 3.8
si2 0 100
sp2 -21 0
c
c tallies specification
c
f8:p 1
E8 0.05 0.055 0.06 0.07 0.08 0.09 0.1 0.11 0.12 0.13 0.14
0.15 0.16 0.17 0.18 0.19 0.2 0.21 0.22 0.23 0.24
0.25 0.26 0.27 0.28 0.29 0.3 0.31 0.32 0.33 0.34
0.35 0.36 0.37 0.38 0.39 0.4 0.41 0.42 0.43 0.44
0.45 0.46 0.47 0.48 0.49 0.5 0.51 0.52 0.53 0.54
0.55 0.56 0.57 0.58 0.59 0.6 0.61 0.62 0.63 0.64
0.65 0.66 0.67 0.68 0.69 0.7 0.71 0.72 0.73 0.74
0.75 0.76 0.77 0.78 0.79 0.8 0.81 0.82 0.83 0.84
0.85 0.86 0.87 0.88 0.89 0.9 0.91 0.92 0.93 0.94
0.95 0.96 0.97 0.98 0.99 1.0 1.01 1.02 1.03 1.04
1.05 1.06 1.07 1.08 1.09 1.1 1.11 1.12 1.13 1.14
1.15 1.16 1.17 1.18 1.19 1.2 1.21 1.22 1.23 1.24
1.25 1.26 1.27 1.28 1.29 1.3 1.31 1.32 1.33 1.34
1.35 1.36 1.37 1.38 1.39 1.4 1.41 1.42 1.43 1.44
c
c material cards
c
m3 6000 15 $ ABS
1000 17
7000 1
m1 11000 -15.34 $ NaI
53000 -84.66
m2 7014 -0.7808 $ air
8016 -0.2095
<
m2 7014 -0.7808 $ air
8016 -0.2095
18000 -0.0093
m4 13000 1 $ Fe
c
c problem cut-offs
c
ctme 1
nps 1000000000

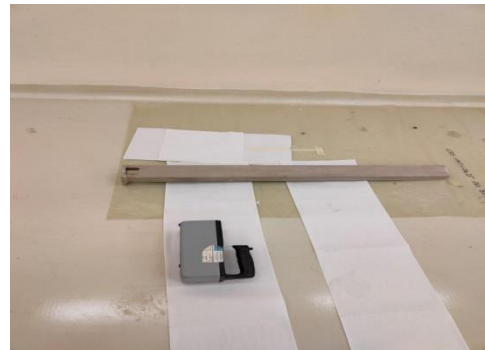
```

Σχήμα 25: Κώδικας MCNP για κοίλες κυλινδρικές πηγές (σωλήνες)

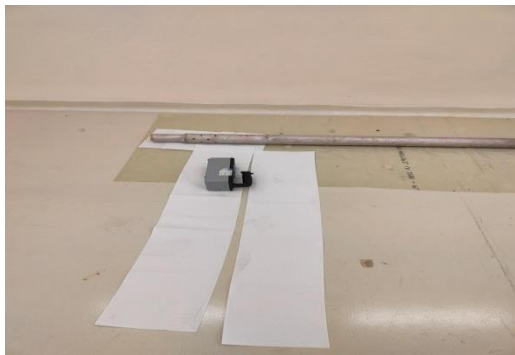
7.2) Φωτογραφίες Δειγμάτων



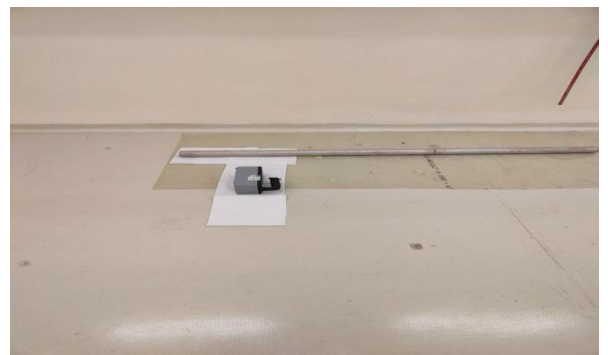
Σχήμα 26: Πρώτο δείγμα, Δοχείο θαλάμου ιονισμού



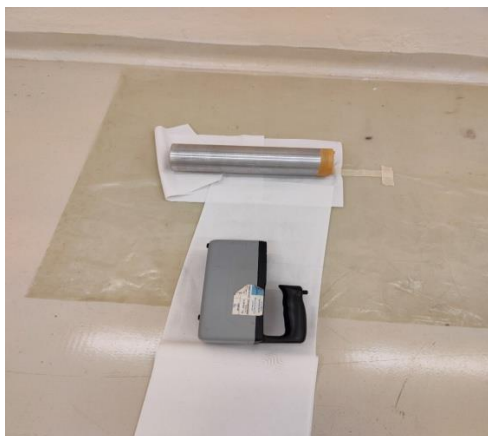
Σχήμα 27: Δεύτερο δείγμα, Βάση ράβδου rapid



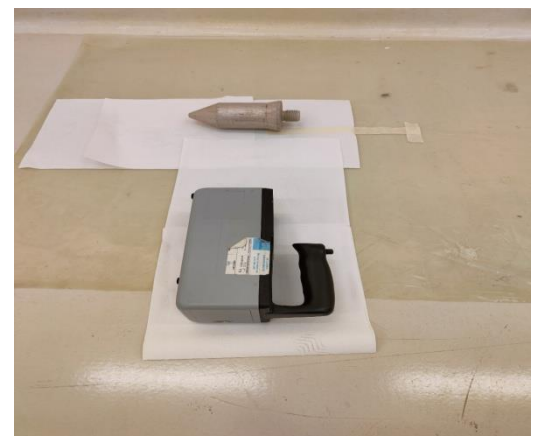
Σχήμα 28: Τρίτο δείγμα, Σωλήνας ακτινοβολήσης περιστροφικών δειγμάτων



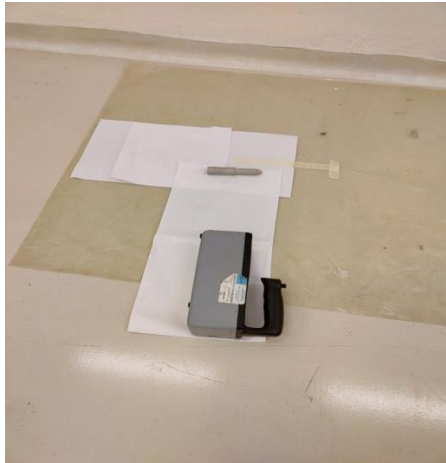
Σχήμα 29: Τέταρτο δείγμα, Σωλήνας τοποθέτησης δειγμάτων rapid



Σχήμα 30: Πέμπτο δείγμα, Θάλαμος ιονισμού



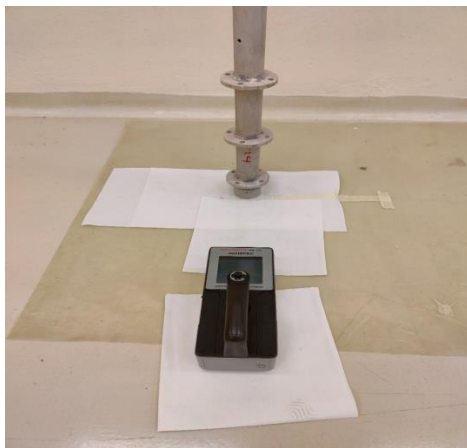
Σχήμα 31: Έκτο δείγμα, Μεγάλη τάπα "πρόχειρης" χρήσεως



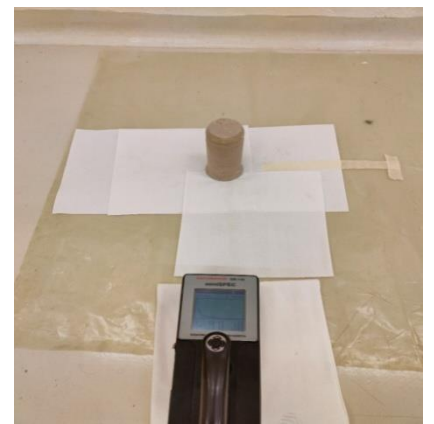
Σχήμα 32: Έβδομο δείγμα, μικρή τάπα



Σχήμα 33: Όγδοο δείγμα, δοχείο θαλάμου σχάσεως



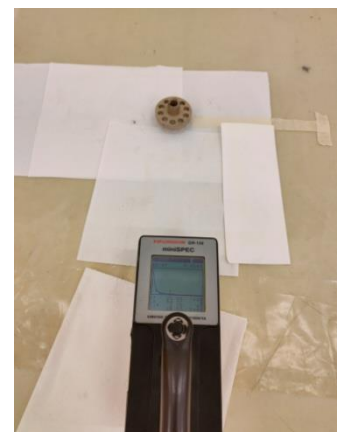
Σχήμα 34: Ένατο δείγμα, δοχείο θαλάμου ιονισμού



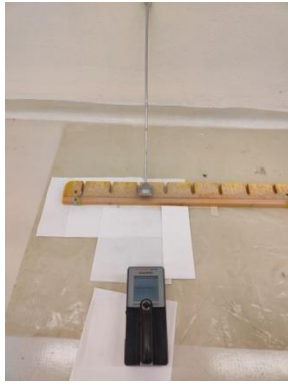
Σχήμα 35: Δέκατο δείγμα, μεγάλη τάπα



Σχήμα 36: Ενδέκατο δείγμα, guide tube



Σχήμα 37: Δωδέκατο δείγμα, βάση περιστροφικών δειγμάτων



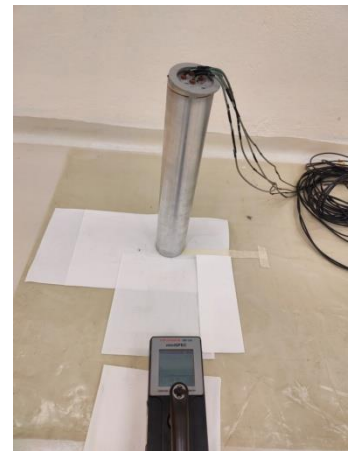
Σχήμα 38: Δέκατο τρίτο δείγμα, δοχείο ακτινοβολούμενων δειγμάτων



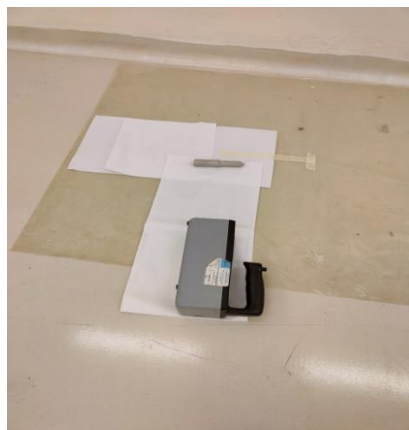
Σχήμα 39: Δέκατο τέταρτο δείγμα, δαχτυλίδι βάσης για κεντράρισμα σωλήνων



Σχήμα 40: Δέκατο Πέμπτο δείγμα, μικρή τάπα



Σχήμα 41: Δέκατο έκτο δείγμα, θάλαμος ιονισμού



Σχήμα 42: Δέκατο έβδομο δείγμα, μικρή τάπα