



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΙΑΤΡΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΟΣ-ΚΛΙΝΙΚΟΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΩΝ ΜΕ ΜΕΤΡΗΤΗ ΟΛΟΣΩΜΗΣ
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ**

**ΣΤΡΑΤΟΣ Θ. ΒΑΛΑΚΗΣ
ΦΥΣΙΚΟΣ ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΟΥ-ΑΚΤΙΝΟΦΥΣΙΚΟΣ ΙΑΤΡΙΚΗΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2013



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΙΑΤΡΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΟΣ-ΚΛΙΝΙΚΟΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΩΝ ΜΕ ΜΕΤΡΗΤΗ ΟΛΟΣΩΜΗΣ
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ**

**ΣΤΡΑΤΟΣ Θ. ΒΑΛΑΚΗΣ
ΦΥΣΙΚΟΣ ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΟΥ-ΑΚΤΙΝΟΦΥΣΙΚΟΣ ΙΑΤΡΙΚΗΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2013

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ιατρική Σχολή του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα Ν. 5343/32, άρθρο 202, παράγραφος 2 (νομική κατοχύρωση του Ιατρικού Τμήματος)

Ημερομηνία αίτησης του κ. Βαλάκη Στράτου: 20-5-2008

Ημερομηνία ορισμού Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής: 638^α/3-6-2008

Μέλη Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής:

Επιβλέπων

Καλέφ -Εζρά Τζων Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής Ιατρικής Σχολής Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Μέλη

Φωτόπουλος Ανδρέας Επίκουρος Καθηγητής Πυρηνικής Ιατρικής, Ιατρικής Σχολής Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Σταματελάτος Ίωνας Ερευνητής Α' ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ

Ημερομηνία ορισμού θέματος: 14-7-2008

«Ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων μέτρησης ραδιονουκλιδίων με μετρητή ολόσωμης ακτινοβολίας»

ΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΤΑΜΕΛΟΥΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ : 742^α/25-9-2012

Αργυροπούλου Μαρία	Καθηγήτρια Ακτινολογίας Ιατρικής Σχολής Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
Καλέφ-Εζρά Τζων	Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής Ιατρικής Σχολής Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
Κάππας Κωνσταντίνος	Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής Ιατρικής Σχολής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας
Φωτόπουλος Ανδρέας	Αναπληρωτής Καθηγητής Πυρηνικής Ιατρικής, Ιατρικής Σχολής Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
Θεοδώρου Κυριακή	Επίκουρη Καθηγήτρια Ιατρικής Φυσικής - Πληροφορικής Ιατρικής Σχολής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας
Ιωαννίδης Κωνσταντίνος	Επίκουρος Καθηγητής Πυρηνικής Φυσικής Τμήματος Φυσικής Πανεπιστημίου Ιωαννίνων
Λεοντίου Ιωάννης	Επίκουρος Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής Ιατρικής Σχολής Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Έγκριση Διδακτορικής Διατριβής με βαθμό «ΑΡΙΣΤΑ» στις 15-12-2012

ΠΡΟΕΔΡΟΣ ΤΗΣ ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗΣ

Μαργαρίτα Τζαφλίδου

Καθηγήτρια Ιατρικής Φυσικής



*Στη μητέρα μου Ρένα
και στις αδελφές μου
Χριστίνα και Νικολέτα*

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων και στο Εργαστήριο Ερευνητικού Αντιδραστήρα του Ινστιτούτου Πυρηνικής Τεχνολογίας και Ακτινοπροστασίας του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος».

Με αφορμή την ολοκλήρωση του κύκλου μεταπτυχιακών σπουδών στο Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη και τις ευχαριστίες μου στον καθηγητή κ. Τζων Καλέφ-Εζρά, καθηγητή Ιατρικής Φυσικής, για την ηθική υποστήριξη και την επιστημονική καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Ευχαριστώ θερμά τον Δρ. Ίωνα-Ευάγγελο Σταματελάτο, Ερευνητή Α στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» για την υποστήριξη και την επιστημονική γνώση και εμπειρία που μου προσέφερε κατά την παραμονή και απασχόληση μου στο Εργαστήριο Ερευνητικού Αντιδραστήρα.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον Αναπληρωτή καθηγητή κ. Ανδρέα Φωτόπουλο για το ενδιαφέρον, τις συμβουλές και την καθοδήγηση του κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ θερμά όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Πυρηνικής Ιατρικής του ΠΠΓΝΙ και το Προσωπικό του Εργαστηρίου Ιατρικής Φυσικής για τη συνεργασία και το ενδιαφέρον κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Ευχαριστώ θερμά την Δρ. Αναστασία Σαβίδου Ερευνήτρια Β στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» και τους ακτινοφυσικούς του ίδιου Κέντρου Δρ. Φαίdra Τζίκα και Δρ. Δημήτρη Κοντογεωργάκο για την συνεργασία και συμπαράσταση τους.

Επιθυμώ να εκφράσω ιδιαίτερες ευχαριστίες στην κα. Μαθίλδη Εσκινατζή, μέλος ΕΔΤΠ του Εργαστηρίου Ιατρικής Φυσικής, για τη φιλοξενία, την ηθική συμπαράσταση της και το ευγενικό της χαμόγελο.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον συνάδελφο Φυσικό κ. Χρήστο Γούλα για την φιλία του και την αμέριστη υποστήριξη που μου προσέφερε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την συμπαράσταση, την στήριξη και την υπομονή τους.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή

<i>1.1 Μέτρηση ραδιενέργειας στο ανθρώπινο σώμα</i>	1
<i>1.2 Φυσικές αρχές αλληλεπίδρασης φωτονίων με την ύλη</i>	2
<i>1.3 Γενικές αρχές ΜΟΑ</i>	3
1.3.1 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά διατάξεων	5
1.3.1.1 Γεωμετρικές μετρήσεις	5
1.3.1.2 Θωράκιση	6
1.3.1.3 Ανιχνευτές	7
1.3.1.4 Πυρηνικά ηλεκτρονικά	8
1.3.2 Χρήσεις ΜΟΑ	9
<i>1.4 Αντικείμενο της εργασίας</i>	9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Περιγραφή ΜΟΑ

<i>2.1 Εισαγωγή</i>	11
<i>2.2 Περιγραφή διάταξης</i>	11
2.2.1 Δωμάτιο εγκατάστασης ΜΟΑ	12
2.2.2 Μηχανολογική σχεδίαση ΜΟΑ	12
2.2.3 Ανιχνευτές	14
2.2.4 Ηλεκτρονικές μονάδες	16
2.2.5 Εξεταστική κλίνη	16
2.2.6 Εξαναγκασμένη κίνηση του αέρα	18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Κατασκευή πειραματικών ομοιωμάτων βαθμονόμησης & ποιοτικού ελέγχου

<i>3.1 Εισαγωγή</i>	20
<i>3.2 Φυσικά ομοιώματα</i>	20

<i>3.3 Υλικά και μέθοδοι</i>	22
<i>3.4 Αποτελέσματα</i>	32
<i>3.5 Συζήτηση</i>	36
<i>3.6 Συμπεράσματα</i>	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μέθοδοι ανάλυσης φασμάτων	
<i>4.1 Εισαγωγή</i>	39
<i>4.2 Περιγραφή μεθόδων επεξεργασίας φασμάτων</i>	39
<i>4.3 Υλικά και μέθοδοι</i>	42
<i>4.4 Αποτελέσματα</i>	45
<i>4.5 Ανάλυση -Συζήτηση</i>	52
<i>4.6 Συμπεράσματα</i>	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Μετρητικά χαρακτηριστικά συστήματος	
<i>5.1 Εισαγωγή</i>	67
<i>5.2 Περιγραφή των υπό μελέτη μεγεθών</i>	67
<i>5.3 Υλικά και μέθοδοι</i>	68
5.3.1 Βαθμονόμηση ανιχνευτών	68
5.3.2 Μελέτη απόκρισης συστήματος σε συνάρτηση με την ενεργότητα της πηγής	70
<i>5.4 Αποτελέσματα</i>	72
<i>5.5 Ανάλυση-Συζήτηση</i>	78
<i>5.6 Συμπεράσματα</i>	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Έλεγχος αξιοπιστίας μετρήσεων	
<i>6.1 Εισαγωγή</i>	84
<i>6.2 Ανασκόπηση αποτελεσμάτων-συζήτηση βιβλιογραφίας</i>	84
<i>6.3 Υλικά και μέθοδοι</i>	90

6.4 Αποτελέσματα	91
6.5 Συζήτηση-Ανάλυση	97
6.5.1 Ανάπτυξη εμπειρικής διόρθωσης	98
6.5.2 Μελέτη επίδρασης μεθόδου αερισμού στο υπόστρωμα του χώρου	101
6.5.3 Ελάχιστη ανιχνεύσιμη ενεργότητα	105
6.6 Συμπεράσματα	106

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Προσομοίωση με τη χρήση υπολογιστικού κώδικα

7.1 Εισαγωγή	107
7.2 Χαρακτηριστικά μοντέλου	107
7.2.1 Γεωμετρία και υλικά	108
7.2.2 Καταγραφή και αρχείο εξόδου	109
7.3 Έλεγχος ακρίβειας μοντέλου	110
7.3.1 Έλεγχος διαστάσεων ανιχνευτών	110
7.3.2 Επανεκτίμηση ενεργού όγκου ανιχνευτών	115
7.3.3 Πειραματικές μετρήσεις και υπολογισμοί με φυσικά ομοιώματα	118
7.4 Συζήτηση-Ανάλυση	119
7.5 Συμπεράσματα	120

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Βαθμονόμηση ΜΟΑ

8.1 Εισαγωγή	121
8.2 Υλικά και μέθοδοι	122
8.3 Αποτελέσματα	126
8.4 Συζήτηση-Ανάλυση	131
8.5 Συμπεράσματα	133

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: Εφαρμογές ΜΟΑ

<i>9.1 Εισαγωγή</i>	134
<i>9.2 Εφαρμογές ΜΟΑ</i>	134
<i>9.3 Υλικά και μέθοδοι</i>	136
<i>9.4 Αποτελέσματα</i>	140
<i>9.5 Συζήτηση-Ανάλυση</i>	158
<i>9.6 Συμπεράσματα</i>	176
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: Γενικά Συμπεράσματα	177
<i>ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ</i>	180
<i>ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΣΤΗΝ ΑΓΓΛΙΚΗ (SUMMARY)</i>	182
<i>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</i>	184
<i>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α</i>	193
<i>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β</i>	195
<i>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ</i>	196
<i>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ</i>	199

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Μέτρηση ραδιενέργειας στο ανθρώπινο σώμα

Οι τεχνικές μέτρησης διεισδυτικής ιοντίζουσας ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το ανθρώπινο σώμα χρησιμοποιούνται σε ευρεία κλίμακα στην Ιατρική και στην Ακτινοπροστασία. Σκοπός των μετρήσεων είναι η ανίχνευση ραδιονουκλιδίων και η ποσοτικοποίηση της ενεργότητας στο ανθρώπινο σώμα, ενίοτε δε και ο μεταβολισμός ή η βιοκατανομή των ραδιονουκλιδίων. Ραδιονουκλίδια εντοπίζονται στο σώμα είτε ως φυσικά συστατικά όπως π.χ. το ^{40}K , είτε έχουν εισαχθεί σε αυτό μέσω διαφόρων οδών, όπως η αναπνοή, η κατάποση, η απορρόφηση από το δέρμα ή μέσω της συστηματικής κυκλοφορίας εξαιτίας της ύπαρξης ασυνεχειών στο δέρμα συνέπεια τραυματισμών. Οι διαδικασίες διακρίνονται [HPA, 1998] σε μετρήσεις:

- 1) βιολογικών δειγμάτων όπως ούρα και κόπρανα ή βιολογικά δείγματα που αφαιρούνται (αίμα, τρίχες, ιστικά δείγματα, κ.λ.π) και αναφέρονται ως *in vitro* τεχνικές (indirect bioassay), και
- 2) σε τεχνικές που εφαρμόζονται άμεσα στον άνθρωπο και αναφέρονται ως *in vivo* (direct bioassay).

Η μέθοδος μέτρησης ολόσωμης ακτινοβολίας ανήκει στην 2^η κατηγορία τεχνικών και αναφέρεται στην ανίχνευση και ποσοτικοποίηση ραδιονουκλιδίων σε ολόκληρο το ανθρώπινο σώμα. Η μέτρηση πραγματοποιείται μέσω ανίχνευσης x- και γ-ακτινοβολιών, που εκπέμπονται από το ανθρώπινο σώμα. Η χρήση της τεχνικής αφορά επίσης την ανίχνευση ραδιοϊσοτόπων που εκπέμπουν β^+ μέσω της ακτινοβολίας εξαύλωσης ενέργειας 511 keV και της ακτινοβολίας πέδησης σε περίπτωση εκπομπού ακτινοβολίας β^- υψηλής ενέργειας και ενεργότητας. Για το σκοπό αυτό συχνά χρησιμοποιούνται Μετρητές Ολόσωμης Ακτινοβολίας, MOA (whole body counters) ή ανιχνευτές τμήματος του σώματος (partial body counters).

Ορισμένοι ερευνητές αναφέρουν ότι οι πρώτες μετρήσεις ραδιενέργειας από τμήματα του ανθρώπινου σώματος ήταν μετρήσεις ραδίου και έγιναν το 1929 από τον Schludt και συν. με χρήση θαλάμων ιονισμού ενεργού όγκου 1 ή 2 lt σε απόσταση ~30 cm από την πλάτη του εξεταζόμενου [Schludt H., Harker H., Flimm FB., 1929]. Ολόσωμες μετρήσεις ραδίου με χρήση ανιχνευτή τύπου Geiger Muller πραγματοποιήθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1930 στο MIT από τον R.D. Evans σε εργαζόμενους που έκαναν χρήση πηγών βαφών που περιείχαν ράδιο, καθώς και σε ασθενείς με χρήση γεωμετρίας τόξου [Evans RD., 1937]. Στις συγκεκριμένες μετρήσεις, ο Evans έλαβε υπόψη τον σωματότυπο του εξεταζόμενου, την αυτοαπορρόφηση και την επίδραση του σώματος του εξεταζόμενου στο σήμα υποστρώματος. Σημαντική εξέλιξη υπήρξε το 1951, όταν ο Sievert [1951] έκανε χρήση θαλάμου ιονισμού υψηλής πίεσης σε γεωμετρία σχεδόν 4π γύρω από το εξεταζόμενο και δοχείων με νερό ως θωράκιση, με συνέπεια τη μείωση του ορίου ανιχνευσιμότητας του ραδίου, σε επίπεδα μικρότερα του 1 pg, έναντι πολλών μg στην περίπτωση των μετρήσεων των Schludt και συν.

Σημαντικό ρόλο διαδραμάτισε η χρήση ανιχνευτών σπινθηρισμού που βελτίωσαν την ευαισθησία των μετρήσεων ικανοποιώντας το αυξημένο ενδιαφέρον μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο για μετρητές αυτής της κατηγορίας λόγω ανάπτυξης των πυρηνικών όπλων και της πυρηνικής τεχνολογίας γενικότερα. Για παράδειγμα, το 1956 ο Anderson αναφέρει την χρήση ανιχνευτών με τη μορφή δοχείων που περιείχαν υγρό σπινθηριστή μεγάλου όγκου επίσης σε γεωμετρία μέτρησης σχεδόν 4π [Anderson 1956]. Παρόμοια οι Bird και Burch αναφέρουν το 1958 την χρήση μεγάλων υγρών και πλαστικών σπινθηριστών [Bird P.M., Burch P.R.J., 1958]. Παράλληλα ήδη από το 1956 οι Marinelli και Miller αναφέρουν την χρήση ανιχνευτή NaI(Tl) σε μετρητή γεωμετρίας καρέκλας «υπό κλίση», με τον ανιχνευτή σε απόσταση ~40 cm από την καρέκλα, που βρίσκονταν σε δωμάτιο θωρακισμένο με σίδηρο πάχους 20 cm [Marinelli, 1956]. Με τον εν λόγω μετρητή ανιχνεύθηκε για πρώτη φορά άμεσα η παρουσία ^{137}Cs μέσα στο ανθρώπινο σώμα, αυξάνοντας έτσι σημαντικά το ενδιαφέρον για την κατασκευή και χρήση MOA για λόγους ακτινοπροστασίας.

Ο Andrews και συν. [1973] αναφέρουν ως βασικό πλεονέκτημα των μετρητών ολόσωμης ακτινοβολίας, την σχετικά υψηλή ακρίβεια και ευαισθησία των μετρήσεων, που προκύπτουν ως αποτέλεσμα της γεωμετρίας τοποθέτησης των ανιχνευτών. Ως χαρακτηριστικά που αυξάνουν την ακρίβεια, αναφέρονται οι σταθερές αποστάσεις των ανιχνευτών από σώμα καθώς και η δυνατότητα χρήσης πολλαπλών ανιχνευτών. Επιπρόσθετα ο Toohey και συν. [1991] αναφέρουν πως με την χρήση των MOA είναι εφικτή η μέτρηση ραδιονουκλιδίων σε αδιάλυτα υλικά, τα οποία περιέχονται στο σώμα και δεν παρουσιάζονται σε εκκρίσεις του οργανισμού. Ως πλεονεκτήματα αναφέρονται επίσης ο προσδιορισμός της ποσότητας ραδιονουκλιδίων με άμεσο τρόπο χωρίς τη χρήση μεταβολικών μοντέλων και η δυνατότητα μετρήσεων πολλαπλών ραδιονουκλιδίων.

Ο πρώτος MOA που χρησιμοποιήθηκε στην Ελλάδα εγκαταστάθηκε στο Νοσοκομείο Αλεξάνδρα στις αρχές της δεκαετίας του 1960, ήταν τύπου καρέκλας και λειτούργησε για μερικά χρόνια. Διέθετε έναν αθωράκιστο ανιχνευτή NaI(Tl) διαστάσεων 20.3 cm x 10.5 cm σε απόσταση ~50 cm από τον εξεταζόμενο και χρησιμοποιήθηκε για μεταβολικές μελέτες [Constantinides και συν. 1966]. Τον Απρίλιο του 1986 ολοκληρώθηκε κατασκευή και ο έλεγχος για χρήση (commitioning) πρότυπου MOA στο Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής του Πανεπιστήμιου Ιωαννίνων τύπου εγγύς θωράκισης με δυο ανιχνευτές NaI(Tl) διαστάσεων ~30 cm x 10.5 cm.

1.2 Φυσικές αρχές αλληλεπίδρασης φωτονίων με την ύλη

Κατά την αλληλεπίδραση φωτονίων υψηλής ενέργειας με την ύλη γίνεται μεταφορά μέρους ή του συνόλου της ενέργειας τους στο υλικό μέσω μηχανισμών που εμπλέκουν τα ηλεκτρόνια, τους πυρήνες και τα άτομα της ύλης. Σε αντίθεση με της αλληλεπιδράσεις μεταξύ ύλης και σωματιδιακών ακτινοβολιών (σωμάτια -α-, -β) όπου το άμεσο αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ιονισμών, η αλληλεπίδραση φωτονίων με την ύλη παράγει ιονισμούς με έμμεσο τρόπο που στηρίζεται στη παραγωγή δευτερογενών ηλεκτρονίων τα οποία ιονίζουν τελικά την ύλη. Οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με την ύλη ανασκοπούνται μεταξύ άλλων από τους KnoII [2000], Sorenson [2003] κ.α. Οι κυριότεροι φυσικοί μηχανισμοί αλληλεπιδράσεων που εμπλέκονται στις εφαρμογές του MOA είναι το

φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η σκέδαση Rayleigh, η σκέδαση Compton και η δίδυμη γέννηση. Η μεταφορά ενέργειας των φωτονίων στην ύλη οφείλεται συνήθως σε ένα συνδυασμό που περιλαμβάνει τα συγκεκριμένα φαινόμενα.

Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης των φωτονίων με την ύλη εξαρτάται από την ενέργεια, τη σύσταση και το πάχος του υλικού. Η σχετική μείωση της έντασης I της ακτινοβολίας κατά το πέρασμα της μέσα από υλικό πάχους Δx δίνεται από την σχέση:

$$\frac{\Delta I}{I} = -\mu_l \times \Delta x \quad (1.1)$$

Η ποσότητα μ_l ονομάζεται γραμμικός συντελεστής εξασθένησης. Επειδή ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης παρουσιάζει γραμμική εξάρτηση από την πυκνότητα ρ του υλικού, ορίζεται ο μαζικός συντελεστής εξασθένησης που είναι ανεξάρτητος της πυκνότητας του υλικού και εκφράζεται από τη σχέση:

$$\mu_m = -\mu_l / \rho \quad (1.2)$$

Δεδομένου ότι ο μαζικός συντελεστής εξασθένησης καθορίζεται από τα σύνολο των αλληλεπιδράσεων που λαμβάνουν χώρα ισχύει η παρακάτω σχέση:

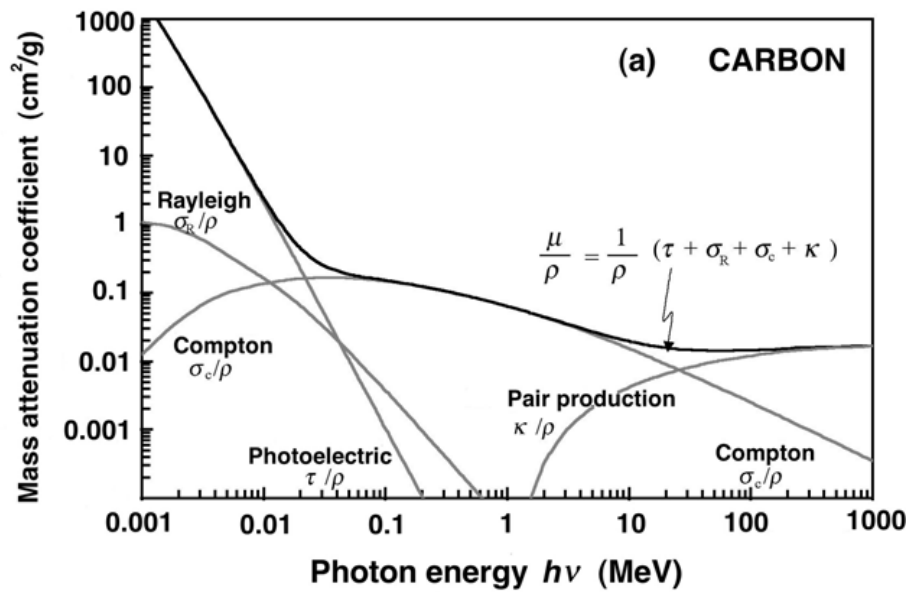
$$\mu_m = \tau + \sigma_R + \sigma_c + \kappa \quad (1.3)$$

Όπου τ , σ_R , σ_c , κ εκφράζουν την συνεισφορά του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, της σκέδασης Rayleigh, Compton και της δίδυμης γέννησης στο μαζικό συντελεστή εξασθένησης. Τα μεγέθη των επιμέρους μαζικών συντελεστών εξασθένησης εξαρτώνται από την ενέργεια και τον ατομικό αριθμό του υλικού. Το Σχήμα 1.1 παρουσιάζει τον μαζικό συντελεστή εξασθένησης και η σχετική συνεισφορά των επιμέρους συντελεστών σε σχέση με την ενέργεια φωτονίων για τον (α) άνθρακα, και (β) μόλυβδο [Podgorsak 2006]. Το Σχήμα 1.2 παρουσιάζει τις περιοχές επίδρασης φαινομένων αλληλεπίδρασης σε σχέση με την ενέργεια των φωτονίων και τον ατομικό αριθμό του απορροφητή.

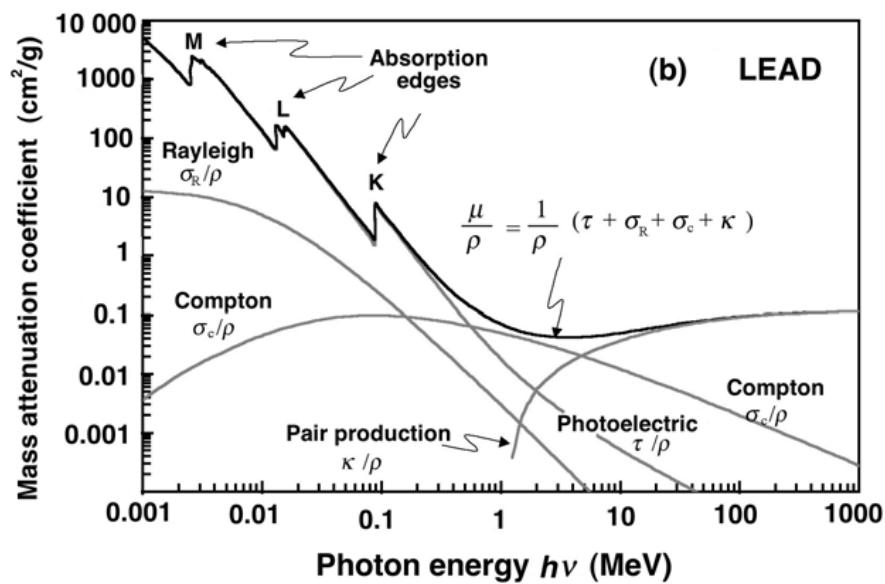
1.3 Γενικές αρχές ΜΟΑ

Οι σχεδιαστικές απαιτήσεις των διατάξεων ΜΟΑ καθορίζονται από ένα σύνολο κριτηρίων που αφορούν κυρίως το είδος των μετρήσεων που πρόκειται να πραγματοποιηθούν και την επιδιωκόμενη ποιότητα των αποτελεσμάτων. Ανάμεσα στα βασικότερα κριτήρια σχεδίασης περιλαμβάνονται: 1) οι ενεργότητες και τα είδη των ραδιονουκλιδίων που πρόκειται να μετρηθούν, 2) το εύρος των ενεργειών των προς μέτρηση φωτονίων, 3) τα επιθυμητά επίπεδα ακρίβειας και αξιοπιστίας των

αποτελεσμάτων, 4) η απαιτούμενη ευαισθησία ανίχνευσης και 5) το κόστος κατασκευής και λειτουργίας του ΜΟΑ.



(α)

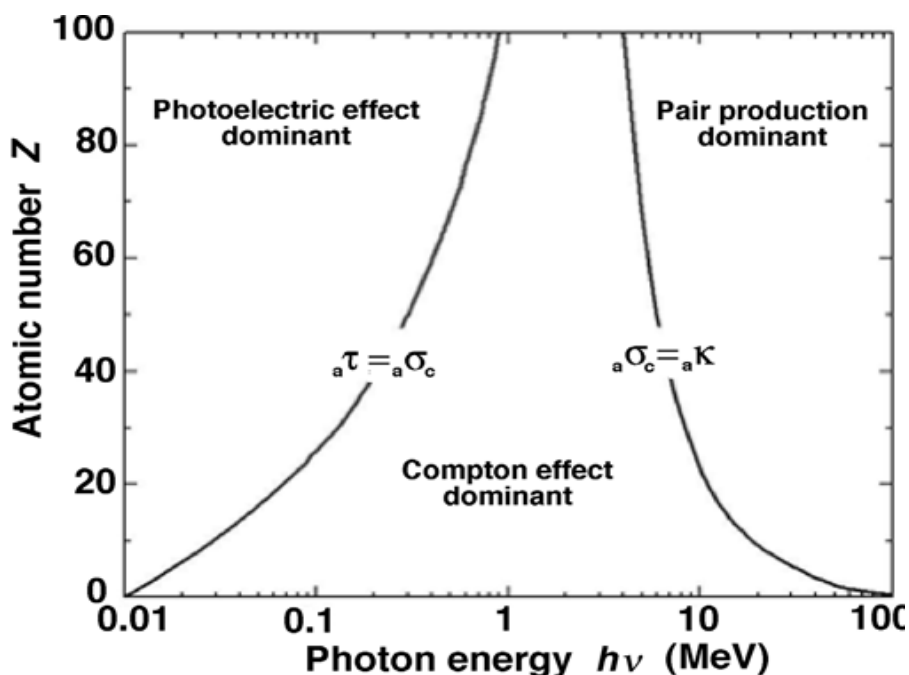


(β)

Σχήμα 1.1: Ο μαζικός συντελεστής εξασθένισης και η σχετική συνεισφορά των επιμέρους συντελεστών σε σχέση με την ενέργεια φωτονίων για τον (α) άνθρακα, και (β) μόλυβδο [Podgorsak 2006].

1.3.1 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά διατάξεων

Τα βασικά στοιχεία που συνθέτουν και περιγράφουν τη δομή και τη λειτουργία των διατάξεων MOA είναι η γεωμετρία μέτρησης, οι θωρακίσεις, οι ανιχνευτές και τα πυρηνικά ηλεκτρονικά που χρησιμοποιούνται.



Σχήμα 1.2: Περιοχές επίδρασης φαινομένων αλληλεπίδρασης σε σχέση με την ενέργεια των φωτονίων και τον ατομικό αριθμό του απορροφητή [Podgorsak 2006].

1.3.1.1 Γεωμετρικές μετρήσεις

Σύμφωνα με το *IAEA Directory of Whole Body Monitors* [1970], οι MOA μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τη γεωμετρία μέτρησης. Η 1^η κατηγορία περιλαμβάνει του μετρητές στατικού τύπου, στους οποίους είναι ακίνητος τόσο ο εξεταζόμενος όσο και το σύστημα των ανιχνευτών. Οι μετρήσεις με τη χρήση των συγκεκριμένων διατάξεων γίνονται σήμερα με τον εξεταζόμενο σε ύπτια στάση ή καθήμενο, ενίοτε και όρθιο μπροστά από έναν ή περισσότερους ανιχνευτές. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων διατάξεων είναι οι:

1. Μετρητές γεωμετρίας τόξου όπου ο εξεταζόμενος είναι τοποθετημένος σε κλίνη κοίλου σχήματος και ο ανιχνευτής βρίσκεται τοποθετημένος σε θέση που ισαπέχει όσο είναι δυνατό από όλα τα σημεία του σώματος.
2. Μετρητές γεωμετρίας καρέκλας, στους οποίους η μέτρηση γίνεται με τον εξεταζόμενο καθισμένο σε καρέκλα.
3. Μετρητές γεωμετρίας ακίνητης κλίνης. Η τοποθέτηση των ανιχνευτών σε αυτή τη γεωμετρία παρουσιάζει διάφορες παραλλαγές, όπως π.χ. μεγάλοι ανιχνευτές που τοποθετούνται πάνω και κάτω από τον εξεταζόμενο ή ανιχνευτές που τον περιβάλλουν μερικώς ή ολικώς (π.χ. γεωμετρίες 2π ή 4π).

Οι μετρήσεις γίνονται συνήθως με κίνηση του εξεταζόμενου ή των ανιχνευτών ή και των δύο ταυτόχρονα. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων διατάξεων είναι οι:

1. Μετρητές γραμμικής σάρωσης κλίνης, όπου το σώμα του εξεταζόμενου σαρώνεται από τους ανιχνευτές μέσω κίνησης της κλίνης
2. Μετρητές γραμμικής σάρωσης ανιχνευτών, όπου το σώμα του εξεταζόμενου σαρώνεται από τους ανιχνευτές μέσω κίνησης της κλίνης
3. Μετρητές σάρωσης με πολύπλοκη κίνηση. Συνδυάζεται η γραμμική σάρωση ανιχνευτή/τών κατά μήκος του εξεταζόμενου με μία περιστροφική κίνηση σε ένα επίπεδο κάθετο στο σώμα του (υπάρχουν και περιπτώσεις που η περιστροφική κίνηση γίνεται από τον ασθενή και όχι από τον/τους ανιχνευτή/ές).

1.3.1.2 Θωράκιση

Οι μετρήσεις ακτινοβολίας επηρεάζονται από πηγές ακτινοβολίας που βρίσκονται στο περιβάλλον των μετρητικών διατάξεων και είναι υπεύθυνες για την καταγραφή μιας πρόσθετης συνιστώσας στο σήμα του δείγματος, που αναφέρεται συνήθως ως σήμα υποστρώματος. Οι κυριότερες πηγές ακτινοβολίας υποστρώματος είναι φυσική ραδιενέργεια που ενυπάρχει στα οικοδομικά υλικά, στα υλικά κατασκευής των ανιχνευτών και του μετρητικού εξοπλισμού, φυσική ραδιενέργεια στη γη η οποία συχνά μπορεί να βρεθεί σε αέρια φάση και στην κοσμική ακτινοβολία.

Η αναγκαιότητα για μετρήσεις υψηλής ευαισθησίας καθιστά την χρήση θωρακίσεων στους ΜΟΑ απαραίτητη έτσι ώστε να μειωθεί η επίδραση της ακτινοβολίας υποστρώματος. Η αναφορά στη θωράκιση ενός μετρητικού συστήματος περιλαμβάνει τα υλικά που χρησιμοποιούνται, τις ποσότητες τους και τη γεωμετρία κατασκευής της θωράκισης.

Τυπικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις θωρακίσεις είναι ο μόλυβδος, το ατσάλι και το τσιμέντο. Θωρακίσεις με βάση το μόλυβδο δύναται να μειώσουν αποδοτικά τα επίπεδα της ακτινοβολίας υποστρώματος εξαιτίας της υψηλής πυκνότητας και του μεγάλου ατομικού αριθμού του υλικού. Οι μολύβδινες θωρακίσεις έχουν συνήθως τη μορφή τούβλων ή φύλλων, απαιτείται όμως ιδιαίτερη προσοχή στην καθαρότητά του. Ο σίδηρος ή το ατσάλι χρησιμοποιούνται από μόνα τους ή σε συνδυασμό με το μόλυβδο, συχνά με σκοπό τη μείωση του βάρους της θωράκισης και του κόστους κατασκευής, απαιτείται όμως ιδιαίτερη προσοχή στην καθαρότητά του διότι συχνά περιέχει ραδιομολύνσεις, κυρίως ^{60}Co . Η χρήση του τσιμέντου ως υλικό θωράκισης είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε περιπτώσεις μεγάλων κατασκευών λόγω του χαμηλού κόστους. Βασικό μειονέκτημα των συγκεκριμένων θωρακίσεων είναι ότι περιλαμβάνουν σε μορφή ενδογενών προσμίξεων υψηλές συγκεντρώσεις ισοτόπων φυσικής προέλευσης, όπως το ^{40}K και το ουράνιο, οι οποίες μπορούν να μειώσουν την αξιοπιστία των μετρήσεων στις αντίστοιχες ενεργειακές περιοχές του φάσματος.

Οι βασικότερες γεωμετρίες θωρακίσεων είναι, 1) η γεωμετρία θωράκισης ανιχνευτή όπου γίνεται θωράκιση της επιφάνειας του ανιχνευτή εκτός από το πρόσθιο παράθυρο και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου ο ρυθμός εκπομπής φωτονίων από το σώμα του εξεταζόμενου είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με την ακτινοβολία υποστρώματος του περιβάλλοντα χώρου, 2) γεωμετρία τύπου εγγύς θωράκισης, όπου το σώμα του εξεταζόμενου και οι ανιχνευτές περιβάλλονται με ειδικές θωρακισμένες

κατασκευές. Η μέτρηση γίνεται συνήθως με κίνηση του σώματος του εξεταζόμενου μπροστά από τους ανιχνευτές, 3) γεωμετρία θωράκισης τύπου δωματίου, όπου η θωράκιση περιβάλλει το δωμάτιο όπου είναι εγκατεστημένο το μετρητικό σύστημα, με σκοπό την μείωση της ακτινοβολίας υποστρώματος στα μικρότερα δυνατά επίπεδα.

1.3.1.3 Ανιχνευτές

Η μέτρηση φυσικών φαινομένων βασίζεται στη δυνατότητα των αντίστοιχων οργάνων να ανιχνεύουν και να ποσοτικοποιούν μεταβολές που οφείλονται στο μελετούμενο φυσικό φαινόμενο. Η ανίχνευση της ακτινοβολίας στηρίζεται σε διαδικασίες σχετικές με τους παραγόμενους ιονισμούς. Μια από τις πιο συνηθισμένες τεχνικές ανίχνευσης είναι η συλλογή των φορτίων που δημιουργούνται στο υλικό. Σε κάποιες περιπτώσεις όπως π.χ. στους σπινθηριστές, ένα ποσοστό της ενέργειας που απορροφάται στον ανιχνευτή, απελευθερώνεται υπό τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στην περιοχή του ορατού φάσματος τα οποία είναι δυνατό να συλλέγουν με κατάλληλο τρόπο. Τα πιο συνηθισμένα είδη ανιχνευτών ακτινοβολίας είναι 1) οι ανιχνευτές αερίου όπως π.χ. οι θάλαμοι ιονισμού, οι αναλογικοί απαριθμητές και οι ανιχνευτές τύπου Geiger-Muller, 2) οι ανιχνευτές σπινθηρισμού, 3) οι ανιχνευτές ημιαγωγού κ.α.

Ανιχνευτές σπινθηρισμού, π.χ. NaI(Tl), και ημιαγωγού π.χ. HPGe, αποτελούν τους πιο συνηθισμένους τύπους στα σύγχρονα συστήματα MOA. Οι ανιχνευτές NaI(Tl) μπορούν να κατασκευαστούν σε μεγάλα μεγέθη και γενικά χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ανιχνευτική απόδοση σε σχέση με τους ανιχνευτές HPGe παρόμοιου όγκου, οι οποίοι όμως χαρακτηρίζονται από πολύ καλύτερη ενεργειακή διακριτική ικανότητα. Βασικό μειονέκτημα των ανιχνευτών HPGe είναι το γεγονός ότι για τη λειτουργία τους απαιτείται η ψύξη σε χαμηλές θερμοκρασίες, συχνά με τη χρήση υγρού αζώτου.

Σε μετρήσεις που αφορούν την ανίχνευση ισοτόπων, όπως το ^{239}Pu και ^{241}Am , τα οποία είναι εκπομποί φωτονίων χαμηλών ενεργειών, χρησιμοποιούνται συχνά ειδικού τύπου σπινθηριστές, γνωστοί ως roshwich, οι οποίοι αποτελούνται από κρυστάλλους NaI(Tl), οι οποίοι είναι συζευγμένοι με κρυστάλλους CsI(Tl).

Ο λειτουργία του υπό μελέτη MOA βασίζεται στη χρήση ανιχνευτών σπινθηρισμού NaI(Tl). Χαρακτηριστική ιδιότητα του συγκεκριμένου τύπου ανιχνευτών είναι ότι το φως που παράγεται κατά την αλληλεπίδραση με την ακτινοβολία σχετίζεται με την ενέργεια που έχει εναποτεθεί. Σημαντικό τμήμα της λειτουργίας των ανιχνευτών σπινθηρισμού είναι οι φωτοπολλαπλασιαστές που συλλέγουν το παραγόμενο φως και το μετατρέπουν σε ηλεκτρικό παλμό.

Βασικό χαρακτηριστικό μέγεθος κάθε ανιχνευτικού συστήματος ακτινοβολιών είναι η απόδοση ανίχνευσης. Η απόδοση ανίχνευσης για σύστημα γάμμα φασματοσκοπίας ορίζεται ως το πηλίκο του καταγραφόμενου ρυθμού παλμών ενέργειας γ από το σύστημα $R_{\text{μετρούμενο}}$ προς το ρυθμό εκπομπής φωτονίων της ίδιας ενέργειας από την πηγή:

$$\text{αποδοση} = \frac{R_{\text{μετρούμενο}}}{A_{\text{πηγής}} \times y} \quad (1.4)$$

Όπου $R_{\text{μετρούμενο}}$ εκφράζεται σε cps, $A_{\text{πηγής}}$ είναι η ενεργότητα της πηγής σε Bq και y το ποσοστό φωτονίων ενέργειας γ που εκπέμπονται ανά διάσπαση πυρήνα της πηγής.

1.3.1.4 Πυρηνικά ηλεκτρονικά

Η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το σώμα του εξεταζόμενου με το υλικό του ανιχνευτή έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ηλεκτρικών παλμών, το μέγεθος των οποίων είναι συνήθως ανάλογο της ενέργειας που εναποτέθηκε στον ανιχνευτή από το φωτόνιο. Κατά τη μετάδοση των πρωτόγεννων ηλεκτρικών παλμών από τον ανιχνευτή στο τελικό σύστημα καταμέτρησης, μεσολαβεί ένα σύνολο ηλεκτρονικών μονάδων που έχει ως σκοπό την ενίσχυση, την μορφοποίηση και την αποδοτική μετάδοση του σήματος. Χαρακτηριστικά τμήματα αυτής της αλυσίδας ηλεκτρονικών μονάδων περιγράφονται από τον Tsoufanidis [1995] και Leo [1987] και είναι τα εξής:

1. Οι μονάδες NIM-BIN χρησιμοποιούνται για την τοποθέτηση και ηλεκτρική τροφοδοσία των πυρηνικών ηλεκτρονικών, κατά τις μετρήσεις ακτινοβολιών. Οι συσκευές αυτές κατασκευάζονται σύμφωνα με το πρότυπο Nuclear Instrument Module (NIM standard), που αναπτύχθηκε από την Nuclear Regulatory Commission των ΗΠΑ [DOE 1968].
2. Οι γεννήτριες υψηλής τάσης τροφοδοτούν με τάση τους ανιχνευτές. Σημαντικό χαρακτηριστικό που ενσωματώνουν οι γεννήτριες είναι η τροφοδοσία με σταθερή τάση ανεξάρτητα από τη διακύμανση της τάσης στο ηλεκτρικό δίκτυο.
3. Οι προενισχυτές σήματος είναι ηλεκτρονικές διατάξεις που υποδέχονται το σήμα που δημιουργείται στον ανιχνευτή. Σκοπός του προενισχυτή είναι η σύζευξη της εξόδου του ανιχνευτή με τα υπόλοιπα τμήματα του συστήματος και η ελαχιστοποίηση του θορύβου στο σήμα.
4. Οι ενισχυτές σήματος ενισχύουν και μορφοποιούν το σήμα που προέρχεται από την έξοδο του προενισχυτή.
5. Οι αναλυτές πολλαπλών καναλιών (Multi-Channel Analyzer) καταγράφουν και αποθηκεύουν τους παλμούς σε κατάλληλες θέσεις ανάλογα με το ύψος τους. Το ύψος των παλμών είναι ανάλογο με την ενέργεια που εναποτέθηκε στον κρύσταλλο και σχετίζεται με την αρχική ενέργεια του φωτονίου. Η αποθήκευση κάθε παλμού γίνεται σε καθορισμένα κανάλια ανάλογα με την ενέργεια φωτονίου που αντιπροσωπεύουν. Ο συγκεκριμένος τρόπος αποθήκευσης απεικονίζεται με τη μορφή κατανομής των καταγραφόμενων ενεργειών στα διάφορα κανάλια. Η απεικόνιση ονομάζεται ενεργειακό φάσμα και αποτελείται από έναν οριζόντιο άξονα που περιέχει τα κανάλια ενεργειών και έναν κατακόρυφο που αναφέρεται στο πλήθος των παλμών που αντιστοιχούν στη ίδια ενέργεια φωτονίων.

1.3.2 Χρήσεις ΜΟΑ

Οι ΜΟΑ καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, που περιλαμβάνει την χρήση τους σε μετρήσεις ακτινοπροστασίας του γενικού πληθυσμού και των επαγγελματικά εκτιθέμενων ομάδων, καθώς και σε βιοιατρικές εφαρμογές συμπεριλαμβανομένων και των ερευνητικών δραστηριοτήτων στα αντίστοιχα πεδία.

Αντικείμενο χρήσης των ΜΟΑ είναι οι μετρήσεις που αφορούν ραδιονουκλίδια που εντοπίζονται στο ανθρώπινο σώμα είτε ως φυσικά συστατικά του και αναφέρονται ως φυσική ραδιενέργεια είτε ως αποτέλεσμα ρύπανσης του περιβάλλοντος με ισότοπα που προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες, η σαν επιδιωκόμενο αποτέλεσμα (π.χ. ανάλυση με νετρονική ενεργοποίηση, μελέτη κατανομής ραδιοφαρμάκου). Χαρακτηριστικό παράδειγμα μετρήσεων φυσικής ραδιενέργειας είναι η μέτρηση του φυσικού ραδιονουκλιδίου ^{40}K . Το ^{40}K εμφανίζεται ως συστατικό του μείγματος φυσικού καλίου που εντοπίζεται στη στοιχειακή σύνθεση του ενδοκυττάριου υλικού του ανθρώπινου σώματος. Το ^{40}K , που είναι εκπομπός ακτινοβολίας- γ ενέργειας 1461 keV, εμφανίζει φυσική αναλογία σε σχέση με το φυσικό κάλιο της τάξης του 0.117 % [IAEA 1989]. Μέσω αυτής της αναλογίας είναι δυνατός ο προσδιορισμός της ολόσωμης ποσότητας καλίου η οποία συσχετίζεται άμεσα με την ποσότητα άλιπου ιστού στο σώμα. Μια άλλη εφαρμογή είναι η εκτίμηση της ραδιομόλυνσης του γενικού πληθυσμού με ^{226}Ra ή/ ^{222}Rn , ραδιονουκλιδίων του φυσικού περιβάλλοντος, μέσω ανίχνευσης της ακτινοβολίας- γ του θυγατρικού τους ^{214}Bi που θεωρείται ότι βρίσκεται σε μεταβατική ισορροπία με το ^{222}Rn , π.χ. λόγω πόσης νερού από υπόγειες πηγές υψηλής ραδιενέργειας [Suomela, Kahlos, 1972].

Παραδείγματα ισότοπων που παρουσιάζονται ως αποτέλεσμα ανθρωπογενών δραστηριοτήτων είναι το ^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{131}I , ^{124}Sb καθώς και τα προϊόντα σχάσεως που έχουν απελευθερωθεί στο περιβάλλον λόγω πυρηνικών δοκιμών ή μείζονων πυρηνικών ατυχημάτων, όπως αυτά που συνέβησαν στο Chernobyl [IAEA, 1992] και την Fukushima [IAEA, 2011]. Μεταξύ των προϊόντων σχάσεως περιλαμβάνονται ραδιονουκλίδια όπως το ^{137}Cs , ^{131}I κ.α. Μια τρίτη κατηγορία εφαρμογών αφορά τη χορήγηση ραδιοφαρμάκων για ιατρικούς λόγους (π.χ. ^{42}K , ^{65}Zn και ^{75}Se ως ιχνηθέτες), ή την *in vivo* στοιχειακή ανάλυση ασθενών με νετρονική ενεργοποίηση.

1.4 Αντικείμενο της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη του συνόλου των παραμέτρων που επηρεάζουν τη λειτουργία και τα αποτελέσματα των μετρήσεων του πρότυπου ΜΟΑ του Εργαστηρίου Ιατρικής Φυσικής, της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Τα συμπεράσματα χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη μεθοδολογιών βελτιστοποίησης των μετρητικών αποτελεσμάτων. Η λειτουργικότητα του οργάνου και η αποτελεσματικότητα των μεθοδολογιών ελέγχθηκε μέσω *in vivo* μετρήσεων σε εθελοντές.

Η μελέτη έγινε με ομοιώματα που κατασκευάστηκαν με σκοπό τον συστηματικό ποιοτικό έλεγχο των λειτουργιών του. Μελετήθηκαν τα μετρητικά χαρακτηριστικά του οργάνου και προσδιορίστηκαν τα όρια βέλτιστης λειτουργίας υπό το πρίσμα της διερεύνησης των δυνατοτήτων και των χαρακτηριστικών λειτουργίας του συστήματος πολύπλεξης δεκαεξί εισόδων που χρησιμοποιείται. Επιπρόσθετα αναπτύχθηκαν μέθοδοι επεξεργασίας των δεδομένων που προκύπτουν από τις μετρήσεις με σκοπό

την επίτευξη των βέλτιστων ποιοτικών χαρακτηριστικών. Με αφορμή τα συμπεράσματα για τις αιτίες προβληματικής λειτουργίας του οργάνου, έγινε μελέτη της επίδρασης της ακτινοβολίας υποστρώματος στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των μετρήσεων με ΜΟΑ και προτείνονται μέθοδοι αντιμετώπισης.

Αναπτύχθηκε μια εμπειρική μέθοδος για τον προσδιορισμό των ενεργών ανιχνευτικών όγκων των ανιχνευτών του συστήματος και έγιναν μετρήσεις για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του συστήματος. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλου σε κώδικα Monte Carlo. Ο κώδικας σχεδιάστηκε με βάση τα χαρακτηριστικά λειτουργίας και τις μεθοδολογίες μέτρησης που προτείνονται από την παρούσα εργασία. Με τη χρήση του υπολογιστικού μοντέλου, πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του συστήματος για διάφορους σωματότυπους εξεταζόμενων και για διάφορες ενέργειες εκπεμπόμενων φωτονίων. Οι διαδικασίες και μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν εφαρμόστηκαν σε *in vivo* μετρήσεις εθελοντών. Οι μετρήσεις που έγιναν κάλυψαν το μεγαλύτερο μέρος των σκοπούμενων χρήσεων του συστήματος.

Η παρούσα μελέτη είχε ως αποτέλεσμα τον προσδιορισμό των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας του οργάνου καθώς επίσης και της κατάλληλης μεθοδολογίας επεξεργασίας των μετρήσεων με στόχο την εξαγωγή αποτελεσμάτων συγκεκριμένων ποιοτικών χαρακτηριστικών. Επιτεύχθηκε βελτιστοποίηση των ποιοτικών στοιχείων των μετρήσεων μέσω της ανάπτυξης μεθοδολογιών που βασίστηκαν στα αποτελέσματα της μελέτης των βασικών παραμέτρων του συστήματος. Επιπρόσθετα, η ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου της διάταξης είχε ως αποτέλεσμα την εξαγωγή εμπειρικών σχέσεων βαθμονόμησης του οργάνου. Οι μετρήσεις σε εθελοντές είχαν ως αποτέλεσμα την ανίχνευση και τον προσδιορισμό ποσοτήτων ραδιονουκλιδίων που είχαν φυσική προέλευση ή χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια θεραπευτικών σχημάτων ή αποτελούσαν στοιχεία ραδιενεργού ρύπανσης.

Κεφάλαιο 2

Περιγραφή ΜΟΑ

2.1 Εισαγωγή

Ο ΜΟΑ του Εργαστηρίου Ιατρικής Φυσικής της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων είναι τύπου εγγύς θωρακίσεως με σάρωση κλίνης και σχεδιάστηκε για χρήση σε εφαρμογές ακτινοπροστασίας καθώς και σε βιοιατρικές εφαρμογές. Η υπό μελέτη διάταξη αποτελεί την αναβαθμισμένη εκδοχή παλαιότερου συστήματος που περιγράφεται αναλυτικά από τον Λεοντίου [1990].

Η σχεδίαση και τοποθέτηση του συστήματος βασίστηκε σε προσομοιώσεις που έγιναν από την Τζίμα [2003] με τη χρήση του κώδικα Monte Carlo MCNP4B [1997]. Στη συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκαν διάφορες εναλλακτικές εκδοχές σχετικά με την τοποθέτηση των ανιχνευτών, των εξεταζόμενων και της διάταξης της θωράκισης ως προς την απόδοση μέτρησης, την ομοιομορφία της μέτρησης και του ελάχιστου αριθμού φωτονίων ενέργειας 1460 keV που είναι δυνατό να ανιχνευθούν.

Η διάταξη κατασκευάστηκε σε λειτουργική μορφή από τον Θ. Σουψανά [2004]. Η κατασκευή του ΜΟΑ περιλάμβανε τόσο τη μηχανολογική κατασκευή όσο και την εγκατάσταση των ανιχνευτών και των ηλεκτρονικών μονάδων του συστήματος.

Το 2005 το σύστημα παρουσίασε βλάβη στον αναλυτή πολλαπλών καναλιών (MCA), ο οποίος αντικαταστάθηκε το 2007 με καινούρια μονάδα. Μετά την αντικατάσταση του MCA, διαπιστώθηκε αστοχία σε δύο ανιχνευτές και γενικευμένη αστάθεια στη λειτουργία των πυρηνικών ηλεκτρονικών. Η λειτουργία του ΜΟΑ αποκαταστάθηκε με αλλαγή των προβληματικών ανιχνευτών, αντικατάσταση και αναδιάταξη των ενισχυτών στις μονάδες τροφοδοτικών.

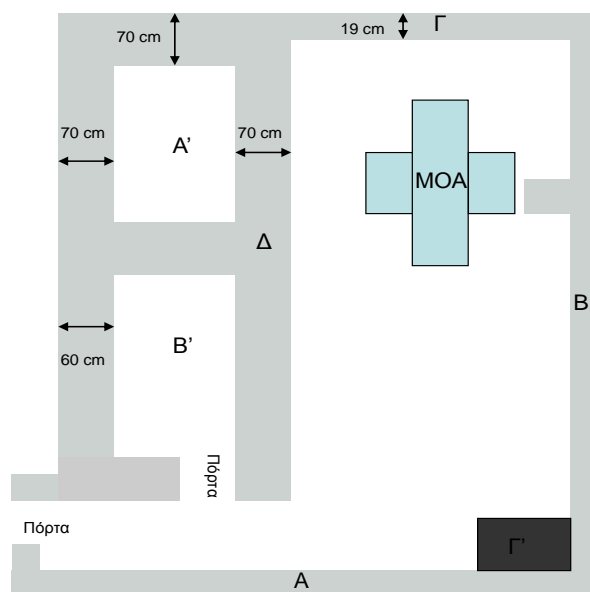
Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται τα τμήματα του ΜΟΑ. Η περιγραφή ενσωματώνει τις αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στις ηλεκτρονικές μονάδες καθώς και μετρήσεις των γεωμετρικών στοιχείων που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

2.2 Περιγραφή διάταξης ΜΟΑ

Η περιγραφή της διάταξης του ΜΟΑ περιλαμβάνει πληροφορίες για την θέση εγκατάστασης, την μηχανολογική σχεδίαση, τους ανιχνευτές, τις ηλεκτρονικές μονάδες και την εξεταστική κλίνη. Σκοπός της περιγραφής που ακολουθεί είναι η ανασκόπηση των τμημάτων του ΜΟΑ με έμφαση στις αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν με το πέρας της κατασκευής. Λεπτομερής περιγραφή της διάταξης παρουσιάζεται από τον Σουψανά [2004].

2.2.1 Δωμάτιο εγκατάστασης ΜΟΑ

Ο ΜΟΑ είναι εγκατεστημένος σε ισόγειο δωμάτιο του Εργαστηρίου Ιατρικής Φυσικής (εργαστήριο κατηγορίας ΕΡ-Κ) στην πτέρυγα 06 του κτιρίου Βασικών Επιστημών της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων διαστάσεων $3.9 \text{ m} \times 10.7 \text{ m}$. που διαθέτει προθάλαμο $2.1 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$. Η αίθουσα είναι ισόγεια (δεν υπάρχει υπόγειο), και χωρίζεται από τον πρώτο όροφο με πλάκα από σκυρόδεμα πάχους 30 cm, σε ύψος 7 m από το δάπεδο. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η θέση τοποθέτησης του μετρητή και πληροφορίες σχετικά με το δωμάτιο και τον περιβάλλοντα χώρο. Ο μετρητής διαχωρίζεται από το εξωτερικό περιβάλλον με τους τοίχους Α και Β. Ο τοίχος Γ διαχωρίζει τον μετρητή από περιοχή γραφείων και ο τοίχος Δ αποτελεί σύνορο με τον θωρακισμένο χώρο Α' και Β' με πάχη 70 cm και 60 cm σκυροδέματος (στον χώρο Β αποθηκεύονται πηγές νετρονίων $^{241}\text{Am/Be}$, οι οποίες προκαλούν άμεσα ή άμεσα την εκπομπή εκτός των άλλων ακτινοβολίας $-\gamma$ υψηλής ενέργειας, 2.2 και 4.4 MeV, ενώ οι πόρτες εισόδου στις εν λόγω αίθουσες είναι σε παράλληλη διεύθυνση από αυτήν του τούνελ του ΜΟΑ). Στη θέση Γ' βρίσκεται νιπτήρας, ο οποίος επικοινωνεί με δυο δεξαμενές φύλαξης ραδιενεργών καταλοίπων του εργαστηρίου.



Σχήμα 2.1: Η θέση τοποθέτησης του ΜΟΑ (το σχήμα δεν είναι υπό κλίμακα)

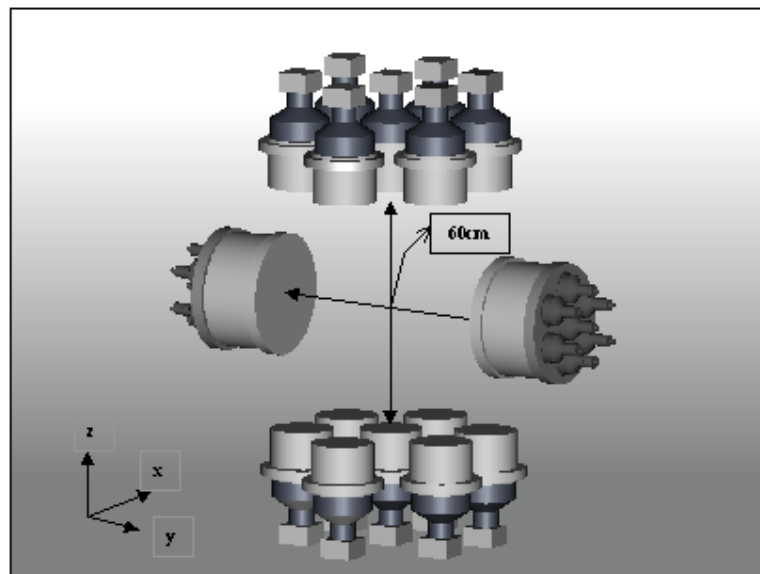
2.2.2 Μηχανολογική σχεδίαση ΜΟΑ

Ο ΜΟΑ είναι τύπου εγγύς θωρακίσεως με σάρωση κλίνης. Το κύριο μέρος του συστήματος αποτελείται από σήραγγα μήκους 201.3 cm και ύψους 48.4 cm. Οι

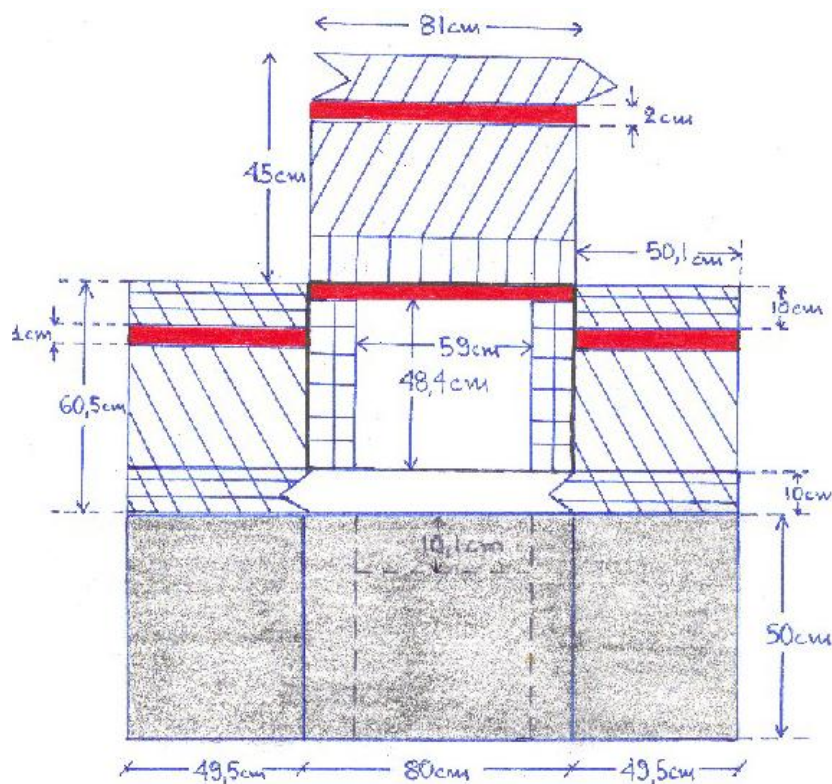
ανιχνευτές διακρίνονται σε δεκατέσσερις, ονομαστικών διαστάσεων $15.7 \text{ cm} \times 5.0 \text{ cm}$ ο καθένας (ανιχνευτές τύπου A1) και δυο, ονομαστικών διαστάσεων $29.2 \text{ cm} \times 10.2 \text{ cm}$ κατασκευής Harshaw, που είναι τοποθετημένοι σε εσοχές στο κέντρο της σήραγγας σύμφωνα με τη διάταξη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2. Οι δεκατέσσερις ανιχνευτές (τύπου A1) είναι τοποθετημένοι συμμετρικά σε ομάδες των επτά επάνω και κάτω από την εξεταστική κλίνη. Οι ανιχνευτές κάθε ομάδας διατάσσονται σε σχήμα μαργαρίτας. Οι ανιχνευτές τύπου A2 είναι τοποθετημένοι δεξιά και αριστερά του άξονα κίνησης της εξεταστικής κλίνης.

Η αρχική σχεδίαση της διάταξης από την Τζίμα [2003] προέβλεπε ότι οι αποστάσεις μεταξύ των ομόλογων ανιχνευτών να είναι 60 cm . Μετά την κατασκευή ο Σουψανάς [2004] αναφέρει πως η απόσταση μεταξύ των ανιχνευτών A1 είναι 58.5 cm και των ανιχνευτών A2 59.5 cm . Μετρήσεις που έγιναν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας έδειξαν ότι η απόσταση μεταξύ των ανιχνευτών τύπου A1 είναι 59.6 cm και των ανιχνευτών τύπου A2 58.9 cm , δηλαδή οι μεταξύ τους αποστάσεις είναι 0.7% και 1.8% μικρότερες από αυτές κατά τη σχεδίαση. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η απόσταση των 10.1 cm που καταγράφηκε μεταξύ των κάτω ανιχνευτών A1 με την επιφάνεια της θωράκισης της βάσης του μετρητή. Η απόσταση αυτή προσδιορίστηκε με νέα μέτρηση και βρέθηκε ίση με 10.3 cm . Σημειώνεται ότι η απόσταση αυτή δεν προβλεπόταν στον αρχικό σχέδιο του μετρητή, λόγω μείωσης κατά 11 cm του ύψους της σήραγγας σε σχέση με τον αρχικό σχεδιασμό, ώστε να μειωθεί το σήμα υποστρώματος.

Το Σχήμα 2.3 παρουσιάζει την πρόσοψη του μετρητή. Η κατασκευή του ΜΟΑ αποτελείται από βάση, η οποία δομείται από τέσσερα παραλληλεπίπεδα από ενισχυμένο σκυρόδεμα σε διάταξη σταυρού. Στο κέντρο της βάσης υπάρχει οπή, όπου τοποθετήθηκαν επτά ανιχνευτές τύπου A1. Δομή παρομοίου σχήματος υπάρχει στο επάνω μέρος του μετρητή, όπου τοποθετήθηκαν οι υπόλοιποι επτά ανιχνευτές τύπου A1. Για την θωράκιση του ΜΟΑ χρησιμοποιήθηκαν τούβλα μόλυβδου πάχους 10 cm



Σχήμα 2.2: Σχετική θέση ανιχνευτών ΜΟΑ [Τζίμα 2003]



Σχήμα 2.3: Η πρόσοψη του MOA [Σουψανάς 2004]

με εξαίρεση την οροφή στα δυο άκρα του τούνελ που έγινε χρήση τούβλων πάχους 5.3 cm.

2.2.3 Ανιχνευτές

Η λειτουργία του MOA βασίζεται σε δεκαέξι ανιχνευτές NaI(Tl) κατασκευής της εταιρίας Harshaw (Solon, Ohio). Οι δεκατέσσερις ανιχνευτές (ανιχνευτές A1) είναι τύπου 2hMBS8/5B-P-X με κυλινδρικό κρύσταλλο διαστάσεων 15.7 cm × 5.0 cm ειδικής κατασκευής από την εταιρία Harshaw που συνδέονται με τη βοήθεια φωτοοδηγού 5 cm με έναν φωτοπολλαπλασιαστή χαμηλού θορύβου [Cohn και συν. 1969]. Το Ιούλιο του 1990 βρέθηκε από τον Τ. Καλέφ-Εζρά μέση διακριτική ικανότητα των ανιχνευτών για φωτόνια ενέργειας 662 keV 8.8% (εύρος τιμών 7.9% ως 9.9%)

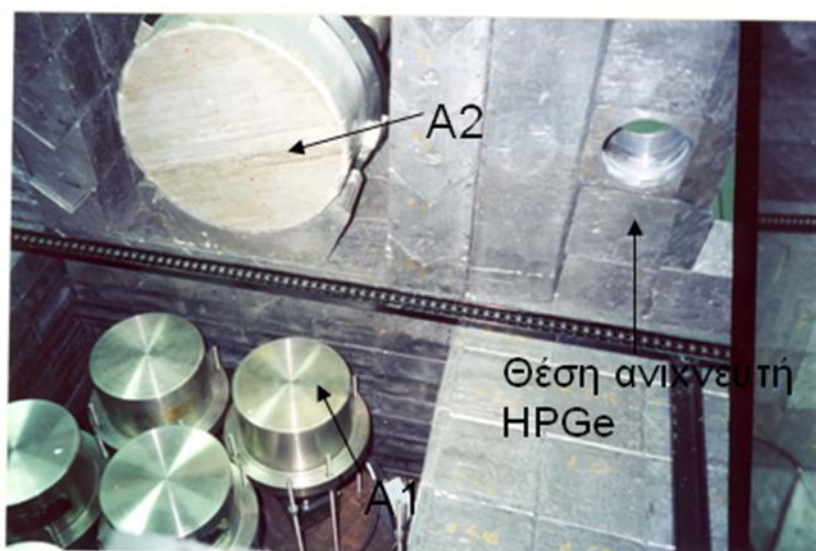
Οι δύο ανιχνευτές A2 κατασκευής 1980 από την εταιρία Harshaw, είναι τύπου 44M7BS16/3B (matched window line assembly, s/n AI-493, AI494) αρχικής ενεργειακής διακριτικής ικανότητας 7.5% και 8.4% στην ακτινοβολία-γ ενέργειας 662 keV και διαθέτουν κυλινδρικό κρύσταλλο NaI(Tl) ονομαστικών διαστάσεων 29.2 cm × 10.2 cm (11" × 4"). Οι εν λόγω δυο κρύσταλλοι είναι μόνιμα συνδεδεμένοι με επτά φωτοπολλαπλασιαστές EMI 9758 ο καθένας, που έχουν παράθυρο από borosilicate, άνοδο από SbKCs ονομαστικής διαμέτρου 7.5 cm, κβαντικής απόδοσης 20%-30% στα 380 nm που μειώνεται στο ~1/10 στα 600 nm, εννιά δυνόδους SbCs σε διάταξη Venetian blade και βάση από τέφλον.

Διαδικασία εκτίμησης του ενεργού ανιχνευτικού όγκου και του πάχους του περιβλήματος των ανιχνευτών με τη μέθοδο σάρωσης με δέσμη κατάλληλου σχήματος σε συνδυασμό με υπολογισμούς Monte-Carlo, είχε ως αποτέλεσμα τον προσδιορισμό μικρότερων διαστάσεων. Οι διαστάσεις των ανιχνευτών A1 βρέθηκαν ίσες προς $14.9 \text{ cm} \times 4.5 \text{ cm}$ έναντι των ονομαστικών $15.7 \text{ cm} \times 5.0 \text{ cm}$ και το πάχος του περιβλήματος A1 ίσο προς 5 mm . Οι αντίστοιχες διαστάσεις των ανιχνευτών A2 βρέθηκαν ίσες προς $28.4 \text{ cm} \times 9.7 \text{ cm}$ έναντι των ονομαστικών $29.2 \text{ cm} \times 10.2 \text{ cm}$ και πάχος περιβλήματος 3 mm A1 με συνέπεια οι ανιχνευτικοί ενεργοί όγκοι των δυο ομάδων σπινθηριστών να είναι μικρότεροι κατά $\sim 19\%$ και $\sim 10\%$ των ονομαστικών, περίπου 40 και 30 χρόνια μετά την κατασκευή τους.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας έγινε εκ νέου εκτίμηση των διαστάσεων των ανιχνευτών και βρέθηκαν για τους ανιχνευτές A1 και A2 διάμετροι 15.1 cm και 27.94 cm , αντίστοιχα. Για τον προσδιορισμό της δομής, θεωρήθηκε ότι οι ανιχνευτές A1 έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με το μοντέλο τύπου 24MB1-28 που δίνει ο κατασκευαστής (κατασκευή μετά από ειδική παραγγελία από το Brookhaven National Laboratory), ενώ για τους ανιχνευτές A2 θεωρήθηκαν στοιχεία από του ανιχνευτές τύπου 44M7B16/3A.

Σύμφωνα με στοιχεία της κατασκευάστριας εταιρίας, η διάμετρος των ανιχνευτών κατηγορίας 24MB1-28 είναι $6''$ (15.24 cm), ενώ το μήκος παίρνει τιμές μεταξύ $1/6''$ (0.635 cm) και $6''$ (15.24 cm) σε διαστήματα των 0.635 cm . Οι ανιχνευτές τύπου 44M7B16/3A έχουν διάμετρο 27.08 cm και μήκος 10.16 cm . Οι κρύσταλλοι τύπου A1 περιβάλλονται από στρώμα ανακλαστήρα Al_2O_3 πάχους 0.27 cm ενώ οι κρύσταλλοι τύπου A2 από 0.17 cm . Το εξωτερικό περίβλημα των ανιχνευτών αποτελείται από A1 τύπου 2S πάχους 0.05 cm .

Η απόσταση του παραθύρου εισόδου του ανιχνευτών A1 αναφέρεται ίση προς 0.4 cm και 0.23 cm για τους A2. Το υπολειπόμενο πάχος των 0.08 cm για τους A1 και 0.01



Σχήμα 2.4: Οι ανιχνευτές A1 και A2 στη θέση εγκατάστασης

cm για τους ανιχνευτές τύπου A2 θεωρήθηκε ότι καταλαμβάνεται από στρώμα κενού, το οποίο βρίσκεται μεταξύ του στρώματος Al_2O_3 και του εξωτερικού περιβλήματος

του ανιχνευτή. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω δεδομένα η ονομαστική διάμετρος του κρυστάλλου των A1 ανιχνευτών θεωρήθηκε ίση προς 15.1 cm και το μήκος ίσο προς 5 cm. Ενώ οι αντίστοιχες διαστάσεις για τους A2 είναι 27.94 cm και 10.16 cm. Οι διαστάσεις των κρυστάλλων βελτιστοποιήθηκαν με συνδυασμό μετρήσεων πειραματικών πηγών βαθμονόμησης και υπολογισμούς με τη χρήση μοντέλου του MOA που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες τις παρούσας εργασίας σε κώδικα Monte Carlo και παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7.

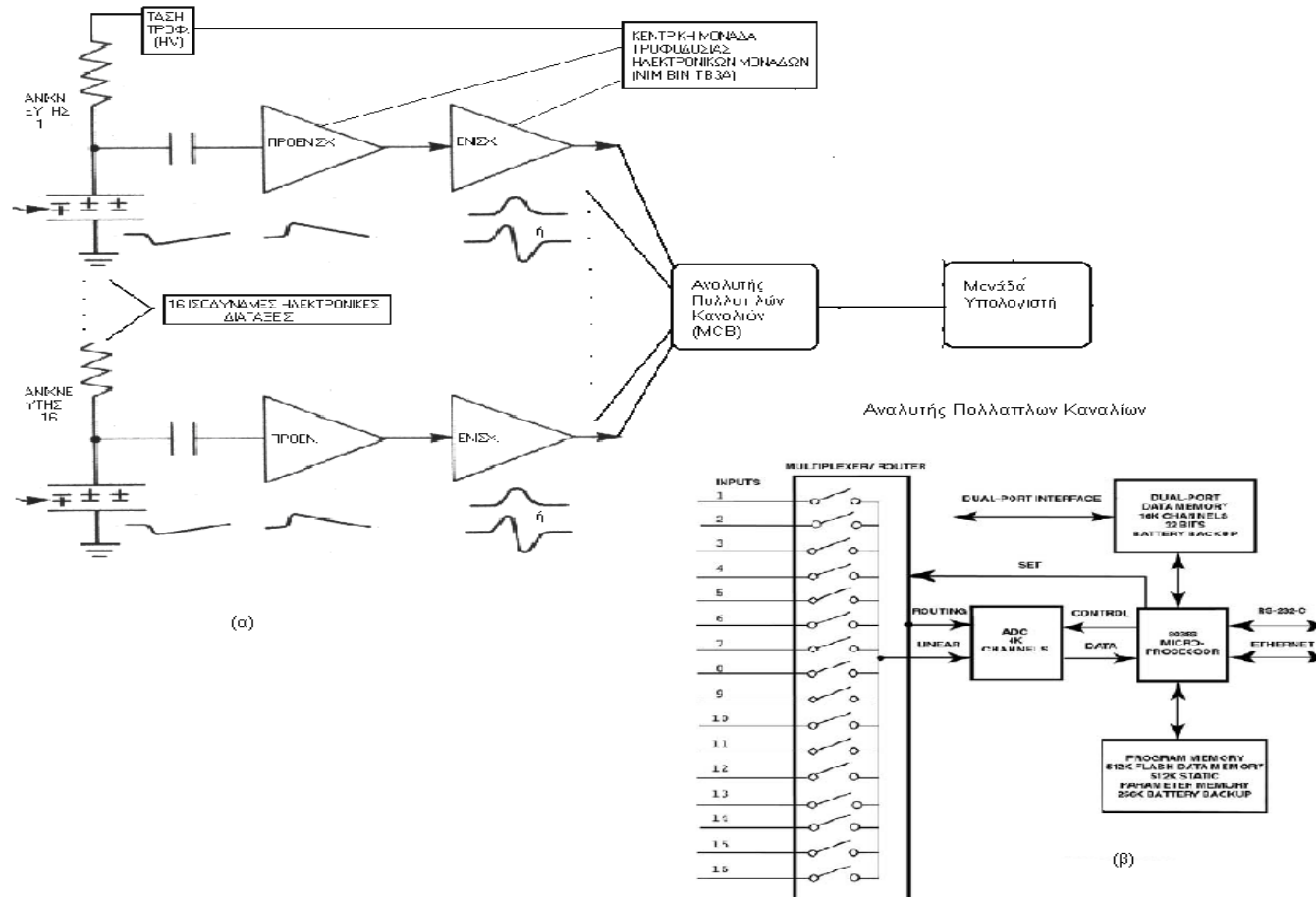
2.2.4 Ηλεκτρονικές μονάδες

Η λειτουργία των ανιχνευτών καθώς και η μεταφορά και επεξεργασία των σημάτων που προκύπτουν κατά την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με τους ανιχνευτές, υποστηρίζονται από κατάλληλη διάταξη πυρηνικών ηλεκτρονικών. Κάθε ανιχνευτής τροφοδοτείται από ηλεκτρονική μονάδα τροφοδοσίας υψηλής τάσης. Η έξοδος κάθε ανιχνευτή συνδέεται με μονάδα προενίσχυσης τύπου TC-145 Oxford Tennelec[®]. Το σήμα από την έξοδο του προενισχυτή οδηγείται σε διπλή μονάδα ενίσχυσης τύπου TC-247 Oxford Tennelec[®]. Το σήμα κατά την έξοδο του από τον ενισχυτή οδηγείται στην μονάδα του αναλυτή πολλαπλών καναλιών τύπου MCB 920E κατασκευής της εταιρίας ORTEC[®], ο οποίος έχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης υποδοχής έως και δεκαέξι σημάτων κάνοντας χρήση κατάλληλης μονάδας πολύπλεξης σήματος. Η διαδρομή του σήματος απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής 2.5(α). Οι μονάδες τροφοδοσίας υψηλής τάσης, οι ενισχυτές και η ο αναλυτής πολλαπλών καναλιών είναι τοποθετημένοι σε τροφοδοτικά τύπου NIM BIN TB3A επίσης κατασκευής Oxford Tennelec[®].

Η αρχική κατασκευή της ηλεκτρονικής διάταξης του MOA περιλάμβανε τη χρήση μονάδας πολύπλεξης σήματος τύπου DMR II Oxford Tennelec[®], η οποία δεχόταν τα σήματα από την έξοδο των ενισχυτών. Τα σήματα από την μονάδα πολύπλεξης οδηγούνταν σε αναλυτή πολλαπλών καναλιών τύπου MCA-PCA Multiport Oxford Tennelec[®] για περαιτέρω επεξεργασία. Η συγκεκριμένη μονάδα παρουσίασε βλάβη και αντικαταστάθηκε το 2008 με τη μονάδα MCB 920E, η λειτουργία της οποίας απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής 2.5 (β). Οι βασικές λειτουργίες της μονάδας είναι η πολύπλεξη έως και 16 εισόδων και η διευθιοδότηση του σήματος, η μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακών και η παροχή μνήμης για την καταχώριση των καταγραφόμενων ψηφιακών σημάτων. Το σήμα έπειτα από την επεξεργασία του στον MCB 920E, οδηγείται σε μονάδες υπολογιστή όπου παρουσιάζεται με τη μορφή φάσματος με χρήση του λογισμικού Maestro 32 II της εταιρίας ORTEC[®].

2.2.5 Εξεταστική κλίνη

Η τεχνική που ακολουθείται στις μετρήσεις με τον αναβαθμισμένο MOA περιλαμβάνει την τοποθέτηση των εξεταζόμενων σε ύπτια θέση επάνω σε εξεταστική κλίνη. Η σάρωση του σώματος του εξεταζόμενου επιτυγχάνεται με κίνηση της κλίνης κατά μήκος της σήραγγας, κατά μήκος της περιοχής τοποθέτησης των ανιχνευτών. Η κίνηση γίνεται με περιστροφή τεσσάρων οδοντωτών τροχών που είναι ανά δύο τοποθετημένοι σε άξονες κίνησης. Το Σχήμα 2.6 απεικονίζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εξεταστικής κλίνης η οποία έχει συνολικό μήκος 273 cm και χωρίζεται σε δυο τμήματα.

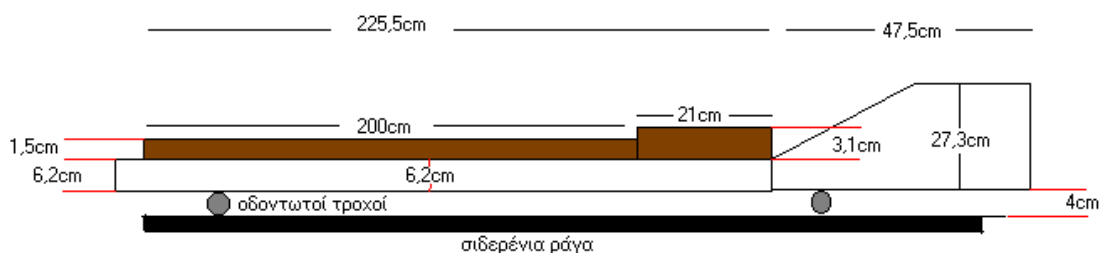


Σχήμα 2.5: Μπλοκ διάγραμμα (α) των πυρηνικών ηλεκτρονικών, (β) της μονάδας πολύπλεξης του MCB

Στο πρώτο τμήμα της, μήκους 47.5 cm και ύψους 27.3 cm, είναι τοποθετημένος τριφασικός ασύγχρονος ηλεκτροκινητήρας ο οποίος μεταδίδει την κίνηση στον πίσω άξονα. Ο κινητήρας έχει ισχύ 0.37 Watt και τροφοδοτείται από τάση δικτύου 220 V (AC) με συχνότητα 50 Hz. Το δεύτερο τμήμα έχει μήκος 225.5 cm, πλάτος 57.2 cm και πάχος 6.2 cm και αποτελεί την περιοχή τοποθέτησης του εξεταζόμενου πάνω σε ειδικά κατασκευασμένο στρώμα. Στο τμήμα αυτό υπάρχει εσοχή διαστάσεων 200 cm × 51 cm × 2.5 cm για τη σταθεροποίηση του στρώματος διαστάσεων 200 cm × 50 cm × 4 cm. Η άνω επιφάνεια του στρώματος προεξέχει από την κλίση κατά 1.5 cm, ενώ το τμήμα του στρώματος όπου τοποθετείται το κεφάλι του εξεταζόμενου είναι εκτός εσοχής, 3.1 cm πάνω από την πάνω επιφάνεια του μεταλλικού τμήματος της κατασκευής.

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της εξεταστικής κλίνης μελετηθήκαν από τον Βαλάκη [2006]. Τα συμπεράσματα των ελέγχων που διενεργήθηκαν είναι τα εξής:

- 1) Ο χρόνος σάρωσης της κλίνης βρέθηκε να διαφέρει ανάλογα με την κατεύθυνση κίνησης (μέση σχετική διαφορά ~1.6%). Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεταβολή της απόδοσης του ηλεκτροκινητήρα στις δύο κατευθύνσεις κίνησης, που μπορεί να εκτελέσει ο ρότορας του.
- 2) Η επαναληψιμότητα ως προς το χρόνο σάρωσης στη διάρκεια της ημέρας κυμαίνεται από 0.28% έως 0.43%. Η διάρκεια της σάρωσης βρέθηκε να μην μεταβάλλεται σημαντικά στο πέρασμα του εικοσιτετράωρου, με μόνη πιθανή εξαίρεση μικρές μεταβολές κατά τις μεσημβρινές ώρες.
- 3) Ο χρόνος σάρωσης βρέθηκε ότι αυξάνεται γραμμικά με αύξηση της μάζας του εξεταζόμενου. Το εύρημα αυτό μπορεί να αποδοθεί στην επιβάρυνση της λειτουργίας του κινητήρα κατά την αύξηση της μάζας.
- 4) Ο τρόπος κατανομής της μάζας στην επιφάνεια της εξεταστικής κλίνης σε περίπτωση μάζας 116 kg δεν βρέθηκε να διαφοροποιεί σημαντικά το χρόνο σάρωσης.



Σχήμα 2.6: Σχέδιο της εξεταστικής κλίνης [Σουψανάς 2004]

2.2.6 Εξαναγκασμένη κίνηση του αέρα

Την άνοιξη του 2011 εγκαταστάθηκαν στα παράθυρα της κλιματιζόμενης αίθουσας μετρήσεων κοντά στον MOA δυο ανεμιστήρες Vortice Vario 300/12'' εξωτερικών διαστάσεων 39 cm × 39.3 cm × 18 cm, οι οποίοι σύμφωνα με το κατασκευαστή τους περιστρέφονται με συχνότητα ~20 Hz, και εισάγουν 920 m³/h αέρα, ή εξάγουν 1650

m³/h αέρα, όταν λειτουργούν σε πλήρη ισχύ (75 W). Οι σχετικές ρυθμίσεις έγιναν με διατάξεις με δυνατότητα αναστροφής κατεύθυνσης *Comando reversibile* επίσης κατασκευής Vortice, Ιταλίας

Κεφάλαιο 3

Κατασκευή πειραματικών ομοιωμάτων βαθμονόμησης & ποιοτικού ελέγχου

3.1 Εισαγωγή

Η χρήση ανθρωπόμορφων πειραματικών ομοιωμάτων αποτελεί πιθανώς την πιο συνηθισμένη μέθοδο βαθμονόμησης και ελέγχου των ποιοτικών παραμέτρων λειτουργίας των ΜΟΑ. Η διαδικασίες μετρήσεων με ομοιώματα αποσκοπούν στην προσομοίωση των φυσικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ανθρώπινου σώματος κατά τη διαδικασία μέτρησης. Η χρήση ομοιωμάτων που περιέχουν ραδιενεργές πηγές με δυνατότητα μεταβολής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους σε σχετικά μικρό χρόνο και με μικρό κόστος, προσφέρει μια ευέλικτη μέθοδο μελέτης της συμπεριφοράς του μετρητικού συστήματος σε διαφορετικές συνθήκες.

Στο παρόν τμήμα περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής και τα επιμέρους χαρακτηριστικά σειράς ομοιωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας μελέτης. Τα ομοιώματα χρησιμοποιήθηκαν για τη διενέργεια ελέγχων που αφορούσαν τον προσδιορισμό των διαφόρων μετρητικών παραμέτρων καθώς και τις ανάγκες βαθμονόμησης του ΜΟΑ του Εργαστηρίου Ιατρικής Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων (ΕΙΦΠ).

3.2 Φυσικά ομοιώματα

Βασική απαίτηση για την ποσοτικό προσδιορισμό της ενεργότητας που ανιχνεύεται στο ανθρώπινο σώμα είναι η κατάλληλη βαθμονόμηση της ανιχνευτικής ικανότητας του ΜΟΑ. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται στον προσδιορισμό συντελεστών μετατροπής του μετρούμενου ρυθμού παλμών (cps) από τον μετρητή σε ενεργότητα ισότοπου. Οι Cohn και συν. [1969] αναφέρουν ότι οι συντελεστές βαθμονόμησης που καθορίζουν την ακρίβεια μέτρησης εξαρτώνται από την γεωμετρία μέτρησης και την απορρόφηση της ακτινοβολίας στο ανθρώπινο σώμα.

Η χρήση ανθρωπόμορφων ομοιωμάτων αποτελεί μια μέθοδο προσδιορισμού των συντελεστών βαθμονόμησης διατάξεων ΜΟΑ [Xu, Eckerman 2010]. Βασική παραδοχή για τη χρήση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων σε ομοιώματα για την βαθμονόμηση των μετρητών είναι τα ομοιώματα να ομοιάζουν τόσο στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όσο και στη σύσταση με το ανθρώπινο σώμα.

Οι χρήσεις των πειραματικών ομοιωμάτων αφορούν κατά κύριο λόγο εφαρμογές, όπως ο προσδιορισμός δόσεων από εξωτερική ακτινοβολία, τον ποιοτικό έλεγχο συστημάτων ιατρικής απεικόνισης καθώς και σε εφαρμογές εσωτερικής δοσιμετρίας. Ειδικότερα, τα πειραματικά (φυσικά) ομοιώματα εσωτερικής δοσιμετρίας, σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να περιέχουν εκτός των άλλων ραδιενεργά υλικά

στο εσωτερικό τους, με σκοπό τη εξομοίωση εσωτερικών ραδιομολύνσεων του ανθρώπινου σώματος. Αυτά τα ομοιώματα χρησιμοποιούνται για την βαθμονόμηση συσκευών *in-vivo* προσδιορισμού της ραδιενέργειας που περιέχεται στο ανθρώπινο σώμα, όπως π.χ. είναι οι ΜΟΑ ή οι μετρητές οργάνων αυτού, π.χ. μετρητές ραδιενέργειας πνευμόνων, θυρεοειδούς αδένα, οστών κρανίου, κ.λπ.. Παραδείγματα ομοιωμάτων που υποστηρίζουν την λειτουργία ΜΟΑ είναι το ομοίωμα κορμού του Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) και του Bottle Manikin Absorption (BOMAB), που αναφέρεται στο πρότυπο βαθμονόμησης με ραδιενεργές πηγές των διατάξεων ολόσωμου ακτινοβολίας. [Kramer και συν 1991, ANSI/HPS 1999]. Το ομοίωμα BOMAB αποτελείται από δέκα ελλειπτικούς ή κυκλικούς κυλινδρικούς όγκους όπου κάθε ένας εξ' αυτών αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη ανατομική δομή του ανθρώπινου σώματος. Στο εσωτερικό των οποίων μπορεί να τοποθετηθεί υδατικό διάλυμα με ραδιενεργό υλικό.



Σχήμα 3.1: Το ομοίωμα BOMAB με μάντες συγκράτησης

3.3 Υλικά και μέθοδοι

Η πρώτη προσπάθεια κατασκευής ομοιωμάτων για τον αναβαθμισμένο ΜΟΑ του ΕΙΦΠ πραγματοποιήθηκε από τον Βαλάκη [2006]. Τα ομοιώματα που σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης δομήθηκαν με χρήση πλαστικών δοχείων σχεδόν ορθογωνίου σχήματος από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE, δηλαδή ανακυκλούμενο θερμοπλαστικό πολυαιθυλένιο που κατασκευάζεται από πετρέλαιο), κατασκευής Nalgene (Thermo Scientific Nalgene, επί του παρόντος). Ο Πίνακας 3.1 περιέχει πληροφορίες αναφορικά με τις φυσικές ιδιότητες του υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου.

Πίνακας 3.1: Φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού των δοχείων

Φυσική Παράμετρος	Τιμή / Κατάσταση
Πυκνότητα	0.95 g/cm ³
Μέγιστη θερμοκρασία συνεχούς χρήσης	110 °C
Θερμοκρασία θραύσης	-100 °C
Διαπερατότητα στο Ορατό	Σχετικά διαφανές Υλικό
Διαπερατότητα στα Μικροκύματα	Μειωμένη
Ευκαμψία	Συμπαγές

Για τις ανάγκες διαμόρφωσης διαφορετικών γεωμετριών, χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι πλαστικών δοχείων με ονομαστική χωρητικότητα 1000 και 2000 ml (κωδικοί 172-360 και 172-359, αντίστοιχα) και μάζας (133.14 ± 0.05) g και (292.36 ± 0.05) g αντίστοιχα, σύμφωνα με τον προμηθευτή. Ο Πίνακας 3.2 αναφέρει πληροφορίες σχετικά με τη γεωμετρία για κάθε τύπου δοχείου.

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά των δοχείων

Μέγεθος	Δοχείο 1000 ml	Δοχείο 2000 ml	Παρατηρήσεις
Υλικό κατασκευής	High Density Poly-Ethylene	High Density Poly-Ethylene	-
Πυκνότητα (g/cm ³)	0.95	0.95	-
Σχήμα	Ορθογώνιο	Ορθογώνιο	-
Διαστάσεις (cm/cm/cm)	15.0×12.0×7.0	20.0×14.5×8.0	-
Πάχος τοιχώματος (cm)	0.19±0.01	0.25±0.03	Μέση τιμή
Μάζα (g)	128.28±0.05	293.14±0.05	-
Όγκος (ml)	1000	2000	-



Σχήμα 3.2: Τα δοχεία των 1000 ml και 2000 ml

Το εσωτερικό κάθε δοχείου πληρώθηκε με κατάλληλο απιονισμένο υδατικό διάλυμα, στο οποίο διαλύθηκε ομοιόμορφα πηγή ακτινοβολίας-γ. Ειδικότερα, τα διαλύματα που παρασκευάστηκαν περιείχαν ^{40}K ή ^{137}Cs ή ^{40}K - ^{137}Cs ή $^{99\text{m}}\text{Tc}$ - ^{40}K .

Η τελική φάση κατασκευής των ομοιωμάτων περιλάμβανε την διάταξη αριθμού δοχείων με καθορισμένο τρόπο, ώστε να δημιουργηθούν γεωμετρικές δομές παρόμοιες με την ανθρώπινη. Το πρότυπο διάταξης των δοχείων καθώς και ο αριθμός που χρησιμοποιήθηκε, ήταν άμεσα σχετιζόμενα με τη γεωμετρία της σωματότυπου που προσομοίαζαν κάθε φορά. Για κάθε σωματότυπο κατασκευάστηκαν δύο ομόλογα ομοιώματα: το κύριο ομοίωμα που περιείχε το ραδιενεργό πηγή και το ομοίωμα μέτρησης της ακτινοβολίας υποστρώματος το οποίο περιείχε μόνο απιονισμένο ύδωρ.

Παρασκευή διαλύματος ^{40}K

Κατασκευάστηκε ομοίωμα για τον έλεγχο του MOA σχετικά με μετρήσεις φυσικής ραδιενέργειας στο εσωτερικό του ανθρώπινου σώματος και συγκεκριμένα την ανίχνευση και ποσοτικοποίηση του ^{40}K . Προς τούτο παρασκευάστηκε διάλυμα στο οποίο ενυπήρχε κάλιο σε φυσική μορφή, με τη χρήση ξηρού άλατος KCl, παραγωγής της εταιρίας FLUKA. Η ποσότητα KCl που χρησιμοποιήθηκε κατά την παρασκευή του υδατικού διαλύματος υπολογίστηκε με βάση την ποσότητα καλίου που περιέχεται στη σύσταση του μέσου ανθρώπου. Προς τούτο θεωρήθηκε συγκέντρωση καλίου ίση προς ~ 2.2 g ανά kg σωματικής μάζας. Το ^{40}K περιέχεται ως πρόσμιξη σε αναλογία 0.0117 % στη μάζα του φυσικού καλίου.

Εκτός από την παρασκευή της κατάλληλης συγκέντρωσης διαλύματος, σημαντικό στοιχείο στη διαδικασία της βαθμονόμησης φυσικών ομοιωμάτων είναι ο προσδιορισμός των αβεβαιοτήτων που αφορούν την συγκέντρωση και την ποσότητα των ραδιενεργών πηγών που περιέχονται σε αυτά. Προς τούτο υπολογίστηκαν οι αβεβαιότητες που υπεισέρχονται σε κάθε στάδιο κατασκευής του ομοιώματος. Ο Πίνακας 3.3 [Suprian και συν. 1997] παρουσιάζει τις διάφορες πηγές σφάλματος που εμπλέκονται στον υπολογισμό της τελικής ποσότητας καλίου που περιέχεται στο ομοίωμα. Ο υπολογισμός της αβεβαιότητας των τιμών των μεγεθών που σχετίζονται με τη σύσταση του διαλύματος των ομοιωμάτων, βασίστηκε στη χρήση της γενικής εξίσωσης διάδοσης σφάλματος [Rabinovic 2005], σύμφωνα με την οποία το σφάλμα μιας ποσότητας x , που εκφράζεται ως συνάρτηση δύο τουλάχιστον μεγεθών u , v :

$$x=f(u, v, \dots) \quad (3.1)$$

δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_x^2 = \sigma_u^2 \left(\frac{\partial x}{\partial u} \right)^2 + \sigma_v^2 \left(\frac{\partial x}{\partial v} \right)^2 + \dots + 2\sigma_{uv}^2 \left(\frac{\partial x}{\partial u} \right) \left(\frac{\partial x}{\partial v} \right) + \dots \quad (3.2)$$

όπου σ_x , σ_u και σ_v είναι τα σφάλματα των ποσοτήτων x , u και v αντίστοιχα. Η ποσότητα σ_{uv}^2 εκφράζεται από τη σχέση:

$$\sigma_{uv}^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{N} \sum [(u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v})] \right] \quad (3.3)$$

όπου \bar{u} και \bar{v} είναι οι μέσες τιμές των αντίστοιχων μεγεθών

Σε περίπτωση που τα μεγέθη u και v δεν συσχετίζονται η σχέση 3.2 μεταπίπτει στη παρακάτω μορφή:

$$\sigma_x^2 \approx \sigma_u^2 \left(\frac{\partial x}{\partial u} \right)^2 + \sigma_v^2 \left(\frac{\partial x}{\partial v} \right)^2 + \dots \quad (3.4)$$

Πίνακας 3.3: Δεδομένα και αβεβαιότητες μεγεθών που σχετίζονται με το ξηρό άλας KCl

Τύπος δεδομένων	Σύμβολο	Περιγραφή ποσότητας	Τιμή (αβεβαιότητα)	Αναφορές & υπολογισμοί
Βασικά μεγέθη	A_{40K}	Ενεργότητα ^{40}K ανά g K	31.00(0.33)Bq	ΙΑΕΑ 1989
	$R_{K/KCl}$	Αναλογία μάζας καλίου ανά μονάδα μάζας ξηρού άλατος KCl	0.5245	-
	f	Πιθανότητα εκπομπής φωτονίων 1460 keV ανά Bq ^{40}K	0.1067(11)	ΙΑΕΑ 1989

Πίνακας 3.3:(συνέχεια)

Τύπος δεδομένων	Σύμβολο	Περιγραφή ποσότητας	Τιμή (αβεβαιότητα)	Αναφορές & υπολογισμοί
Πειραματικά μεγέθη	M_{KCl}	Ποσότητα ξηρού άλατος KCl που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του διαλύματος	1091(50) g	Εκτιμώμενο σφάλμα (95 %)
	V_p	Χωρητικότητα ογκομετρικού σωλήνα	1000(10) ml	Εκτιμώμενο σφάλμα (95 %)
	V_s	Χωρητικότητα σύριγγας	100(2) ml	Εκτιμώμενο σφάλμα (95 %)
Παράγωγα μεγέθη	M_K	Ποσότητα K που περιέχεται στο ξηρό άλας KCl	572(26) g	$M_K=0.5245 \times M_{KCl}$
	V_d	Όγκος διαλύτη απιονισμένου ύδατος	26000(260) ml	
	C_{Ks}	Συγκέντρωση καλίου στο αρχικό διάλυμα	$2.2(0.1) \times 10^{-2}$ g/ml	$C_{Ks} = M_K / V_d$
	C_{Kp}	Συγκέντρωση καλίου ανά 1 ομοιώματος	2.20(0.11) g/l	Στο σφάλμα λήφθηκε υπόψιν το σφάλμα της σύριγγας
	$A_{s,40K}$	Ειδική ενεργότητα ^{40}K -ανά 1 διαλύματος στο ομοίωμα	68.2(3.5)	$A_{s,40K} = C_{Kp} \times A_{40K}$
	$R_{40K(1461)}$	Ρυθμός εκπομπής φωτονίων 1460 keV ανά λίτρο διαλύματος στο ομοίωμα	7.28(0.38)	$A_{s,40K} = f \times A_{s,40K}$

Η παρασκευή του διαλύματος KCl έγινε σύμφωνα με την εξής μεθοδολογία:

- Ποσότητα ξηρού άλατος KCl ονομαστικής καθαρότητας μεγαλύτερης από 99.5%, μετρήθηκε σε ηλεκτρονικό ζυγό ακριβείας. Η ποσότητα KCl που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του αρχικού διαλύματος βρέθηκε ήταν (1090 ± 50) g με χρήση της σχέσης:

$$M_K = [(A \cdot B_K) \times (M_{B_{KCl}})^{-1}] \times (M_{KCl}) = 0.5245 \times M_{KCl} \quad (3.5)$$

όπου, M_K η μάζα του καλίου που περιέχεται σε μάζα M_{KCl} ξηρού άλατος, $A \cdot B_K = 39.102$ a.m.u το ατομικό βάρος του καλίου και $M_{B_{KCl}} = 74.555$ το μοριακό βάρος του KCl.

Το σφάλμα υπολογισμού της συγκέντρωσης του διαλύματος καλίου στα αντίστοιχα ομοιώματα υπολογίστηκε με χρήση της σχέσης 3.6, λαμβάνοντας υπόψη τα βήματα που αναφέρονται στη μεθοδολογία παρασκευής του διαλύματος. Ξεκινώντας με την ποσότητα καλίου που περιέχεται στην ποσότητα KCl που χρησιμοποιήθηκε, το σφάλμα δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta M_K = 0.5245 \times \Delta M_{KCl} \quad (3.6)$$

όπου ΔM_K είναι το σφάλμα της ποσότητας καλίου, ΔM_{KCl} είναι το σφάλμα της ποσότητας KCl και 0.5245 είναι η τιμή της ποσότητας $R_{K/KCl}$ όπως αυτή έχει οριστεί στον Πίνακα 3.3.

- Η ποσότητα KCl διαλύθηκε αρχικά σε όγκο απιονισμένου ύδατος (1300 ± 13) ml, με μηχανική ανάδευση. Η συγκεκριμένη ποσότητα διαλύματος αραιώθηκε σε όγκο νερού (24698 ± 250) ml, ώστε να επιτευχθεί περαιτέρω διάλυση και ομογενοποίηση του διαλύματος. Η συγκέντρωση του καλίου C_K στο διάλυμα KCl δίνεται από τη σχέση:

$$C_K = M_K / V_d \quad (3.7)$$

όπου M_K η ποσότητα καλίου που περιέχεται στην ποσότητα ξηρού άλατος KCl χρησιμοποιήθηκε και V_d ο όγκος του διαλύτη.

Η τελική συγκέντρωση καλίου στο διάλυμα υπολογίστηκε ίση προς $2.2 (0.1) \times 10^{-2}$ g K / ml.

Το σφάλμα της συγκέντρωσης του αρχικού διαλύματος υπολογίζεται με τη χρήση της σχέσης:

$$\Delta C_K = \sqrt{\frac{(C_K \times V_d)^2 \times \Delta M_K^2 + (C_K \times M_K)^2 \times \Delta V_d^2}{(M_K \times V_d)^2}} \quad (3.8)$$

- Πραγματοποιήθηκε εισαγωγή 100 ml διαλύματος σε κάθε δοχείο των 1000 ml και 200 ml διαλύματος σε κάθε δοχείο των 2000 ml, με τη χρήση σύριγγας χωρητικότητας 100 ml. Για την επίτευξη συγκέντρωσης 2.2 g K / l, ο όγκος των δοχείων των 1000 και 2000 ml συμπληρώθηκε με 900 ml και 1800 ml απιονισμένου ύδατος αντίστοιχα, με τη χρήση βαθμονομημένου ογκομετρικού σωλήνα, χωρητικότητας 1000 ml. Η ποσότητα καλίου που περιεχόταν σε κάθε σύριγγα 100 ml δίνεται από τη σχέση:

$$C_{K,p} = \frac{M'_K}{(V_p + V_s)} \quad (3.9)$$

όπου η ποσότητα M'_K δίνεται από τη σχέση:

$$M'_K = C_K \times V_s \quad (3.10)$$

και V_s είναι ο όγκος της σύριγγας.

Το σφάλμα δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta M'_K = \sqrt{\frac{(M_K \times V_s)^2 \times \Delta C_K^2 + (M_K \times C_K)^2 \times \Delta V_s^2}{(C_K \times V_s)^2}} \quad (3.11)$$

Λαμβάνοντας υπόψη το σφάλμα ογκομέτρησης της σύριγγας και το σφάλμα ογκομέτρησης του σωλήνα των 1000 ml που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του όγκου του διαλύτη, το συνολικό σφάλμα ανά l διαλύματος που έχει εξαχθεί από τη σχέση

$$\Delta C_{K,p} = \sqrt{\frac{(C_{K,p} \times V_p')^2 \times \Delta M_K'^2 + (C_{K,p} \times M'_K)^2 \times \Delta V_p'^2}{(M'_K \times V_p')^2}} \quad (3.12)$$

όπου οι ποσότητες V_p' και $\Delta V_p'$ δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$V_p' = V_p + V_s \quad (3.13)$$

$$\Delta V_p' = (\Delta V_p^2 + \Delta V_s^2)^{1/2} \quad (3.14)$$

και V_p είναι ο όγκος του διαλύματος που προσδιορίστηκε με τον ογκομετρικό σωλήνα.

Η ενεργότητα του διαλύματος ανά μονάδα συγκέντρωσης δίνεται από τη σχέση

$$A_p = C_{K,p} \times A_{40K} \quad (3.15)$$

το δε σφάλμα της από τη σχέση:

$$\Delta A_p = \sqrt{\frac{(A_p \times A_{K-40})^2 \times \Delta C_{K,p}^2 + (A_p \times C_{K,p})^2 \times \Delta A_{K-40}^2}{(A_{K-40} \times C_{K,p})^2}} \quad (3.16)$$

Ο ρυθμός εκπομπής φωτονίων ανά λίτρο διαλύματος στο ομοίωμα δίνεται από τη σχέση:

$$R_{K-40,p} = A_p \times f \quad (3.17)$$

Το σφάλμα του ρυθμού εκπομπής δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta R_{K-40,p} = \sqrt{\frac{(R_{K-40,p} \times f)^2 \times \Delta A_p^2 + (R_{K-40,p} \times A_p)^2 \times \Delta f^2}{(A_p \times f)^2}} \quad (3.18)$$

Η τιμή του ρυθμού εκπομπής φωτονίων 1460 keV ανά 1 διαλύματος βρέθηκε ίση προς (7.3 ± 0.4) c/s.l.

Παρασκευή διαλύματος ^{137}Cs

Η παρασκευή του διαλύματος ^{137}Cs που χρησιμοποιήθηκε στα αντίστοιχα ομοιώματα, έγινε με χρήση πηγής ^{137}Cs σε υγρή κατάσταση, που χορηγήθηκε από το Τμήμα διαχείρισης ραδιενεργών κατάλοιπων του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος». Κατά το στάδιο της παραλαβής, η πηγή ελέγχθηκε με τη χρήση της μεθόδου γ-φασματοσκοπίας υψηλής διακριτικής ικανότητας με ανιχνευτή HPGe του Εργαστηρίου Ερευνητικού Αντιδραστήρα. Σκοπός του αρχικού ελέγχου, ήταν ο προσδιορισμός της καθαρότητας της πηγής ως προς την ύπαρξη επιπρόσθετων ραδιοϊσοτόπων εντός αυτής. Προς τούτο λήφθηκε δείγμα, το οποίο μετρήθηκε στο σύστημα φασματοσκοπίας-γ. Το φάσμα που προέκυψε αναλύθηκε με τη χρήση του προγράμματος κτήσης και ανάλυσης φάσματος GammaVision της εταιρίας ORTEC ©.

Μετά τον αρχικό προσδιορισμό της συγκέντρωσης ^{137}Cs , ποσότητα 46 ml αραιώθηκε σε 40 ml απιονισμένου ύδατος. Το διάλυμα των 86 ml που προέκυψε, μεταγγίστηκε με σύριγγα όγκου 1 ml στα δοχεία του ενός και δύο λίτρων του ομοιώματος με τρόπο ώστε σε κάθε λίτρο ομοιώματος να αντιστοιχεί 1 ml διαλύματος.

Για τον ακριβή προσδιορισμό της συγκέντρωσης ^{137}Cs που μεταγγίστηκε στα πλαστικά δοχεία, έγινε μέτρηση της συγκέντρωσης σε τυχαία δείγματα που λήφθηκαν από δοχεία του ομοιώματος, διαδικασία που έλαβε χώρα κατόπιν της κατασκευής του ομοιώματος. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με σύστημα φασματοσκοπίας-γ υψηλής ανάλυσης σε γεωμετρία επαφής ανιχνευτή δείγματος.



Σχήμα 3.3: Το σύστημα φασματοσκοπίας-γ υψηλής διακριτικής ικανότητας

Η μέθοδος μέτρησης των εν λόγω δειγμάτων περιλάμβανε εκτός από τη μέτρηση του δείγματος, τη μέτρηση του υποστρώματος σε αντίστοιχη γεωμετρία. Η ανάλυση των φασμάτων που προέκυψαν, έγινε με εντοπισμό της κορυφής του ^{137}Cs και ποσοτικοποίηση των παλμών σε κατάλληλη περιοχή ενδιαφέροντος RoI. Για τον προσδιορισμό των παλμών στην περιοχή ενδιαφέροντος, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος που βασίζεται στην αφαίρεση από την βάση της περιοχής της κορυφής του τραπεζοειδούς υποστρώματος. Η τεχνική αποτελεί βασική ρουτίνα ανάλυσης στο πρόγραμμα ανάλυσης και επεξεργασίας φάσματος του λογισμικού GammaVision. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι μια παραλλαγή της μεθόδου Total Peak Area (TPA). Ο μαθηματικός τύπος υπολογισμού κρούσεων σε καθορισμένο RoI δίνεται από τη σχέση:

$$N_{Net} = N_{Gross} - N_{Background} \quad (3.19)$$

όπου N_{Gross} είναι το άθροισμα των παλμών στην περιοχή του RoI, εξαιρώντας τα τρία πρώτα και τα τρία τελευταία κανάλια του RoI. Ο δεύτερος όρος της σχέσης, $N_{Background}$, δίνεται από τη σχέση:

$$N_{Background} = \frac{AverCounts_{first3ch} + AverCounts_{last3ch}}{2} \times (EndCh - StartCh + 1 - 6) \quad (3.20)$$

όπου $AverCounts_{first3ch}$ είναι η μέση τιμή των παλμών στα τρία πρώτα κανάλια του RoI, $AverCounts_{last3ch}$ είναι η μέση τιμή των παλμών στα τρία τελευταία κανάλια. Ως $EndCh$ συμβολίζεται ο αριθμός του τελευταίου καναλιού που ορίζει το RoI και $StartCh$ ο αριθμός του καναλιού του πρώτου καναλιού.

Η επί τοις εκατό αβεβαιότητα του καθαρού ρυθμού της σχέσης (3.19) δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Uncertainty = \frac{\sqrt{N_{Gross} + N_{Background} \cdot \frac{RoIwidth}{6}}}{N_{Net}} \times 100 \quad (3.21)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις 3.19 και 3.20 οι διορθωμένοι καθαροί παλμοί N του ^{137}Cs στο δείγμα, προσδιορίζεται βάση της μεθοδολογίας που προτείνεται στο ΙΑΕΑ [2004]:

$$N = N_s - \frac{t_s}{t_b} N_b \quad (3.22)$$

όπου N_s είναι οι καθαροί παλμοί που ανιχνεύονται στο δείγμα με το ραδιοϊσότοπο, N_b είναι οι καθαροί παλμοί για το αντίστοιχο RoI στο υπόστρωμα και t_s και t_b συμβολίζουν τον Live χρόνο που καταγράφηκε από το χρονόμετρο του MCA για τις αντίστοιχες μετρήσεις.

Ο Πίνακας 3.4 περιέχει τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε δείγματα όγκου των 260 ml, τα οποία λήφθηκαν από πέντε τυχαία δοχεία του ομοιώματος. Η 2^η και 3^η στήλη του Πίνακα περιλαμβάνει τους καθαρούς παλμούς ^{137}Cs στη μέτρηση του κύριου δείγματος και του υποστρώματος αντίστοιχα. Στην 4^η στήλη αναγράφεται ο Live χρόνος μέτρησης του κύριου δείγματος και του υποστρώματος. Η 5^η στήλη αναγράφει τους καθαρούς παλμούς που υπολογίζονται βάση της σχέσης 3.22.

Πίνακας 3.4: Στοιχεία μετρήσεων γ - φασματοσκοπίας

Αριθμός μέτρησης	Καθαροί παλμοί μέτρησης δείγματος (c)	Καθαροί Παλμοί μέτρησης υποστ/τος (c)	Διάρκεια μέτρησης (s)	Καθαροί παλμοί ^{137}Cs στο δείγμα (c)
1	195(20)	1(15)	7200	194(25)
2	190(21)	1(15)	7200	189(26)
3	215(19)	2(15)	7200	213(24)
4	212(20)	2(15)	7200	210(25)
5	186(20)	1(15)	7200	185(25)
6	202(21)	2(15)	7200	200(25)
Μέση τιμή (c)				199
Τυπική απόκλιση (c)				11

Ο προσδιορισμός της μέσης ενεργότητας του ^{137}Cs στα δείγματα των 260 ml που μετρήθηκαν βρέθηκε μέσω σύγκρισης της μέσης τιμής των παλμών που υπολογίστηκαν από $n=5$ δείγματα με τον αριθμό των παλμών που μετρήθηκαν σε

Πίνακας 3.5: Στοιχεία μετρήσεων γ- φασματοσκοπίας πηγής βαθμονόμησης

Αριθμός μέτρησης	Καθαροί παλμοί μέτρησης δείγματος (c)	Καθαροί Παλμοί μέτρησης υποσ/τος (c)	Διάρκεια μέτρησης (s)	Καθαροί παλμοί ¹³⁷ Cs στο δείγμα (c)
1	105940(368)	2(15)	7200	105938(368)
2	104470(366)	2(15)	7200	104468(366)
Μέση τιμή (c)				105203
Τυπική απόκλιση (c)				1039

πρότυπη πηγή αναφοράς όγκου 260 ml, με γνωστή ενεργότητα ¹³⁷Cs. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε, χωρική πηγή με ομοιόμορφη κατανομή ¹³⁷Cs ενεργότητας 2.4259 kBq ($\pm 2.9\%$). Στον Πίνακα 3.5 περιέχονται τα αποτελέσματα από δύο μετρήσεις της εν λόγω πηγής.

Το Σχήμα 3.3 παρουσιάζει τη σύγκριση των φασμάτων της πηγής βαθμονόμησης και του δείγματος.

Η μέση ενεργότητα A των N=5 δειγμάτων, δίνεται από τη σχέση:

$$A = \frac{net_{sample} \times A_{refsource}}{net_{refsource}} \quad (3.23)$$

όπου, net_{sample} είναι ο μέσος αριθμός καθαρών παλμών από δείγματα διαλύματος που περιέχεται στα πλαστικά δοχεία, $net_{refsource}$ είναι ο μέσος αριθμός παλμών από την πηγή αναφοράς και $A_{refsource}$ είναι η ονομαστική τιμή της ενεργότητας του ¹³⁷Cs στην πηγή βαθμονόμησης την ημερομηνία μέτρησης της.

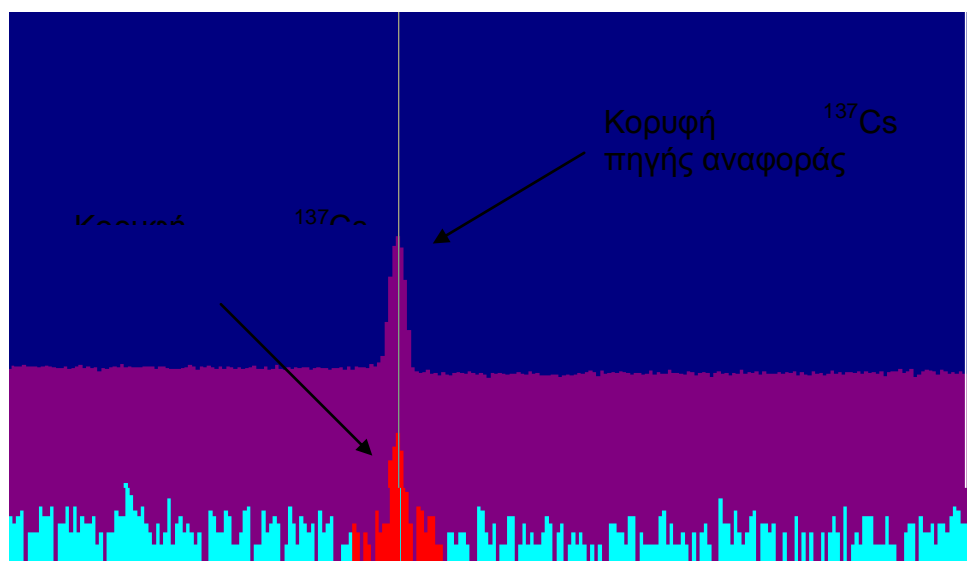
Το σφάλμα της μέσης ενεργότητας των δειγμάτων όγκου 260 ml δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta A_{137Cs_{sample}} = \sqrt{\frac{(net_{sample}^2 \times A_{refsource}^2)^2 \times \Delta A_{refsource}^2 + (A_{refsource}^2 \times net_{sample}^2)^2 \times \Delta net_{sample}^2}{(A_{refsource} \times net_{sample})^2}} \quad (3.24)$$

Η ενεργότητα ανά μονάδα όγκου διαλύματος του ομοιώματος δίνεται από τη σχέση:

$$C_{137Cs} = \frac{A_{137Cs_{sample}}}{V_{sample}} \quad (3.25)$$

όπου $V_{sample} = 260$ ml



Σχήμα 3.4: Κοινή απεικόνιση των φασμάτων του δείγματος και της πηγής αναφοράς. Η αβεβαιότητα της ενεργότητας ανά μονάδα όγκου διαλύματος δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta C_{^{137}\text{Cs}} = \sqrt{\frac{(C_{^{137}\text{Cs}} \times V_{\text{sample}})^2 \times \Delta A_{^{137}\text{Cs sample}}^2 + (C_{^{137}\text{Cs}} \times A_{^{137}\text{Cs sample}})^2 \times \Delta V_{\text{sample}}^2}{(A_{^{137}\text{Cs sample}} \times V_{\text{sample}})^2}} \quad (3.26)$$

3.4 Αποτελέσματα

Ο Πίνακας 3.6 παρουσιάζει δεδομένα που αφορούν το διάλυμα KCl που χρησιμοποιήθηκε για την πλήρωση των πλαστικών δοχείων που δομούν τα ομοιώματα με πηγή ^{40}K . Το διάλυμα συνολικού όγκου 70 l KCl που παρασκευάστηκε, χρησιμοποιήθηκε για την πλήρωση του εσωτερικού 22 δοχείων του 1.0 l και 24 δοχείων των 2.0 l. Η συνολική μάζα κάθε δοχείου με διάλυμα $m_{\text{δοχ}}$ και το σφάλμα αυτής $\Delta m_{\text{δοχ}}$ υπολογίζονται με τη χρήση των σχέσεων:

$$m_{\text{δοχ}} = \text{dens}_{\text{H}_2\text{O}} \times V_{\text{διαλυτη}} + C_{\text{KCl}} \times V_{\text{διαλυματος}} + m_{\text{δοχ}} \quad (3.27)$$

$$\Delta m_{\text{δοχ}} = \sqrt{((\text{dens}_{\text{H}_2\text{O}} + C_{\text{KCl}}) \times \Delta V_{\text{διαλυτη}})^2 + (V_{\text{διαλυματος}} \times \Delta C_{\text{KCl}})^2 + \Delta m_{\text{δοχ}}^2} \quad (3.28)$$

όπου το μέγεθος $\text{dens}_{\text{H}_2\text{O}}$ συμβολίζει την πυκνότητα του νερού που χρησιμοποιήθηκε ως διαλύτης και θεωρήθηκε ίσο προς 1.00 g/cm^3 σε θερμοκρασία δωματίου.

Πίνακας 3.6: Συγκεντρωτικά στοιχεία για το διάλυμα καλίου

Περιγραφή μεγέθους	Σύμβολο	Τιμή	Σφάλμα
Ποσότητα καλίου που χρησιμοποιήθηκε	M_K	572 g	26 g
Συγκέντρωση καλίου ανά λίτρο ομοιώματος	$C_{K,p}$	2.20 g/l	0.11 g/l
Ενεργότητα ^{40}K ανά λίτρο ομοιώματος	A_p	68.2 Bq/l	3.5 Bq/l
Ρυθμός εκπομπής φωτονίων 1460 keV ανά λίτρο ομοιώματος	$R_{K-40,p}$	7.3 c/s l	0.4 c/s l

Βρέθηκε ότι η συνολική μάζα των δοχείων που περιέχουν διάλυμα όγκου 1000 ml είναι ίση προς $m_{\delta_{total}} = (1133 \pm 20)$ g, ενώ η αντίστοιχη τιμή για τα δοχεία όγκου 2000 ml είναι $m_{\delta_{total}} = (2302 \pm 30)$ g.

Η πυκνότητα του πλαστικού δοχείου με το διάλυμα KCl προσδιορίζεται με τη χρήση της σχέσης:

$$\rho_{\delta_{ox}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{KCl}} + m_{\delta_{ox}}}{\frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} + \frac{m_{\text{KCl}}}{\rho_{\text{KCl}}} + \frac{m_{\delta_{ox}}}{\rho_{\delta_{ox}}}} \quad (3.29)$$

όπου $m_{\text{H}_2\text{O}}$ η μάζα του νερού στο δοχείο, 1000 g για το δοχείο του ενός λίτρου και 2000 g για το δοχείο των δύο λίτρων, m_{KCl} η μάζα του KCl στο δοχείο, 4.2 g για το δοχείο του ενός λίτρου και 8.4 g για το δοχείο των δύο λίτρων και $m_{\delta_{ox}}$ η μάζα του δοχείου. Με $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$, ρ_{KCl} και $\rho_{\delta_{ox}}$ συμβολίζεται η πυκνότητα του νερού, του KCl και του υλικού του δοχείου αντίστοιχα, όπου $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1.000 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{KCl}} = 1.984 \text{ g/cm}^3$ και $\rho_{\delta_{ox}} = 0.950$. Με εφαρμογή της σχέσης 3.29 και για τους δύο τύπους δοχείων προέκυψε ότι η πυκνότητα των δοχείων των 2 l και 1 l είναι $\rho_{\delta_{ox}} = 0.996 \text{ g/cm}^3$ και $\rho_{\delta_{ox}} = 0.998 \text{ g/cm}^3$ αντίστοιχα. Άρα η μέση πυκνότητα βρέθηκε ίση με $\rho_{\delta_{ox}} = 0.997 \text{ g/cm}^3$, τιμή που προσεγγίζει αυτήν του ανθρώπινου σώματος.

Ο Πίνακας 3.7 παρουσιάζει δεδομένα που αφορούν το διάλυμα ^{137}Cs που χρησιμοποιήθηκε για την πλήρωση των πλαστικών δοχείων που δομούν τα αντίστοιχα ομοιώματα.

Πίνακας 3.7: Συγκεντρωτικά στοιχεία για το διάλυμα ^{137}Cs

Περιγραφή μεγέθους	Σύμβολο	Τιμή	Σφάλμα
Μέσος αριθμός καθαρών παλμών δειγμάτων ^{137}Cs	$\text{net}_{\text{sample}}$	199 c	11 c
Μέσος αριθμός καθαρών παλμών πηγής αναφοράς	$\text{net}_{\text{refsource}}$	105203 c	1039 c
Ενεργότητα πηγής αναφοράς	$A_{\text{refsource}}$	2425.9 Bq	70.4 Bq
Ενεργότητα ανά λίτρο ομοιώματος	$C_{137\text{Cs}}$	17.7 Bq/l	1.1 Bq/l
Ρυθμός εκπομπής φωτονίων 662 keV ανά λίτρο ομοιώματος	$R_{137\text{Cs}}$	15.1 c/s.l	0.9 c/s.l

Η συνολική μάζα και το σφάλμα των δοχείων με διάλυμα ^{137}Cs δίνεται από τις σχέσεις θεωρώντας τη συνεισφορά της μάζας του Cs στο διάλυμα αμελητέα.

$$m_{\delta_{\text{total}}} = \text{dens}_{\text{H}_2\text{O}} \times V_{\text{διαλυτη}} + m_{\delta_{\text{ox}}} \quad (3.30)$$

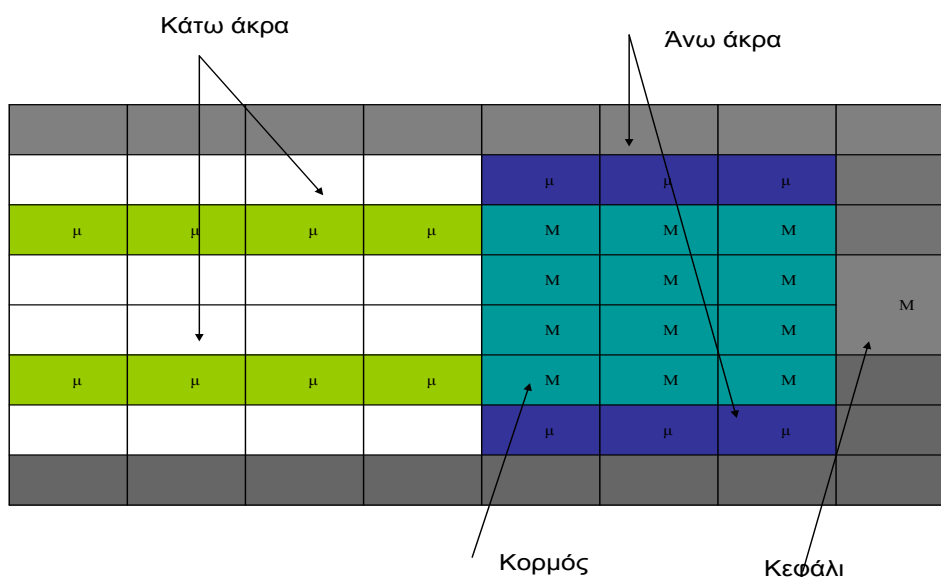
$$\Delta m_{\delta_{\text{total}}} = \sqrt{((\text{dens}_{\text{H}_2\text{O}} \times \Delta V_{\text{διαλυτη}})^2 + \Delta m_{\delta_{\text{ox}}}^2)} \quad (3.31)$$

Βρέθηκε ότι η συνολική μάζα των δοχείων που περιέχουν διάλυμα όγκου 1000 ml είναι ίση προς $m_{\delta_{\text{total}}} = (1128 \pm 12)$ g ενώ η αντίστοιχη τιμή για τα δοχεία όγκου 2000 ml είναι $m_{\delta_{\text{total}}} = (2293 \pm 14)$ g.

Με εφαρμογή της Σχέσης 3.29 και για τους δύο τύπους δοχείων με διάλυμα ^{137}Cs προέκυψε ότι η πυκνότητα των δοχείων των 2.0 l και 1.0 l είναι $\rho_{\delta_{\text{ox}}} = 0.994 \text{ g/cm}^3$ και $\rho_{\delta_{\text{ox}}} = 0.994 \text{ g/cm}^3$ αντίστοιχα. Η μέση πυκνότητα βρέθηκε ίση με $\rho_{\delta_{\text{ox}}} = 0.994 \text{ g/cm}^3$, τιμή που προσεγγίζει αυτήν του ανθρώπινου σώματος.

Κατασκευή ομοιωμάτων

Τα ομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν για μετρήσεις ποιοτικού έλεγχου και βαθμονόμησης του ανιχνευτή κατασκευάστηκαν με τοποθέτηση των δοχείων του ενός και δύο λίτρων σε κατάλληλη διάταξη επάνω στην εξεταστική κλίνη. Η γεωμετρική διάταξη των δοχείων έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται δομές παρόμοιες προς τους μελετώμενους ανθρώπινους σωματότυπους. Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η διάταξη των δοχείων για την δημιουργία ομοιωμάτων.



Σχήμα 3.5: Γραφική κάτοψη τοποθέτησης δοχείων 1000 ml (μ) και 2000 ml (M) για τη δημιουργία ομοιώματος παιδιού.

Πίνακας 3.8: Αριθμός δοχείων για τη δημιουργία ομοιωμάτων ομοιόμορφης κατανομής με ^{40}K ή ^{137}Cs

Αριθμός Ομοιώματος	Αριθμός δοχείων κεφαλής	Αριθμός δοχείων κορμού	Αριθμός δοχείων κάτω άκρων	Αριθμός δοχείων άνω άκρων	Όγκος διαλύματος ομοιώματος (l)	Μάζα ομοιώματος (g)
1	1M	9M	6μ	1μ	34	38722(200)
2	1M	9M	6μ	2μ	36	40978(200)
3	1M	12M	5μ	1μ	39	43345(200)
4	1M	12M	5μ	2μ	40	45601(200)
5	1M	12M	5μ	3μ	42	47857(200)
6	1M	16M	7μ	-	48	54773(200)
7	1M	16M	7μ	2μ	52	59285(200)
8	1M	16M	7μ	4μ	56	63797(200)
9	1M	20M	6μ	2μ	58	66201(200)
10	1M	20M	6μ	3μ	60	68457(200)
11	1M	20M	8μ	3μ	56	63797(200)
12	1M	16M	8μ	5μ	60	68309(200)
13	1M	20M	7μ	4μ	64	72969(200)
14	1M	20M	7μ	6μ	68	77481(200)
15	1M	20M	7μ	7μ	70	79737(200)

Ο Πίνακας 3.8 παρουσιάζει πληροφορίες σχετικά με τη δομή ομοιωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια μετρήσεων της παρούσας εργασίας και για μελλοντική χρήση. Ο Πίνακας 3.9 παρουσιάζει δεδομένα σχετικά με το ύψος, τη μάζα και την ενεργότητα των πηγών ^{40}K και ^{137}Cs των ομοιωμάτων που περιγράφονται στον Πίνακα 3.8. Οι τιμές εντός των παρενθέσεων αναγράφουν το σφάλμα της κύρια τιμής.

Πίνακας 3.9: Συγκεντρωτικά στοιχεία ομοιωμάτων Πίνακα 3.8

Αριθμός Ομοιώματος	Ύψος (cm)	Μάζα (g)	Ενεργότητα ^{40}K (Bq)	Ενεργότητα $^{137}\text{Cs}^*$ (Bq)	Εκπομπή φωτονίων ^{40}K (cps)	Εκπομπή φωτονίων ^{137}Cs (cps)
1	136.5(3.0)	38722(200)	2319(119)	602(37)	248(14)	513(31)
2	136.5(3.0)	40978(200)	2455(126)	637(40)	263(14)	544(32)
3	136.5(3.0)	43345(200)	2660(137)	690(43)	285(16)	589(35)
4	136.5(3.0)	45601(200)	2728(140)	708(44)	292(16)	604(36)
5	136.5(3.0)	47857(200)	2864(147)	743(46)	307(17)	634(38)
6	164.3(3.0)	54773(200)	3274(168)	850(53)	350(19)	725(43)
7	164.3(3.0)	59285(200)	3546(182)	920(57)	380(21)	785(47)
8	164.3(3.0)	63797(200)	3819(196)	991(62)	409(22)	846(50)
9	164.3(3.0)	66201(200)	3956(203)	1027(64)	423(23)	876(52)
10	164.3(3.0)	68457(200)	4092(210)	1062(66)	438(24)	906(54)
11	177.0(3.0)	63797(200)	3819(196)	991(62)	409(22)	846(50)
12	177.0(3.0)	68309(200)	4092(210)	1062(66)	438(24)	906(54)
13	177.0(3.0)	72969(200)	4365(224)	1133(70)	467(26)	966(58)
14	177.0(3.0)	77481(200)	4638(238)	1204(75)	496(27)	1027(61)
15	177.0(3.0)	79737(200)	4774(245)	1239(77)	511(28)	1057(63)

* στις 12 Οκτωβρίου 2010

3.5 Συζήτηση

Κατά την παρασκευή των διαλυμάτων που χρησιμοποιήθηκαν ως πηγές ακτινοβολίας-γ στα ομοιώματα έγινε προσπάθεια ώστε να επιτευχθούν συγκεντρώσεις παρόμοιες με τις τιμές που ισχύουν στην καθημερινή πράξη για άνδρες νεαρής ηλικίας. Για τα ομοιώματα καλίου, η συγκέντρωση των 2.2 g K/l που παρασκευάστηκε, προσεγγίζει τις τιμές που αναφέρονται στην βιβλιογραφία. Σύμφωνα με τον Kehayias και συν. [1997], οι τιμές καλίου που αναφέρονται για βορειοαμερικανούς άντρες με μέσο ύψος 176 cm και μάζα 78 kg που ανήκαν σε



Σχήμα 3.6: Φωτογραφία τυπικού ομοιώματος τοποθετημένου στη εξεταστική κλίνη του MOA

διάφορες ηλικιακές ομάδες κυμαίνονται μεταξύ 134.4 g και 155.5 g. Η τιμή καλίου που περιέχεται σε ομοίωμα 177 cm και 77.5 kg είναι 149.6 g και είναι μεγαλύτερη κατά ~3% της μέσης τιμής ανθρώπων παρόμοιου σωματότυπου. Από την άλλη πλευρά, σύμφωνα με τους ίδιους ερευνητές η μέση ποσότητα ολόσωμου καλίου στις γυναίκες με ύψος περίπου 162 cm και μάζα 60 kg για διάφορες ηλικιακές ομάδες κυμαίνεται μεταξύ 84.5 g K έως 97.3 g K. Η ποσότητα καλίου σε ομοίωμα παρόμοιας γεωμετρίας με ύψος 164.3 cm και μάζα 59.2 kg είναι ίση με 114.4 g, δηλαδή ~25% μεγαλύτερη της μέσης ποσότητας στις αμερικανίδες.

Σε αντίθεση με το ^{40}K που περιέχεται στην σύσταση του ανθρώπινου σώματος ως πρόσμιξη του φυσικού καλίου, το ισότοπο ^{137}Cs μπορεί να ανιχνευθεί σε περιπτώσεις εσωτερικής ή/και εξωτερικής ραδιομόλυνσης ως αποτέλεσμα ραδιολογικού συμβάντος. Το γεγονός αυτό καθιστά δύσκολο τον ορισμό τιμής αναφοράς για την συγκέντρωση του ισότοπου στο ανθρώπινο σώμα. Ενδεικτικές τιμές συγκέντρωσης ^{137}Cs στον ανθρώπινο οργανισμό αναφέρονται με βάση μετρήσεις που έγιναν το διάστημα που ακολούθησε το πυρηνικό ατύχημα του Chernobyl. Ο Kalef-Ezra και συν. [1992] αναφέρουν μέγιστη μέση συγκέντρωση ^{137}Cs περίπου δέκα μήνες μετά το ατύχημα σε ηπειρώτισσες 4.5 kBq και μειώθηκε κατά δυο τάξεις μεγέθους μετά από ~2 y. Επίσης ο Papastefanou και συν. [1988] αναφέρει ως μέγιστη τιμή ^{137}Cs σε τυπικό άνθρωπο μάζας 70 kg ίση προς 17.6 kBq στη Θεσσαλονίκη μετά το ατύχημα. Η ενεργότητα ^{137}Cs που περιέχεται σε ομοίωμα ύψους 177 cm και 73 kg που μελετήθηκε είναι 1.1 kBq.

Ο προσδιορισμός των αβεβαιοτήτων που αναφέρονται στις συγκεντρώσεις των διαλυμάτων και των ποσοτήτων ραδιοϊσοτόπου που περιέχονται στα ομοιώματα αποτελεί σημαντικό στοιχείο για την αξιοποίηση των διαδικασιών βαθμονόμησης και ποιοτικού ελέγχου του συστήματος. Στην παρούσα μελέτη προσδιορίστηκαν οι αβεβαιότητες σε κάθε στάδιο της κατασκευής του ομοιώματος από την παρασκευή

του διαλύματος μέχρι τη σύνθεση της τελικής γεωμετρίας του ομοιώματος. Χαρακτηριστικά αναφέρεται η ενεργότητα του ^{40}K ανά λίτρο διαλύματος υπολογίστηκε ίση με 68.2 Bq/l και η αβεβαιότητα ίση με 3.5 Bq/l ή 5.1% σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Οι τιμές για τη συγκέντρωση και την αβεβαιότητα για το διάλυμα ^{137}Cs βρέθηκαν ίσες προς 17.7 Bq/l και 1.1 Bq/l ή 6.25% αντίστοιχα.

Εκτός από τα ομοιώματα που παρουσιάστηκαν, χρησιμοποιήθηκαν ομοιώματα με πηγή $^{99\text{m}}\text{Tc}$ καθώς και με ανομοιομορφές κατανομές ραδιοϊσοτόπων. Τα χαρακτηριστικά αυτών των ομοιωμάτων περιγράφονται στα αντίστοιχα τμήματα της μελέτης.

3.6 Συμπεράσματα

Αναλύθηκε η διαδικασία και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα κατασκευής των ομοιωμάτων ομοιομορφής κατανομής ραδιονουκλιδίου για τον έλεγχο και την βαθμονόμηση του MOA. Η κατασκευή πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Κατά το 1^ο στάδιο έγινε παρασκευή των υδατικών διαλυμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την πλήρωση των δοχείων. Αποτέλεσμα ήταν η παρασκευή υδατικού διαλύματος KCl με ^{40}K ενεργότητας ανά μονάδα όγκου (68.2 ± 3.5) Bq/l και υδατικού διαλύματος ^{137}Cs με ενεργότητα ανά μονάδα όγκου (17.7 ± 1.1) Bq/l. Στο δεύτερο στάδιο κατασκευής των ομοιωμάτων έγινε πλήρωση των δοχείων που δομούν τα ομοιώματα με κατάλληλη ποσότητα διαλύματος ^{40}K ή ^{137}Cs . Τα δοχεία συνδυαστήκαν με κατάλληλους τρόπους για τη δημιουργία ανθρωπόμορφων γεωμετριών. Η δομή των ομοιωμάτων περιλαμβάνουν δομές όπως τα άνω και κάτω άκρα, τον κορμό και το κεφάλι.

Η ενεργότητα κάθε ομοιώματος εξαρτάται από τον αριθμό και το είδος των δοχείων που χρησιμοποιούνται. Η μάζα των ομοιωμάτων κυμαίνεται μεταξύ 38000 g και 80000 g, ενώ το ύψος τους από 138 cm έως 180 cm. Σχεδιάστηκαν ομοιώματα ^{40}K των οποίων η ενεργότητα του διαλύματος κυμαίνεται μεταξύ 2319 Bq έως 4774 Bq. Το εύρος ενεργότητας των ομοιωμάτων με διάλυμα ^{137}Cs κυμαίνεται μεταξύ 602 Bq και 1239 Bq (η ημερομηνία βαθμονόμησης της ενεργότητας του διαλύματος ^{137}Cs είναι η 12 Οκτωβρίου 2010).

Κατά την παρασκευή των διαλυμάτων δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στη ποσοτικοποίηση των σφαλμάτων που αφορούν την ενεργότητα των διαλυμάτων. Το μικτό σφάλμα ενεργότητας των διαλυμάτων και συνακόλουθα των ομοιωμάτων είναι της τάξης του 5 %, μέγεθος που θεωρείται ικανοποιητικό σε σχέση με την τεχνική και τις υποδομές που ήταν διαθέσιμες στο εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής.

Εκτός από την κατασκευή των ομοιωμάτων με ραδιενεργό πηγή, κατασκευάστηκε ομοίωμα από δοχεία τα οποία πληρώθηκαν με απιονισμένο νερό, για την μέτρηση της ακτινοβολίας υποστρώματος, το οποίο έχει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ομοιωμάτων βαθμονόμησης.

Κεφάλαιο 4

Μέθοδοι ανάλυσης φασμάτων

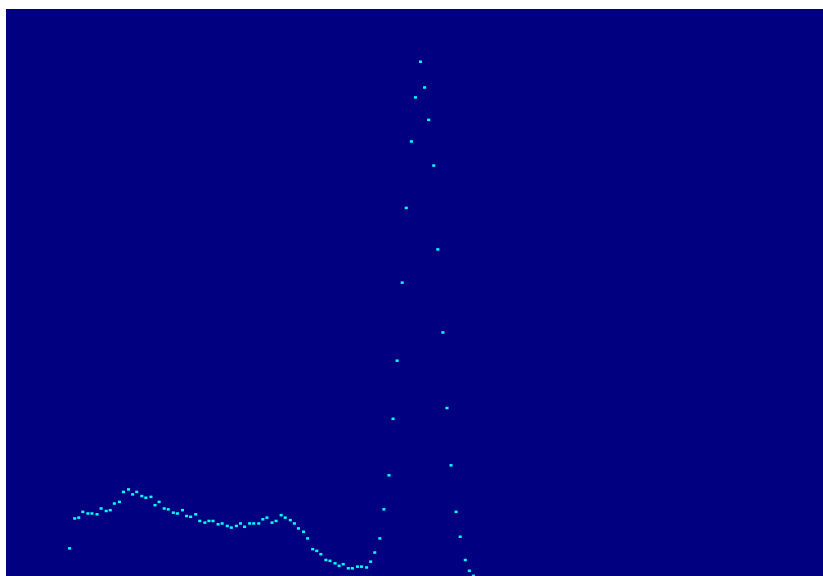
4.1 Εισαγωγή

Η αποτελεσματικότητα των μετρητικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα με τη χρήση του ΜΟΑ καθορίζεται κατά κύριο λόγο από την επίτευξη συγκεκριμένων ποιοτικών χαρακτηριστικών που αφορούν τα τελικά αποτελέσματα. Τα εν λόγω ποιοτικά χαρακτηριστικά σχετίζονται με την ακρίβεια και την αξιοπιστία του συστήματος και εξαρτώνται από ένα πλήθος παραγόντων. Η επιλογή της μεθόδου ανάλυσης των φασματοσκοπικών μετρήσεων που λαμβάνονται, αποτελεί έναν παράγοντα που δύναται να επηρεάσει καθοριστικά την ποιότητα των λαμβανομένων δεδομένων. Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση των μεθόδων που αφορούν την ανάλυση των φασματοσκοπικών δεδομένων. Η διαδικασία στοχεύει τελικά στην επιλογή και εφαρμογή της βέλτιστης μεθοδολογίας.

4.2 Περιγραφή μεθόδων επεξεργασίας φασμάτων

Το σύστημα του ΜΟΑ έχει τη δυνατότητα διεξαγωγής ταυτόχρονων μετρήσεων με τη χρήση 1 έως 16 ανιχνευτών. Η καταγραφή των ανιχνευόμενων γεγονότων γίνεται μέσω κατάλληλου συστήματος Αναλυτή Πολλαπλών Καναλιών (MultiChannel Analyzer, MCA). Ανάλογά με τον αριθμό ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται, το αποτέλεσμα κάθε μέτρησης περιλαμβάνει από 1 έως 16 φάσματα. Κάθε φάσμα, όπως χρησιμοποιήθηκε, αποτελείται από 256 κανάλια, στα οποία καταχωρούνται τα ανιχνευόμενα γεγονότα, σύμφωνα με την ενέργεια τους. Τα φάσματα που παράγονται με τη χρήση συστημάτων MCA αποτελούνται από αριθμό διαδοχικών θέσεων (καναλιών), στα οποία καταχωρούνται γεγονότα συγκεκριμένης ενέργειας.

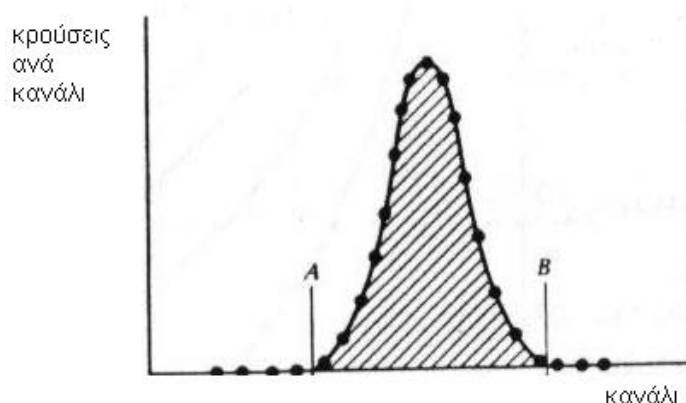
Σημαντικό στοιχείο για την ανάλυση των μετρήσεων και την εξαγωγή χρήσιμων αποτελεσμάτων είναι η αναγνώριση και η ποσοτικοποίηση των βασικών στοιχείων που συνθέτουν τα φάσματα. Το Σχήμα 4.1 παρουσιάζει ένα τυπικό φάσμα που έχει ληφθεί από έναν από τους ανιχνευτές NaI(Tl) του συστήματος. Η μορφή του φάσματος στην περιοχή της κορυφής των 662 keV εμφανίζει χαρακτηριστικά σχεδόν συμμετρικής κατανομής που μπορεί να περιγραφεί από μια κανονική (γκαουσιανή) καμπύλη [Kokta 1972, Mudhole και συν. 1975] γύρω από το κεντροειδές κανάλι της, το οποίο αντιστοιχεί στην ενέργεια της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το προς μέτρηση ραδιοϊσότοπο. Οι μηχανισμοί που εμπλέκονται στην διαμόρφωση της κατανομής είναι στατιστικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την μεταφορά της



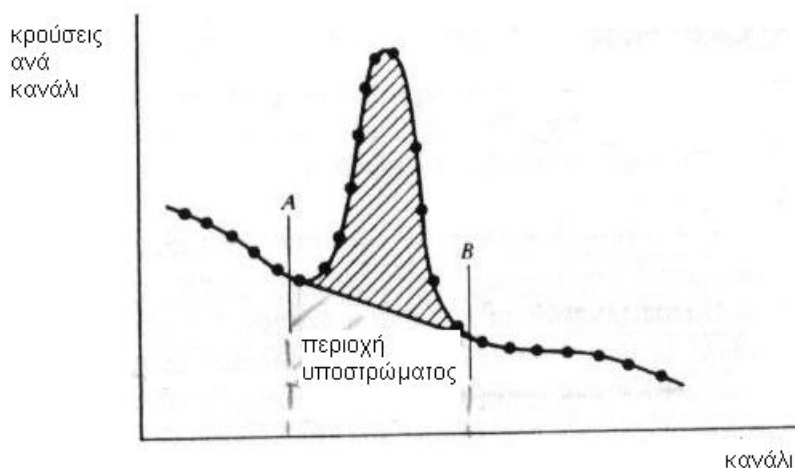
Σχήμα 4.1: Τυπικό φάσμα πηγής ^{137}Cs από ανιχνευτή του ΜΟΑ

ενέργειας από τα φωτόνια προς τα ηλεκτρόνια του υλικού του ανιχνευτή και απορρόφησής της στον ενεργό όγκο του ανιχνευτή [Mudhole και συν. 1975]. Φαινόμενα που επιδρούν στη μορφή της κατανομής και ιδιαίτερα στην απόκλιση από τη γκαουσιανή κατανομή των χαμηλής και υψηλής ενέργειας άκρων της φωτοκορυφής είναι φυσικοί μηχανισμοί όπως ιονισμοί, πολλαπλές σκεδάσεις Compton, φαινόμενα μη γραμμικότητας κατά τη μετατροπή της ενέργειας των ηλεκτρονίων σε ηλεκτρικό παλμό, τυχαία άθροιση παλμών σε υψηλούς ρυθμούς κρούσεων κ.α. [Gilmore 2008].

Εκτός από την μορφή, σημαντικό στοιχείο για την περιγραφή του φάσματος είναι τα δομικά στοιχεία που συνθέτουν την περιοχή της φωτοκορυφής. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η μορφή ενός υποθετικού φάσματος, στο οποίο η φωτοκορυφή σχηματίζεται μόνο από γεγονότα ίδιας αρχικής ενέργειας, ενώ στο Σχήμα 4.3 η μορφή ενός τυπικού φάσματος που αντιπροσωπεύει την καθημερινή πράξη.



Σχήμα 4.2: Μορφή φάσματος που δομείται από φωτόνια ίδιας αρχικής ενέργειας [KnoII 2000]



Σχήμα 4.3: Μορφή πραγματικού φάσματος [Knoll 2000]

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3, η περιοχή της κορυφής περιλαμβάνει δύο τμήματα: 1) την περιοχή η οποία προσδιορίζεται από τα γεγονότα που έχουν την ίδια αρχική ενέργεια και 2) την περιοχή του υποστρώματος. Η περιοχή του υποστρώματος που βρίσκεται κάτω από την κορυφή εμφανίζεται ως αποτέλεσμα πλήθους μηχανισμών, στους οποίους συμπεριλαμβάνεται το συνεχές φάσμα Compton που οφείλεται σε αλληλεπιδράσεις στο εσωτερικό του ανιχνευτή, στο δείγμα ή στη θωράκιση και δεν σχετίζονται με την ενέργεια ενδιαφέροντος, καθώς και τα ραδιονουκλίδια που βρίσκονται στο υπόστρωμα ή και στο ίδιο το δείγμα και πιθανώς σε υπέρθεση παλμών, όταν ο ρυθμός κρούσεων είναι μεγάλος.

Γενικές μέθοδοι επεξεργασίας φάσματος & προϋποθέσεις εφαρμογής

Η απλούστερη διαδικασία μέτρησης της περιοχής της κορυφής είναι η απλή άθροιση των αριθμών των ηλεκτρικών παλμών που έχουν καταγραφεί σε κάθε κανάλι που έχει χρησιμοποιηθεί για τον ορισμό της περιοχής της κορυφής και την ταυτόχρονη αφαίρεση του τμήματος που αποτελεί την συνιστώσα του υποστρώματος του καταγεγραμμένου φάσματος [IEEE 1996].

Οι μέθοδοι προσδιορισμού της περιοχής της κορυφής, εκτός από την μέθοδο που αναφέρθηκε, αποτελούν αντικείμενο πολλών επιστημονικών εργασιών. Στη βιβλιογραφία παρουσιάζεται αριθμός προτεινόμενων μεθόδων οι οποίες κατατάσσονται συχνά σε δύο βασικές κατηγορίες μεθόδων [Kokta 1972]:

1. Άμεση επεξεργασία των δεδομένων που προκύπτουν από τη μέτρηση, δηλαδή τον αριθμό γεγονότων που καταγράφονται σε κάθε κανάλι του φάσματος [Baedeker 1971].
2. Μαθηματική περιγραφή του ληφθέντος φάσματος, που επιτυγχάνεται με την προσαρμογή εξίσωσης στα πειραματικά δεδομένα. Σε αυτή την περίπτωση ο προσδιορισμός των παλμών στην περιοχή της κορυφής προσδιορίζεται από την ολοκλήρωση της εξίσωσης που προσαρμόστηκε στο φάσμα [Helmer και συν 1967].

Προϋποθέσεις εφαρμογής

Η εφαρμογή των μεθόδων προσδιορισμού της περιοχής της φωτοκορυφής επηρεάζεται σημαντικά από ένα σύνολο παραμέτρων που σχετίζονται με την δομή

του καταγραφόμενου φάσματος. Ως σημαντικό πρόβλημα αναφέρεται η ύπαρξη υποστρώματος με σχήμα διαφορετικό από ευθεία γραμμή. Παράδειγμα τέτοιας περίπτωσης είναι η ύπαρξη ραδιονουκλιδίων, τα οποία συνεισφέρουν στη περιοχή του υποστρώματος της κορυφής με τρόπο που το σχήμα του υποστρώματος να είναι και αυτό κορυφή (Peaked Background). Το μέγεθος του υποστρώματος μπορεί να οδηγήσει σε εισαγωγή σημαντικών σφαλμάτων στις περιπτώσεις όπου είναι συγκρίσιμο με τη περιοχή της κορυφής. Η επιρροή του μεγέθους του υποστρώματος γίνεται ακόμα πιο σημαντική, όταν συνοδεύεται από μεγάλες στατιστικές διακυμάνσεις της τιμής του.

4.3 Υλικά και μέθοδοι

Διερευνήθηκαν εναλλακτικές μέθοδοι ανάλυσης φασμάτων με σκοπό την επιλογή της βέλτιστης. Για αυτό το σκοπό μελετήθηκαν φάσματα που προέκυψαν από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σε ανθρωπόμορφα ομοιώματα 73 kg, 177 cm, που περιείχαν υδατικό διάλυμα KCl (~140 g K) ή ^{137}Cs (~1.1 kBq) και τα χαρακτηριστικά τους δίνονται στο Κεφάλαιο 3. Για τη μέτρηση της ακτινοβολίας υποστρώματος χρησιμοποιήθηκε ομοίωμα παρόμοιων γεωμετρικών διαστάσεων και πυκνότητας με το ανθρώπινο σώμα, το οποίο περιείχε απιονισμένο νερό.

Τα δεδομένα που αφορούν τη γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά των ομοιωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Στη 2^η στήλη του πίνακα αναφέρεται η ραδιοισοτοπική σύσταση του υδατικού διαλύματος σε κάθε ομοίωμα. Οι 3^η και 4^η στήλη του πίνακα αναγράφει την συνολική μάζα και το μήκος του ομοιώματος. Στις στήλες 5 και 6 αναγράφεται ο συνολικός όγκος και η ενεργότητα του ραδιοισοτόπου.

Πίνακας 4.1: Στοιχεία ομοιωμάτων

Αριθμός Ομοίωματο ζ	Ισότοπο	Ύψος (cm)	Μάζα (g)	Όγκος διαλύματος (l)	Ενεργότητα a (Bq)
1	^{40}K	177.0(3.0)	72969(200)	64	4365(224)
2	^{137}Cs	177.0(3.0)	72969(200)	64	1133(70)
3	-	177.0(3.0)	72969(200)	64	0

Το Σχήμα 4.4 παρουσιάζει τη γεωμετρική διάταξη των δοχείων που δομούν το ομοίωμα επάνω στην εξεταστική κλίνη. Το σύμβολο (M) αναφέρεται στη χρήση δοχείου ονομαστικού όγκου 2 l ενώ το (μ) αντιστοιχεί σε δοχείο όγκου 1 l. Όπως φαίνεται στο σχήμα, για την κατασκευή του ομοιώματος χρησιμοποιήθηκαν 21 δοχεία των 2 l και 22 δοχεία του 1 l.

Η τεχνική μέτρησης περιελάμβανε τη σάρωση του ομοιώματος για συνολικό μήκος 12 m, που αντιστοιχεί σε τρεις ορθές και τρεις ανάστροφες κινήσεις της εξεταστικής κλίνης. Οι μετρήσεις έγιναν με τη χρήση και των δεκαέξι ανιχνευτών του συστήματος. Κάθε ανιχνευτής τροφοδοτούνταν με υψηλή τάση 950 V. Η ενίσχυση



Σχήμα 4.4: Διάταξη δοχείων ομοιώματος στην εξεταστική κλίνη

του σήματος των ανιχνευτών ρυθμίστηκε ούτως ώστε κατά την ενεργειακή βαθμονόμηση του συστήματος η φωτοκορυφή των 1460 keV του ^{40}K να αντιστοιχεί στο κανάλι 200. Χρησιμοποιήθηκε περιοχή καταγραφής παλμών 256 καναλιών και η μέτρηση έγινε με προτοποθέτηση του χρονομέτρου του MCA για κάθε ανιχνευτή σε Preset Real Time =2100 s. Ο εξαερισμός του δωματίου έγινε με εξαναγκασμένη εισαγωγή αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον.

Για κάθε μέτρηση ομοιώματος με συγκέντρωση ραδιονουκλιδίου, έγινε μέτρηση της ακτινοβολίας υποστρώματος με ομοίωμα υποστρώματος παρόμοιας γεωμετρίας. Η χρονική απόσταση μεταξύ της μέτρησης στο ομοίωμα με ραδιονουκλίδιο και το ομοίωμα υποστρώματος δεν ήταν συνήθως μεγαλύτερη από 15 min, ενώ η σειρά μέτρησης των δύο ομοιωμάτων ήταν τυχαία. Πριν την έναρξη κάθε μέτρησης, γινόταν έλεγχος με χρήση πηγής ^{40}K για πιθανή μετατόπιση των φωτοκορυφών (Peak Drifting)

Η επεξεργασία των δεκαέξι φασμάτων περιελάμβανε τα εξής βήματα:

1. Εντοπισμός της φωτοκορυφής ενδιαφέροντος με οπτικό έλεγχο του φάσματος και με τη χρήση της καμπύλης ενεργειακής βαθμονόμησης.
2. Καθορισμός της περιοχής ενδιαφέροντος (RoI) για την εύρεση του αριθμού των καταγεγραμμένων παλμών.
3. Προσδιορισμός του αριθμού των παλμών στην περιοχή ενδιαφέροντος με τη χρήση κατάλληλης μεθοδολογίας.

Σχετικά με τον προσδιορισμό των ανιχνευόμενων παλμών, εξετάστηκαν τα αποτελέσματα του προκύπτουν κατά την εφαρμογή των εξής τεχνικών:

Η πρώτη τεχνική βασίζεται στον υπολογισμό των συνολικών παλμών που περιέχονται σε μια περιοχή ενδιαφέροντος με απλή άθροιση [IEEE 1996]:

$$A = \sum_{i=l}^{i=r} C_i \quad (4.1)$$

όπου A ο αριθμός των παλμών που περιέχεται στην περιοχή ενδιαφέροντος τα όρια του οποίου καθορίζονται από τα κανάλια r και l εκατέρωθεν του κεντροειδούς και C_i είναι ο αριθμός των παλμών που καταχωρήθηκαν στο κανάλι i .

Ο ρυθμός παλμών στην περιοχή του RoI υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R = \frac{A}{t} \quad (4.2)$$

όπου t είναι ο χρόνος Live Time, που παρέχεται από το χρονόμετρο του MCA.

Λαμβάνοντας υπόψιν τις Σχέσεις 4.1 και 4.2, ο καθαρός ρυθμός παλμών του ραδιοϊσοτόπου ενδιαφέροντος στο ομοίωμα, προσδιορίζεται με βάση τη σχέση:

$$R_{Net} = R_{Gross} - R_{Bg} \quad (4.3)$$

όπου R_{Net} ο καθαρός ρυθμός παλμών σε (cps), R_{Gross} ο ρυθμός παλμών που προσδιορίζεται από τη μέτρηση του ομοιώματος με το ραδιοϊσότοπο σε (cps) και R_{Bg} ο ρυθμός παλμών που προσδιορίζεται από τη μέτρηση του ομοιώματος υποστρώματος.

Η δεύτερη τεχνική που εξετάστηκε περιέχεται ως βασική ρουτίνα ανάλυσης φάσματος στο πρόγραμμα ανάλυσης και επεξεργασίας φάσματος που υποστηρίζει τη λειτουργία του MCA, Maestro32 II. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι μια παραλλαγή της μεθόδου Total Peak Area (TPA). Ο μαθηματικός τύπος υπολογισμού παλμών σε καθορισμένο RoI δίνεται από τη σχέση:

$$N_{Net} = N_{Gross} - N_{Background} \quad (4.4)$$

όπου N_{Gross} είναι το άθροισμα των παλμών στην περιοχή του RoI, εξαιρώντας τα τρία πρώτα και τα τρία τελευταία κανάλια του RoI. Ο δεύτερος όρος της σχέσης, $N_{Background}$, δίνεται από τη σχέση:

$$N_{Background} = \frac{AverCounts_{first3ch} + AverCounts_{last3ch}}{2} \times (EndCh - StartCh + 1 - 6) \quad (4.5)$$

όπου $AverCounts_{first3ch}$ είναι η μέση τιμή των παλμών στα τρία πρώτα κανάλια του RoI, $AverCounts_{last3ch}$ είναι η μέση τιμή των παλμών στα τρία τελευταία κανάλια. Ως $EndCh$ συμβολίζεται ο αριθμός του τελευταίου καναλιού, που ορίζει το RoI και $StartCh$ ο αριθμός του καναλιού του πρώτου καναλιού.

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (4.4) και (4.5), οι διορθωμένοι καθαροί παλμοί N του ραδιοϊσοτόπου ενδιαφέροντος στο ομοίωμα, προσδιορίζεται με τη μεθοδολογία που προτείνεται από το Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας, ΔΟΑΕ [IAEA, 2004]

$$N = N_s - \frac{t_s}{t_b} N_b \quad (4.6)$$

όπου N_s είναι οι καθαροί παλμοί που ανιχνεύονται στο ομοίωμα με το ραδιοϊσότοπο, N_b είναι οι καθαροί παλμοί για το αντίστοιχο RoI στο ομοίωμα υποστρώματος και t_s και t_b συμβολίζουν τον Live χρόνο που καταγράφηκε από το χρονόμετρο του MCA για τις αντίστοιχες μετρήσεις.

Σε κάθε περίπτωση οι συνολικοί καθαροί παλμοί ή εναλλακτικά οι καθαροί ρυθμοί παλμών των ομοιωμάτων υπολογίστηκαν με άθροιση των αντίστοιχων τιμών που προέκυψαν από τους 16 ανιχνευτές.

Πίνακας 4.2: Δεδομένα ενεργειακών παραθύρων που χρησιμοποιήθηκαν

Αριθμός ενεργειακού παραθύρου (RoI)	Ενέργεια φωτοκορυφής (keV)	Όρια ενεργειακού παραθύρου (keV)	Πλάτος ενεργειακού παραθύρου (συνολικός αριθμός καναλιών)	Λόγος πλάτους ενεργειακού παραθύρου προς μέσο FWHM
1	1460	1372-1548	25	1.23
2	1460	1284-1635	49	2.47
3	1460	1365-1569	29	1.44
4	661.6	613-715	15	1.28
5	661.6	569-759	27	2.37

Οι εν λόγω μέθοδοι ανάλυσης φάσματος εφαρμόστηκαν σε ενεργειακές περιοχές (RoI) διαφορετικού πλάτους. Πιο συγκεκριμένα, θεωρήθηκαν τρεις εναλλακτικές RoI για τις μετρήσεις του ομοιώματος KCl και δύο RoI για το ομοίωμα ^{137}Cs . Ο Πίνακας 4.2 παρουσιάζει τα στοιχεία των RoI που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε περίπτωση. Η τελευταία στήλη του πίνακα αναγράφει το λόγο του πλάτους του εφαρμοζόμενου RoI προς το μέσο FWHM του συστήματος των ανιχνευτών, στην εξεταζόμενη ενεργειακή περιοχή.

Η επιλογή του 1^{ου} και του 4^{ου} RoI για τα φάσματα του ^{40}K και του ^{137}Cs αντίστοιχα, έγινε βάση βιβλιογραφικής αναφοράς σύμφωνα με την οποία η ελάχιστη αβεβαιότητα στο υπολογισμό της περιοχής της φωτοκορυφής, επιτυγχάνεται στην περίπτωση που το συνολικό πλάτος ολοκλήρωσης περιλαμβάνει το 85.9% της συνολικής περιοχής, γεγονός που αντιστοιχεί περίπου σε πλάτος 1.25 φορές το FWHM. Το 2^ο και 5^ο RoI αντιστοιχούν περίπου στο 99.7% της περιοχής της φωτοκορυφής και αντιστοιχεί σε ~2.5 φορές το FWHM. Τέλος το 3^ο RoI που χρησιμοποιείται για τα φάσματα ^{40}K , προτείνεται στην αναφορά IAEA-TRS-323 και είναι το μοναδικό ασύμμετρο παράθυρο της παρούσας μελέτης.

4.4 Αποτελέσματα

Ο Πίνακας 3.γ περιλαμβάνει τα αποτελέσματα των παλμών που κατεγράφησαν στην ενεργειακή περιοχή των 1460 keV του ^{40}K για δεκατρείς μετρήσεις του ομοιώματος KCl και ισάριθμες μετρήσεις του ομοιώματος υποστρώματος. Ο προσδιορισμός των αποτελεσμάτων έγινε με τη χρήση του 1^{ου} ενεργειακού παραθύρου γύρω από τη φωτοκορυφή των 1460 keV (Πίνακας 4.2). Οι επεξεργασίες των φασμάτων έγινε σύμφωνα με τις δύο θεωρούμενες τεχνικές ανάλυσης που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο τμήμα. Η 2^η και 5^η στήλη του πίνακα αναγράφει τη διάρκεια της μέτρησης του ομοιώματος με διάλυμα KCl και του ομοιώματος υποστρώματος αντίστοιχα, που αντιπροσωπεύεται από την τιμή του Live χρόνου μέτρησης που δίνεται από το χρονόμετρο του Αναλυτή Πολλαπλών Καναλιών του συστήματος. Η

3^η και 6^η στήλη περιέχουν τον αριθμό των παλμών στις περιοχές ενδιαφέροντος των φασμάτων που προέκυψαν από τις μετρήσεις του ομοιώματος

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα ανάλυσης φασμάτων ομοιώματος KCl για το 1^ο ενεργειακό παράθυρο

Αριθμός μέτρησης	Διάρκεια κύριας μέτρησης (s)	Αριθμός παλμών Gross _{main} (c)	Αριθμός παλμών Net _{main} (c)	Διάρκεια μέτρησης υποσ/τος (s)	Αριθμός παλμών Gross _{BG} (c)	Αριθμός παλμών Net _{BG} (c)
1	2012	27544	6665	2014	18140	3448
2	2003	27595	7199	2005	18224	3620
3	2005	27374	6566	2008	18439	3460
4	1997	27024	6820	1997	17503	3378
5	1998	27116	6945	1998	17861	3361
6	1998	27295	6374	1999	17830	3534
7	1993	26921	6588	1994	17660	3489
8	1992	26656	7060	1993	17653	2957
9	2031	27821	7309	2031	18390	3157
10	2037	28127	7056	2040	18569	3157
11	2039	28577	7002	2041	18564	3581
12	2038	28288	6713	2038	19027	3219
13	2035	28514	7239	2038	18749	3653

KCl (Gross_{main}) και του ομοιώματος υποστρώματος (Gross_{BG}) αντίστοιχα. Οι παλμοί στις εν λόγω στήλες υπολογίζονται με βάση την σχέση 4.1. Παρόμοια, η 4^η και 7^η στήλη περιέχει τον αριθμό των παλμών που υπολογίζονται με βάση την σχέση 4.4 για τις μετρήσεις των ομοιωμάτων KCl και υποστρώματος αντίστοιχα.

Ο προσδιορισμός του ρυθμού παλμών που προέρχονται από την ποσότητα ⁴⁰K που περιέχεται στο ομοίωμα KCl βρέθηκε με ανάλυση των δεδομένων του Πίνακα 3.γ. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκε ο καθαρός ρυθμός παλμών από το ομοίωμα KCl με τη χρήση της σχέσης 4.3 και τα κατάλληλα δεδομένα του Πίνακα 4.3 (2^η, 3^η και 6^η στήλη). Αντίστοιχα, ο καθαρός ρυθμός παλμών ⁴⁰K με βάση τη 2^η μεθοδολογία, υπολογίστηκε με τη χρήση της εξίσωσης 4.4 και τα δεδομένα που περιέχονται στη 4^η, 5^η και 7^η στήλη του Πίνακα 4.3.

Ο Πίνακας 4.4 περιέχει τα αποτελέσματα που αναφέρονται στον καθαρό ρυθμό παλμών βάση των δύο μεθοδολογιών.

Ο Πίνακας 4.5 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του αριθμού παλμών ⁴⁰K, στα ομοιώματα με διάλυμα KCl και υποστρώματος, με χρήση του 2^{ου} ενεργειακού παραθύρου που αναφέρεται στον Πίνακα 4.2. Η δομή του Πίνακα 4.5 και ο ορισμός των μεγεθών που περιγράφει είναι παρόμοια με εκείνα του Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.4: Καθαροί ρυθμοί παλμών στην περιοχή των 1460 keV για το 1^ο ενεργειακό παράθυρο

Αριθμός μέτρησης	Ρυθμός παλμών 1 ^η Μέθοδος (c/s)	Ρυθμός παλμών 2 ^η Μέθοδος (c/s)
1	4.68	1.60
2	4.69	1.79
3	4.47	1.55
4	4.77	1.72
5	4.63	1.79
6	4.74	1.42
7	4.65	1.56
8	4.52	2.06
9	4.64	2.04
10	4.71	1.92
11	4.92	1.68
12	4.54	1.71
13	4.81	1.76

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα ανάλυσης φασμάτων ομοιώματος KCl για το 2^ο ενεργειακό παράθυρο

Αριθμός μέτρησης	Διάρκεια κύριας μέτρησης (s)	Αριθμός παλμών Gross _{main} (c)	Αριθμός παλμών Net _{main} (c)	Διάρκεια μέτρησης υποσ/τος (s)	Αριθμός παλμών Gross _{BG} (c)	Αριθμός παλμών Net _{BG} (c)
1	2012	41456	15772	2014	29336	8364
2	2003	41404	16749	2005	29425	8086
3	2005	41192	16243	2008	29845	8514
4	1997	40629	15990	1997	28203	7558
5	1998	40695	15836	1998	28976	8135
6	1998	40888	16649	1999	28897	8121
7	1993	40318	16725	1994	28546	8301
8	1992	40107	16505	1993	28543	7816
9	2031	41912	16726	2031	29682	8824
10	2037	42297	16646	2040	30171	7533
11	2039	43019	17441	2041	30189	9037
12	2038	42566	17029	2038	30672	8728
13	2035	43101	17156	2038	30506	8391

Πίνακας 4.6: Καθαροί ρυθμοί παλμών στην περιοχή των 1460 keV για το 2^ο ενεργειακό παράθυρο

Αριθμός μέτρησης	Ρυθμός παλμών 1 ^η Μέθοδος (c/s)	Ρυθμός παλμών 2 ^η Μέθοδος (c/s)
1	6.04	3.69
2	6.00	4.33
3	5.68	3.86
4	6.22	4.22
5	5.87	3.85
6	6.01	4.27
7	5.91	4.23
8	5.81	4.36
9	6.02	3.89
10	5.97	4.48
11	6.31	4.13
12	5.84	4.07
13	6.21	4.31

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα ανάλυσης φασμάτων ομοιώματος KCl για το 3^ο ενεργειακό παράθυρο

Αριθμός μέτρησης	Διάρκεια κύριας μέτρησης (s)	Αριθμός παλμών Gross _{main} (c)	Αριθμός παλμών Net _{main} (c)	Διάρκεια μέτρησης υποσ/τος (s)	Αριθμός παλμών Gross _{BG} (c)	Αριθμός παλμών Net _{BG} (c)
1	2012	30079	9639	2014	20090	4416
2	2003	30109	9364	2005	20135	4900
3	2005	29956	8825	2008	20354	4931
4	1997	29498	8869	1997	19320	4298
5	1998	29669	8760	1998	19790	4425
6	1998	29850	8888	1999	19724	4649
7	1993	29424	8423	1994	19525	4489
8	1992	29114	8640	1993	19548	4197
9	2031	30439	9714	2031	20455	4167
10	2037	30622	9471	2040	20575	4050
11	2039	31288	9122	2041	20622	4416
12	2038	30842	9247	2038	21047	4643
13	2035	31169	9501	2038	20765	4472

Ο Πίνακας 4.6 περιέχει τα αποτελέσματα που αναφέρονται στον καθαρό ρυθμό παλμών βάση των δύο μεθοδολογιών, για τα δεδομένα που εξήχθησαν με χρήση του 2^{ου} ενεργειακού παραθύρου στην περιοχή του ⁴⁰K.

Ο Πίνακας 4.7 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των παλμών στην περιοχή του ⁴⁰K, στα ομοιώματα KCl και υποστρώματος, με τη χρήση του 3^{ου} ενεργειακού παραθύρου που αναφέρεται στον Πίνακα 4.2. Η δομή του πίνακα και ο ορισμός των μεγεθών που περιγράφει είναι παρόμοια με εκείνα του Πίνακα 4.3.

Ο Πίνακας 4.8 περιέχει τα αποτελέσματα που αναφέρονται στον καθαρό ρυθμό παλμών βάση των δύο μεθοδολογιών, για τα δεδομένα που εξήχθησαν με την χρήση του 3^{ου} ενεργειακού παραθύρου στην περιοχή του ⁴⁰K.

Πίνακας 4.8: Καθαροί ρυθμοί παλμών στην περιοχή των 1460 keV για το 3^ο ενεργειακό παράθυρο

Αριθμός μέτρησης	Ρυθμός παλμών 1 ^η Μέθοδος (c/s)	Ρυθμός παλμών 2 ^η Μέθοδος (c/s)
1	4.97	2.60
2	4.99	2.23
3	4.80	1.95
4	5.10	2.29
5	4.94	2.17
6	5.07	2.12
7	4.97	1.98
8	4.81	2.23
9	4.92	2.73
10	4.95	2.66
11	5.24	2.31
12	4.81	2.26
13	5.13	2.47

Η διαδικασία μελέτης διαφορετικών μεθοδολογιών για την ανάλυση των φασμάτων, εφαρμόστηκε εκτός των άλλων και σε δεδομένα που προέκυψαν από μετρήσεις σε ομοίωμα που περιείχε ομοιόμορφα κατανομημένη ποσότητα ¹³⁷Cs.

Ο Πίνακας 4.9 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των παλμών στην περιοχή του ¹³⁷Cs, στα ομοιώματα που περιείχαν ¹³⁷Cs και υποστρώματος, με τη χρήση του 4^{ου} ενεργειακού παραθύρου που αναφέρεται στον Πίνακα 4.2. Η δομή του πίνακα και ο ορισμός των μεγεθών που περιγράφει είναι παρόμοια με εκείνα του Πίνακα 4.3.

Ο Πίνακας 4.10 περιέχει τα αποτελέσματα που αναφέρονται στον καθαρό ρυθμό παλμών βάση των δύο μεθοδολογιών, για τα δεδομένα που εξήχθησαν με χρήση του 4^{ου} ενεργειακού παραθύρου στην περιοχή του ¹³⁷Cs.

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα ανάλυσης φασμάτων ομοιώματος ^{137}Cs για το 4^ο ενεργειακό παράθυρο

Αριθμός μέτρησης	Διάρκεια κύριας μέτρησης (s)	Αριθμός παλμών $Gross_{main}$ (c)	Αριθμός παλμών Net_{main} (c)	Διάρκεια μέτρησης υποσ/τος (s)	Αριθμός παλμών $Gross_{BG}$ (c)	Αριθμός παλμών Net_{BG} (c)
1	1996	49335	7065	1999	22486	-387
2	1997	50007	6600	1998	22479	-434
3	1995	49935	6600	1997	24174	-446
4	2031	50944	7352	2035	24197	-558
5	2001	49413	6721	2001	22870	-545
6	2002	49660	7543	2005	23294	-466
7	1998	49258	6843	1998	21921	-494
8	1998	49358	5936	2001	23736	-882
9	1996	49065	7470	2000	22458	-325
10	1998	48313	6321	1999	23367	-741
11	2006	49609	6824	2000	23278	-467
12	2007	49349	6587	2009	23948	-610
13	2004	50358	6678	2007	23740	-303

Πίνακας 4.10: Καθαροί ρυθμοί παλμών στην περιοχή των 662 keV για το 4^ο ενεργειακό παράθυρο

Αριθμός μέτρησης	Ρυθμός παλμών 1 ^η Μέθοδος (c/s)	Ρυθμός παλμών 2 ^η Μέθοδος (c/s)
1	13.47	3.73
2	13.79	3.52
3	12.92	3.53
4	13.19	3.89
5	13.26	3.63
6	13.19	4.00
7	13.68	3.67
8	12.84	3.41
9	13.35	3.90
10	12.49	3.53
11	13.09	3.64
12	12.67	3.59
13	13.30	3.48

Πίνακας 4.11: Αποτελέσματα ανάλυσης φασμάτων ομοιώματος ^{137}Cs για το 5^ο ενεργειακό παράθυρο

Αριθμός μέτρησης	Διάρκεια κύριας μέτρησης (s)	Αριθμός παλμών $\text{Gross}_{\text{main}}$ (c)	Αριθμός παλμών Net_{main} (c)	Διάρκεια μέτρησης υποσ/τος (s)	Αριθμός παλμών Gross_{BG} (c)	Αριθμός παλμών Net_{BG} (c)
1	1996	74437	22179	1999	40617	95
2	1997	75449	22250	1998	41163	-408
3	1995	75374	22679	1997	43331	1018
4	2031	76488	23379	2035	43225	759
5	2001	75060	22001	2001	41080	1161
6	2002	75056	21700	2005	41891	595
7	1998	74582	21874	1998	40059	-603
8	1998	74429	22364	2001	42747	209
9	1996	74171	22214	2000	40673	673
10	1998	73217	21116	1999	42091	326
11	2006	74784	22679	2000	41928	821
12	2007	75030	21836	2009	42988	877
13	2004	76091	22402	2007	42932	605

Πίνακας 4.12: Καθαροί ρυθμοί παλμών στην περιοχή των 662 keV για το 5^ο ενεργειακό παράθυρο

Αριθμός μέτρησης	Ρυθμός παλμών 1 ^η Μέθοδος (c/s)	Ρυθμός παλμών 2 ^η Μέθοδος (c/s)
1	16.97	11.06
2	17.18	11.35
3	16.08	10.86
4	16.42	11.14
5	16.98	10.41
6	16.60	10.54
7	17.28	11.25
8	15.89	11.09
9	16.82	10.79
10	15.59	10.41
11	16.32	10.90
12	15.99	10.44
13	16.58	10.88

Ο Πίνακας 4.11 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των παλμών ^{137}Cs , στα ομοιώματα ^{137}Cs και υποστρώματος, με τη χρήση του 5^{ου} ενεργειακού παραθύρου που αναφέρεται στον Πίνακα 4.2. Η δομή του πίνακα και ο ορισμός των μεγεθών που περιγράφει είναι παρόμοια με εκείνα του Πίνακα 4.3. Αντίστοιχα, ο Πίνακας 4.12 περιέχει τα αποτελέσματα που αναφέρονται στον καθαρό ρυθμό παλμών βάση των δύο μεθοδολογιών, για τα δεδομένα που εξήχθησαν με την χρήση του 5^{ου} ενεργειακού παραθύρου στην περιοχή του ^{137}Cs .

4.5 Ανάλυση - Συζήτηση

Μετρήσεις Καλίου

Οι μέθοδοι ανάλυσης φασμάτων που εκφράζονται από τις εξισώσεις (2) και (4), αξιολογήθηκαν μέσω του υπολογισμού των ποιοτικών παραμέτρων που αφορούν την αξιοπιστία και την ακρίβεια των αντίστοιχων αποτελεσμάτων. Από τα δεδομένα των Πινάκων 4.4, 4.6, 4.8 υπολογίστηκε η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας του καθαρού ρυθμού παλμών ^{40}K για κάθε ένα από τα τρία ενεργειακά παράθυρα στην περιοχή των 1460 keV, που μελετήθηκαν. Επιπρόσθετα, υπολογίστηκε η αναμενόμενη θεωρητική τυπική απόκλιση καθώς και ο θεωρητικός συντελεστής μεταβλητότητας με την υπόθεση ότι τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή. Στον Πίνακα 4.13 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα υπολογιζόμενα στατιστικά μεγέθη.

Από τη σύγκριση των στατιστικών μεγεθών του Πίνακα 3.μ παρατηρείται ότι για το 1^ο ενεργειακό παράθυρο, ο πειραματικός συντελεστής μεταβλητότητας της 2^{ης} μεθόδου είναι περίπου 4.2 φορές μεγαλύτερος από την αντίστοιχη τιμή της 1^{ης} μεθόδου. Στο 2^ο ενεργειακό παράθυρο η διαφορά μεταξύ των δύο συντελεστών μεταβλητότητας μειώνεται και ο συντελεστής μεταβλητότητας της 2^{ης} μεθόδου είναι μεγαλύτερος κατά 1.9 φορές. Για το 3^ο ενεργειακό παράθυρο, ο συντελεστής μεταβλητότητας της 2^{ης} μεθόδου εμφανίζεται μεγαλύτερος κατά 3.9 φορές.

Η σύγκριση των συντελεστών μεταβλητότητας σε σχέση με το επιλεγόμενο ενεργειακό παράθυρο, υποδηλώνει πως στην πρώτη μέθοδο το 1^ο και 3^ο ενεργειακό παράθυρο έχουν παρόμοιους συντελεστές μεταβλητότητας της τάξης του 2.6% και 2.7% αντίστοιχα, ενώ το 2^ο ενεργειακό παράθυρο δίνει αποτελέσματα των οποίων ο συντελεστής μεταβλητότητας είναι της τάξης του 3%. Αντίστοιχα για τη 2^η μέθοδο, το 2^ο ενεργειακό παράθυρο παρουσιάζει την καλύτερη τιμή για το μέγεθος της αξιοπιστίας που είναι της τάξης του 5.8 %. Η τεχνική ανάλυσης φάσματος που περιλαμβάνει την εφαρμογή της 1^{ης} μεθόδου στο 1^ο ενεργειακό παράθυρο, παρουσιάζει την καλύτερη αξιοπιστία που είναι της τάξης 2.6%. Η τιμή αυτή είναι κατά 13% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη θεωρητική τιμή.

Ο πειραματικός συντελεστής μεταβλητότητας με χρήση της πρώτης μεθόδου βρέθηκε να είναι μεγαλύτερος του θεωρητικού κατά ~15% ως 35%, ενώ στην περίπτωση της δεύτερης μεθόδου μεγαλύτερος κατά ~210%. Η παρατηρούμενη διαφορά στους συντελεστές μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους μπορεί να αποδοθεί κατά κύριο λόγο στα χαρακτηριστικά του φάσματος στην περιοχή του ^{40}K καθώς και σε δομικές αδυναμίες του προγράμματος επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκε κατά την εφαρμογή της 2^{ης} μεθόδου. Αναφορικά με τη μορφή του φάσματος, τα πειραματικά φάσματα υποστρώματος που λήφθηκαν

Πίνακας 4.13: Στατιστικά μεγέθη καθαρού ρυθμού παλμών βάση των δύο μεθόδων

Αριθμός ενεργειακού παραθύρου (keV)	Στατιστικό μέγεθος	1 ^η μεθοδολογία	2 ^η μεθοδολογία
1 (1372-1548)	μέση τιμή (cps)	4.67	1.74
	τυπική απόκλιση (cps)	0.12	0.19
	συντελεστής μεταβλητότητας	0.026	0.108
	θεωρητική τυπική απόκλιση (cps)	0.11	-
	συντελεστής μεταβλητότητας	0.023	-
2 (1285-1635)	μέση τιμή (cps)	5.99	4.13
	τυπική απόκλιση (cps)	0.18	0.24
	συντελεστής μεταβλητότητας	0.030	0.058
	θεωρητική τυπική απόκλιση (cps)	0.13	-
3 (1365-1569)	συντελεστής μεταβλητότητας	0.022	-
	μέση τιμή (cps)	4.98	2.31
	τυπική απόκλιση(cps)	0.13	0.24
	συντελεστής μεταβλητότητας	0.027	0.106
	θεωρητική τυπική απόκλιση (cps)	0.11	-
	συντελεστής μεταβλητότητας	0.022	-

από τη μέτρηση του αντίστοιχου ομοιώματος καταδεικνύουν πως η περιοχή υποστρώματος που βρίσκεται κάτω από την φωτοκορυφή, δεν έχει γραμμική συμπεριφορά, αλλά παρουσιάζει μια ενδογενή κορυφή που οφείλεται στην ενεργότητα του ^{40}K που περιέχεται τόσο στο εσωτερικό των ανιχνευτών, όσο και στο περιβάλλον τους. Σύμφωνα με τον Kokta [1972], η ύπαρξη υποστρώματος με μη γραμμική μορφή δημιουργεί σημαντικά προβλήματα στην αξιοπιστία των

αποτελεσμάτων, εισάγοντας μεγάλα σφάλματα. Το πρόβλημα επιτείνεται όταν οι ρυθμοί που καταγράφονται στο μετρούμενο δείγμα και στη μέτρηση υποστρώματος είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, όπως στην παρούσα περίπτωση. Ο Gilmore [2008] αναφέρει πως στις περιπτώσεις εμφάνισης κορυφών στο υπόστρωμα (Peaked Background) θα πρέπει να εφαρμόζονται κατάλληλες διορθώσεις στα πρωτογενή δεδομένα για την αποφυγή εισαγωγής και διάδοσης επιπρόσθετων σφαλμάτων στον υπολογισμό της ενεργότητας του δείγματος. Κατά τον Gilmore οι εν λόγω διορθώσεις πρέπει να γίνονται από το λογισμικό επεξεργασίας υπό τη μορφή ρυθμού ανά κανάλι φάσματος. Στην περίπτωση όμως του MOA, το υπό χρήση λογισμικό δεν διαθέτει δυνατότητα διόρθωσης για την ύπαρξη μη γραμμικού υποστρώματος.

Σχετικά με τις διαφορές που εντοπίζονται στην απόδοση των δύο μεθόδων σε καθένα από τα τρία ενεργειακά παράθυρα, αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την εφαρμογή της 2^{15} μεθόδου δεν υπολογίζεται ο αριθμός παλμών των τριών καναλιών που βρίσκονται σε κάθε άκρο της φωτοκορυφής. Οι παλμοί αυτών των έξι καναλιών χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του υποστρώματος που βρίσκεται κάτω από την φωτοκορυφή. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μικρότερες τιμές, αν και αναφέρεται σε ίδια ονομαστικά πλάτη περιοχών ενδιαφέροντος.

Μετρήσεις ^{137}Cs

Σε αντιστοιχία με την ανάλυση που προηγήθηκε για τα δεδομένα που αφορούν τις μετρήσεις του ομοιώματος KCl, υπολογίστηκαν τα στατιστικά μεγέθη που αφορούν τα δεδομένα που αφορούν τις μετρήσεις του ομοιώματος ^{137}Cs στην ενεργειακή περιοχή των 662 keV (Πίνακες 4.10, 4.11), για τα ενεργειακά παράθυρα που ορίστηκαν για το ^{137}Cs .

Από τη σύγκριση των στατιστικών μεγεθών του Πίνακα 3.ν παρατηρείται ότι για το 4^ο ενεργειακό παράθυρο, ο πειραματικός συντελεστής μεταβλητότητας της 2^{15} μεθόδου είναι περίπου 1.75 φορές μεγαλύτερος από την αντίστοιχη τιμή της 1^{15} μεθόδου. Αντίθετα, στο 5^ο ενεργειακό παράθυρο οι πειραματικοί συντελεστές μεταβλητότητας των δύο μεθόδων εμφανίζονται παρόμοιοι.

Η σύγκριση της αξιοπιστίας των εξεταζόμενων μεθόδων σε σχέση με το χρησιμοποιούμενο ενεργειακό παράθυρο, αναδεικνύει πως στην 1^η μέθοδο το 4^ο ενεργειακό παράθυρο παρουσιάζει πειραματικό συντελεστή μεταβλητότητας που είναι ~12% μικρότερος από τον αντίστοιχο του 5^{ου} παραθύρου. Αντίστοιχα για τη 2^{15} μέθοδο, το 5^ο ενεργειακό παράθυρο παρουσιάζει την καλύτερη τιμή για το μέγεθος της αξιοπιστίας που είναι κατά 40 % μικρότερη από την αντίστοιχη του 4^{ου} παραθύρου. Η τεχνική ανάλυσης φάσματος που περιλαμβάνει την εφαρμογή της 1^{15} μεθόδου στο 4^ο ενεργειακό παράθυρο, παρουσιάζει την καλύτερη αξιοπιστία που είναι της τάξης 2.8%. Η τιμή αυτή είναι κατά 2.8 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη θεωρητική τιμή. Οι τιμές των σχετικών σφαλμάτων αξιοπιστίας των δύο τεχνικών, στην περίπτωση του ^{137}Cs , εμφανίζουν μικρότερες διαφορές σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίστηκαν στο ^{40}K . Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την απουσία δομημένου υποστρώματος στην περιοχή του ^{137}Cs ανάλογου μεγέθους με αυτό που παρατηρείται στη περιοχή του ^{40}K . Σε αυτήν την περίπτωση, η χρήση της μεθόδου του τραπεζοειδούς δίνει εξίσου αξιόπιστα αποτελέσματα.

Πίνακας 4.14: Στατιστικά μεγέθη καθαρού ρυθμού παλμών βάση των δύο μεθόδων

Αριθμός ενεργειακού παραθύρου (keV)	Στατιστικό μέγεθος	1 ^η μέθοδος	2 ^η μέθοδος
4 (613-715)	μέση τιμή (cps)	13.17	3.66
	τυπική απόκλιση (cps)	0.37	0.18
	συντελεστής μεταβλητότητας	0.028	0.049
	θεωρητική τυπική απόκλιση (cps)	0.13	-
	συντελεστής μεταβλητότητας	0.010	-
5 (569-759)	μέση τιμή (cps)	16.52	10.86
	τυπική απόκλιση (cps)	0.53	0.32
	συντελεστής μεταβλητότητας	0.032	0.030
	θεωρητική τυπική απόκλιση (cps)	0.17	-
	συντελεστής μεταβλητότητας	0.010	-

Εφαρμογή διόρθωσης αλληλεπίδρασης καναλιών-τεχνική spectrum stripping

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των δύο τεχνικών ανάλυσης φασμάτων, διαπιστώθηκε πως η 1^η μέθοδος, που περιγράφεται από την εξίσωση (1), δίνει αποτελέσματα με τη βέλτιστη αξιοπιστία και απόδοση. Παρά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της, η εν λόγω μέθοδος δεν λαμβάνει υπόψη της κατά τον υπολογισμό των ρυθμών γεγονότων στις περιοχές ενδιαφέροντος, την συνεισφορά από γεγονότα που δεν οφείλονται στο ραδιοϊσότοπο ή στη διαδικασία ραδιενεργού αποδιέγερσης που μελετάται μέσω της γάμμα φασματοσκοπίας.

Το γεγονός αυτό καθιστά απαραίτητη την εφαρμογή κατάλληλης διόρθωσης με σκοπό την αφαίρεση της συνεισφοράς παλμών που δεν σχετίζονται με αυτήν. Η τεχνική που αναπτύχθηκε για τα ισότοπα του ^{214}Bi και ^{40}K , τα οποία περιέχονται ως συστατικά του φυσικού υποστρώματος και επηρεάζουν τις μετρήσεις ισοτόπων στο ανθρώπινο σώμα. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκαν οι εξής περιπτώσεις:

1. Η επίδραση της παρουσίας του ^{214}Bi στο ενεργειακό παράθυρο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ενεργότητας του ^{40}K . Η διόρθωση που αφορά την συγκεκριμένη περίπτωση δίνεται από τη σχέση:

$$N_{K-40(cor)} = N_{K-40} - aN_{Bi-214} \quad (4.7)$$

όπου $N_{K-40(cor)}$ είναι οι διορθωμένοι παλμοί ^{40}K . N_{K-40} είναι οι παλμοί που υπολογίζονται με τη χρήση του 1^{00} ενεργειακού παραθύρου του Πίνακα 4.2 (25 καναλιών) και N_{Bi-214} είναι οι παλμοί που οφείλονται στο ^{214}Bi και υπολογίζονται από το ενεργειακό παράθυρο 1671 keV-1817 keV (21 καναλιών) με κεντρική ενέργεια τα 1764 keV. Ο παράγοντας a εκφράζει τον αριθμό των καταγραφόμενων γεγονότων στο παράθυρο του ^{40}K ανά μονάδα γεγονότων που καταγράφονται στο παράθυρο του ^{214}Bi στην ενεργειακή περιοχή των ~ 1.76 MeV.

2. Η επίδραση της παρουσίας του ^{214}Bi και ^{40}K σε κανάλια χαμηλότερης ενέργειας. Η διόρθωση που αφορά την συγκεκριμένη περίπτωση δίνεται από τη σχέση:

$$N_{ch(cor)} = N_{ch} - bN_{K-40(cor)} - cN_{Bi-214} \quad (4.8)$$

όπου $N_{ch(cor)}$ είναι οι διορθωμένοι παλμοί που καταγράφονται στο κανάλι ch έπειτα από την αφαίρεση της συνεισφοράς των παλμών που προέρχονται από την παρουσία των ^{40}K και ^{214}Bi στο συγκεκριμένο κανάλι. $N_{K-40(cor)}$ είναι οι διορθωμένοι παλμοί στο παράθυρο του ^{40}K σύμφωνα με την εξίσωση (4.7) και N_{Bi-214} ο αριθμός παλμών στο παράθυρο του ^{214}Bi . Ο παράγοντας b εκφράζει τον αριθμό παλμών στο κανάλι ενδιαφέροντος ανά μονάδα διορθωμένων παλμών που καταγράφονται στο ενεργειακό παράθυρο του ^{40}K και ο παράγοντας c εκφράζει τον αριθμό παλμών στο κανάλι ενδιαφέροντος ανά μονάδα παλμών, που καταγράφονται στο ενεργειακό παράθυρο του ^{214}Bi .

Οι τιμές των συντελεστών διόρθωσης a και b , c που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις (4.7), (4.8) υπολογίστηκαν με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος βασίζεται σε άμεσους υπολογισμούς από καθαρά φάσματα ^{40}K και ^{214}Bi . Ο δεύτερος τρόπος περιλαμβάνει την εξαγωγή των συντελεστών με τη χρήση κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου του συστήματος που βασίζεται στη χρήση της μεθόδου Monte Carlo.

Περιγραφή υπολογιστικού μοντέλου

Με σκοπό τον υπολογισμό των παραγόντων διορθώσεων φάσματος αναπτύχθηκε μοντέλο του μετρητή με τη χρήση του Monte Carlo κωδικά MCNP5. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του MOA και των ομοιωμάτων περιγράφεται με λεπτομέρεια στο Κεφ. 7. Ειδικότερα, προσομοιώθηκαν τέσσερα ομοιώματα των οποίων τα χαρακτηριστικά περιγράφονται στον Πίνακα 4.14. Τα ομοιώματα που προσομοιώθηκαν είχαν ανά δύο όμοια γεωμετρία και ισοτοπική σύσταση. Σημειώνεται ότι χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές γεωμετρίες ανά ισότοπο με σκοπό την μελέτη της επίδρασης του μεγέθους του σωματότυπου στην τιμή των συντελεστών διόρθωσης.

Πίνακας 4.15: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά υπολογιστικών ομοιωμάτων

Αριθμός ομοιώματος	Μάζα (kg)	Ύψος (cm)	Πηγή
1	30.087	138.58	^{40}K
2	69.980	172.26	^{40}K
3	30.087	138.58	^{214}Bi
4	69.980	172.26	^{214}Bi

Αποτελέσματα υπολογιστικού μοντέλου

Αποτέλεσμα της προσομοίωσης κάθε ομοιώματος ήταν η εκτίμηση της απόδοσης ανίχνευσης σε κάθε ένα από τα 256 κανάλια σε καθένα από τους ανιχνευτές του συστήματος σε 15 θέσεις του ομοιώματος και της εξεταστικής κλίνης σε σχέση με το κέντρο της ανιχνευτικής διάταξης, ώστε να ληφθεί υπόψη η διαδικασία σάρωσης που λαμβάνει χώρα.

Ο παράγοντας a στην εξίσωση 4.7, που εκφράζει τον αριθμό των παλμών στο ενεργειακό παράθυρο του ^{40}K (με κεντροειδές κανάλι τα 1460 keV) ανά μονάδα παλμών στο ενεργειακό παράθυρο του ^{214}Bi , βρέθηκε με τη χρήση των δεδομένων της προσομοίωσης των ομοιωμάτων ^{214}Bi . (Πίνακας 4.15) Η τιμή του παράγοντα a υπολογίστηκε για τα ομοιώματα διαφορετικής γεωμετρίας, προέκυψε ως ο λόγος της απόδοσης στο παράθυρο του ^{40}K διά την απόδοση στο παράθυρο του ^{214}Bi και αφορά το αποτέλεσμα που προκύπτει από την άθροιση των παλμών από τους 16 ανιχνευτές.

Πίνακας 4.16: Αποτελέσματα προσομοίωσης Monte Carlo

Αριθμός ομοιώματος (kg)	Απόδοση ^{40}K $\times(10^{-3})$	Απόδοση ^{214}Bi $\times(10^{-3})$	a
3 (30)	1.545	1.483	1.0419
4 (70)	1.492	1.410	1.0581

Οι τιμές του παράγοντα a που προέκυψαν για τα ομοιώματα 3 και 4 παρουσιάζουν μικρή διαφορά $\sim 1.5\%$ που δεν είναι στατιστικά σημαντική με συνέπεια την χρήση ενός κοινού παράγοντα διόρθωσης των παλμών στο παράθυρο του ^{40}K για διαφορετικούς σωματότυπους. Η τιμή του γενικευμένου παράγοντα είναι ίση προς την μέση τιμή των επιμέρους τιμών που προέκυψαν από την προσομοίωση των δύο ακραίων γεωμετριών, 1.050.

Ο Πίνακας 3.π παρουσιάζει τις τιμές των παραγόντων b και c σε κάθε κανάλι καταγραφής του φάσματος, όπως προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των ομοιωμάτων διαφορετικής γεωμετρίας. Ειδικότερα η 2^η και 3^η στήλη περιέχουν την τιμή του παράγοντα c που υπολογίζεται για το κανάλι ch όπου $ch=0\dots 255$ από την προσομοίωση του ομοιώματος No1 και No2 αντίστοιχα. Κατά αντιστοιχία, οι στήλες 4 και 5 περιέχουν την τιμή για τον παράγοντα c , όπως αυτός υπολογίστηκε από την προσομοίωση των ομοιωμάτων No3 και No4. Σημειώνεται ότι οι τιμές που περιέχονται στα πρώτα 4 κανάλια καταγραφής ($\sim <30$ keV, ~ 7.3 keV/κανάλι) εμπεριέχουν μεγάλα σφάλματα και δεν χρησιμοποιούνται.

Πίνακας 4.17: Αποτελέσματα προσομοίωσης Monte Carlo

Κανάλι MCA	Τιμή b ομοίωμα No1	Τιμή b ομοίωμα No2	Τιμή c ομοίωμα No3	Τιμή c ομοίωμα No4
0	1.12E+00	1.18E+00	6.27E+00	6.50E+00
1	3.65E-02	3.94E-02	2.06E-01	2.18E-01
2	1.11E+00	1.17E+00	6.29E+00	6.52E+00
3	2.51E-02	2.99E-02	2.03E-01	2.34E-01

Πίνακας 4.17: (συνέχεια)

Κανάλι MCA	Τιμή <i>b</i> ομοίωμα Νο1	Τιμή <i>b</i> ομοίωμα Νο2	Τιμή <i>c</i> ομοίωμα Νο3	Τιμή <i>c</i> ομοίωμα Νο4
4	2.38E-02	2.90E-02	2.08E-01	2.48E-01
5	2.77E-02	3.47E-02	2.39E-01	2.94E-01
6	3.13E-02	4.14E-02	2.84E-01	3.62E-01
7	3.65E-02	5.01E-02	3.47E-01	4.49E-01
8	4.44E-02	6.04E-02	4.18E-01	5.51E-01
9	5.19E-02	7.09E-02	5.01E-01	6.52E-01
10	6.02E-02	8.10E-02	5.81E-01	7.50E-01
11	6.60E-02	8.73E-02	6.39E-01	8.04E-01
12	6.79E-02	9.02E-02	6.46E-01	8.17E-01
13	6.56E-02	8.69E-02	6.25E-01	7.87E-01
14	6.35E-02	8.37E-02	6.01E-01	7.53E-01
15	6.25E-02	8.11E-02	5.84E-01	7.24E-01
16	6.19E-02	8.03E-02	5.78E-01	7.13E-01
17	6.21E-02	7.78E-02	5.76E-01	7.02E-01
18	6.22E-02	7.82E-02	5.80E-01	6.96E-01
19	6.21E-02	7.79E-02	5.75E-01	6.84E-01
20	6.20E-02	7.73E-02	5.67E-01	6.70E-01
21	6.13E-02	7.57E-02	5.63E-01	6.59E-01
22	6.10E-02	7.41E-02	5.52E-01	6.42E-01
23	5.94E-02	7.11E-02	5.51E-01	6.31E-01
24	5.76E-02	6.96E-02	5.47E-01	6.26E-01
25	5.79E-02	6.81E-02	5.47E-01	6.17E-01
26	1.20E-01	1.40E-01	1.16E+00	1.29E+00
27	5.93E-02	6.86E-02	5.69E-01	6.26E-01
28	5.87E-02	6.72E-02	5.66E-01	6.16E-01
29	5.91E-02	6.77E-02	5.53E-01	6.07E-01
30	6.08E-02	6.79E-02	5.44E-01	5.89E-01
31	6.04E-02	6.77E-02	5.27E-01	5.72E-01
32	6.07E-02	6.75E-02	5.15E-01	5.59E-01
33	6.00E-02	6.61E-02	4.97E-01	5.38E-01
34	5.88E-02	6.48E-02	4.80E-01	5.18E-01
35	5.71E-02	6.27E-02	4.62E-01	5.01E-01
36	5.45E-02	6.05E-02	4.44E-01	4.80E-01
37	5.32E-02	5.78E-02	4.27E-01	4.66E-01
38	5.11E-02	5.63E-02	4.12E-01	4.46E-01
39	4.88E-02	5.34E-02	3.99E-01	4.28E-01

Πίνακας 4.17: (συνέχεια)

Κανάλι MCA	Τιμή <i>b</i> ομοίωμα Νο1	Τιμή <i>b</i> ομοίωμα Νο2	Τιμή <i>c</i> ομοίωμα Νο3	Τιμή <i>c</i> ομοίωμα Νο4
40	4.66E-02	5.26E-02	3.80E-01	4.13E-01
41	4.54E-02	5.02E-02	3.70E-01	3.96E-01
42	4.31E-02	4.88E-02	3.53E-01	3.82E-01
43	4.21E-02	4.64E-02	3.43E-01	3.71E-01
44	4.05E-02	4.46E-02	3.33E-01	3.58E-01
45	3.90E-02	4.33E-02	3.21E-01	3.47E-01
46	3.81E-02	4.20E-02	3.13E-01	3.39E-01
47	3.67E-02	4.06E-02	3.06E-01	3.28E-01
48	3.59E-02	4.02E-02	2.97E-01	3.22E-01
49	3.43E-02	3.79E-02	2.95E-01	3.15E-01
50	3.32E-02	3.67E-02	2.86E-01	3.09E-01
51	3.22E-02	3.57E-02	2.82E-01	3.05E-01
52	3.14E-02	3.50E-02	2.78E-01	2.98E-01
53	3.06E-02	3.36E-02	2.73E-01	2.91E-01
54	3.01E-02	3.30E-02	2.70E-01	2.86E-01
55	2.91E-02	3.21E-02	2.61E-01	2.78E-01
56	2.83E-02	3.18E-02	2.56E-01	2.70E-01
57	2.77E-02	3.10E-02	2.49E-01	2.63E-01
58	2.67E-02	2.97E-02	2.41E-01	2.56E-01
59	2.65E-02	2.91E-02	2.32E-01	2.49E-01
60	2.62E-02	2.89E-02	2.27E-01	2.40E-01
61	2.60E-02	2.85E-02	2.17E-01	2.32E-01
62	2.54E-02	2.80E-02	2.12E-01	2.26E-01
63	2.47E-02	2.78E-02	2.07E-01	2.20E-01
64	2.46E-02	2.69E-02	2.03E-01	2.16E-01
65	2.40E-02	2.60E-02	1.99E-01	2.10E-01
66	2.41E-02	2.62E-02	1.94E-01	2.05E-01
67	2.32E-02	2.57E-02	1.91E-01	2.03E-01
68	2.30E-02	2.51E-02	1.89E-01	2.02E-01
69	2.32E-02	2.54E-02	1.88E-01	2.01E-01
70	2.23E-02	2.44E-02	1.89E-01	2.02E-01
71	2.25E-02	2.45E-02	1.90E-01	2.01E-01
72	2.17E-02	2.38E-02	1.94E-01	2.04E-01
73	2.12E-02	2.34E-02	2.01E-01	2.09E-01
74	2.11E-02	2.27E-02	2.08E-01	2.17E-01
75	2.05E-02	2.24E-02	2.25E-01	2.32E-01

Πίνακας 4.17: (συνέχεια)

Κανάλι MCA	Τιμή <i>b</i> ομοίωμα Νο1	Τιμή <i>b</i> ομοίωμα Νο2	Τιμή <i>c</i> ομοίωμα Νο3	Τιμή <i>c</i> ομοίωμα Νο4
76	2.01E-02	2.18E-02	2.42E-01	2.47E-01
77	1.96E-02	2.12E-02	2.66E-01	2.71E-01
78	1.94E-02	2.10E-02	2.94E-01	2.98E-01
79	1.86E-02	2.04E-02	3.26E-01	3.28E-01
80	1.83E-02	2.01E-02	3.62E-01	3.61E-01
81	1.81E-02	1.99E-02	3.96E-01	3.88E-01
82	1.80E-02	1.96E-02	4.18E-01	4.12E-01
83	1.80E-02	1.94E-02	4.29E-01	4.24E-01
84	1.81E-02	1.93E-02	4.32E-01	4.25E-01
85	1.77E-02	1.90E-02	4.18E-01	4.09E-01
86	1.75E-02	1.90E-02	3.93E-01	3.85E-01
87	1.72E-02	1.87E-02	3.60E-01	3.50E-01
88	1.69E-02	1.85E-02	3.17E-01	3.13E-01
89	1.67E-02	1.82E-02	2.76E-01	2.74E-01
90	1.67E-02	1.82E-02	2.38E-01	2.35E-01
91	1.65E-02	1.81E-02	2.04E-01	2.01E-01
92	1.65E-02	1.82E-02	1.76E-01	1.76E-01
93	1.65E-02	1.77E-02	1.52E-01	1.53E-01
94	1.63E-02	1.76E-02	1.34E-01	1.36E-01
95	1.60E-02	1.70E-02	1.20E-01	1.23E-01
96	1.62E-02	1.73E-02	1.11E-01	1.13E-01
97	1.58E-02	1.71E-02	1.04E-01	1.08E-01
98	1.55E-02	1.72E-02	9.98E-02	1.05E-01
99	1.54E-02	1.68E-02	9.83E-02	1.02E-01
100	1.52E-02	1.68E-02	9.78E-02	1.01E-01
101	1.52E-02	1.65E-02	9.77E-02	1.01E-01
102	1.54E-02	1.64E-02	9.80E-02	1.01E-01
103	1.52E-02	1.62E-02	9.83E-02	1.01E-01
104	1.45E-02	1.62E-02	9.93E-02	1.02E-01
105	1.51E-02	1.60E-02	1.01E-01	1.02E-01
106	1.50E-02	1.58E-02	9.86E-02	1.02E-01
107	1.49E-02	1.60E-02	9.74E-02	1.00E-01
108	1.50E-02	1.55E-02	9.77E-02	9.83E-02
109	1.48E-02	1.58E-02	9.40E-02	9.69E-02
110	1.48E-02	1.57E-02	9.22E-02	9.36E-02
111	1.45E-02	1.55E-02	8.76E-02	9.02E-02

Πίνακας 4.17: (συνέχεια)

Κανάλι MCA	Τιμή <i>b</i> ομοίωμα Νο1	Τιμή <i>b</i> ομοίωμα Νο2	Τιμή <i>c</i> ομοίωμα Νο3	Τιμή <i>c</i> ομοίωμα Νο4
112	1.45E-02	1.54E-02	8.31E-02	8.65E-02
113	1.47E-02	1.56E-02	8.04E-02	8.30E-02
114	1.43E-02	1.58E-02	7.72E-02	7.97E-02
115	1.44E-02	1.52E-02	7.44E-02	7.71E-02
116	1.44E-02	1.55E-02	7.18E-02	7.52E-02
117	1.42E-02	1.51E-02	7.22E-02	7.29E-02
118	1.44E-02	1.53E-02	6.86E-02	7.20E-02
119	1.42E-02	1.53E-02	6.79E-02	7.15E-02
120	1.44E-02	1.54E-02	6.75E-02	6.94E-02
121	1.43E-02	1.55E-02	6.82E-02	6.93E-02
122	1.43E-02	1.53E-02	6.71E-02	7.00E-02
123	1.44E-02	1.55E-02	6.82E-02	7.07E-02
124	1.43E-02	1.55E-02	6.72E-02	7.03E-02
125	1.45E-02	1.52E-02	6.80E-02	7.00E-02
126	1.47E-02	1.57E-02	6.84E-02	7.03E-02
127	1.45E-02	1.57E-02	6.92E-02	7.09E-02
128	1.50E-02	1.58E-02	6.65E-02	7.01E-02
129	1.50E-02	1.57E-02	6.68E-02	6.90E-02
130	1.47E-02	1.54E-02	6.61E-02	6.87E-02
131	1.50E-02	1.54E-02	6.51E-02	6.74E-02
132	1.50E-02	1.57E-02	6.32E-02	6.53E-02
133	1.46E-02	1.58E-02	6.16E-02	6.36E-02
134	1.49E-02	1.58E-02	6.09E-02	6.25E-02
135	1.48E-02	1.55E-02	5.94E-02	6.11E-02
136	1.47E-02	1.57E-02	5.82E-02	6.14E-02
137	1.46E-02	1.56E-02	5.81E-02	5.95E-02
138	1.42E-02	1.53E-02	5.82E-02	6.05E-02
139	1.45E-02	1.50E-02	5.88E-02	5.98E-02
140	1.47E-02	1.52E-02	5.87E-02	6.14E-02
141	1.49E-02	1.55E-02	6.03E-02	6.23E-02
142	1.51E-02	1.50E-02	6.28E-02	6.56E-02
143	1.46E-02	1.54E-02	6.45E-02	6.64E-02
144	1.41E-02	1.52E-02	6.79E-02	6.94E-02
145	1.46E-02	1.57E-02	7.01E-02	7.25E-02
146	1.44E-02	1.56E-02	7.44E-02	7.67E-02
147	1.48E-02	1.52E-02	7.86E-02	8.12E-02

Πίνακας 4.17: (συνέχεια)

Κανάλι MCA	Τιμή <i>b</i> ομοίωμα Νο1	Τιμή <i>b</i> ομοίωμα Νο2	Τιμή <i>c</i> ομοίωμα Νο3	Τιμή <i>c</i> ομοίωμα Νο4
148	1.48E-02	1.54E-02	8.32E-02	8.51E-02
149	1.47E-02	1.53E-02	8.85E-02	8.90E-02
150	1.48E-02	1.56E-02	9.37E-02	9.30E-02
151	1.49E-02	1.59E-02	9.54E-02	9.67E-02
152	1.51E-02	1.57E-02	9.94E-02	9.82E-02
153	1.48E-02	1.58E-02	1.01E-01	1.01E-01
154	1.55E-02	1.61E-02	1.03E-01	1.02E-01
155	1.56E-02	1.61E-02	1.03E-01	1.02E-01
156	1.52E-02	1.59E-02	9.94E-02	1.01E-01
157	1.52E-02	1.58E-02	9.95E-02	9.83E-02
158	1.53E-02	1.62E-02	9.68E-02	9.55E-02
159	1.56E-02	1.58E-02	9.10E-02	9.18E-02
160	1.53E-02	1.58E-02	8.76E-02	8.71E-02
161	1.46E-02	1.50E-02	8.08E-02	8.04E-02
162	1.57E-02	1.64E-02	8.41E-02	8.48E-02
163	1.52E-02	1.57E-02	7.85E-02	7.72E-02
164	1.51E-02	1.56E-02	7.43E-02	7.51E-02
165	1.47E-02	1.53E-02	7.27E-02	7.28E-02
166	1.44E-02	1.50E-02	6.97E-02	7.06E-02
167	1.42E-02	1.51E-02	6.83E-02	6.90E-02
168	1.37E-02	1.42E-02	6.66E-02	6.75E-02
169	1.39E-02	1.40E-02	6.52E-02	6.65E-02
170	1.31E-02	1.37E-02	6.36E-02	6.44E-02
171	1.29E-02	1.31E-02	6.21E-02	6.29E-02
172	1.25E-02	1.28E-02	6.04E-02	6.14E-02
173	1.23E-02	1.26E-02	5.99E-02	6.07E-02
174	1.17E-02	1.25E-02	5.94E-02	5.93E-02
175	1.17E-02	1.21E-02	5.57E-02	5.68E-02
176	1.15E-02	1.23E-02	5.49E-02	5.60E-02
177	1.16E-02	1.20E-02	5.39E-02	5.40E-02
178	1.19E-02	1.23E-02	5.23E-02	5.28E-02
179	1.19E-02	1.24E-02	5.12E-02	5.13E-02
180	1.23E-02	1.32E-02	5.06E-02	5.20E-02
181	1.28E-02	1.36E-02	5.01E-02	5.13E-02
182	1.39E-02	1.43E-02	5.05E-02	5.09E-02
183	1.49E-02	1.54E-02	4.93E-02	4.98E-02

Πίνακας 4.17: (συνέχεια)

Κανάλι MCA	Τιμή <i>b</i> ομοίωμα Νο1	Τιμή <i>b</i> ομοίωμα Νο2	Τιμή <i>c</i> ομοίωμα Νο3	Τιμή <i>c</i> ομοίωμα Νο4
184	1.64E-02	1.62E-02	4.96E-02	5.03E-02
185	1.77E-02	1.78E-02	5.02E-02	5.02E-02
186	1.92E-02	1.96E-02	5.06E-02	5.16E-02
187	2.09E-02	2.15E-02	5.13E-02	5.16E-02
188	2.37E-02	2.37E-02	5.25E-02	5.22E-02
189	2.60E-02	2.61E-02	5.28E-02	5.21E-02
190	2.90E-02	2.87E-02	5.15E-02	5.16E-02
191	3.18E-02	3.23E-02	5.13E-02	5.22E-02
192	3.51E-02	3.52E-02	5.09E-02	5.17E-02
193	3.78E-02	3.86E-02	5.01E-02	5.12E-02
194	4.15E-02	4.18E-02	4.87E-02	4.94E-02
195	4.46E-02	4.43E-02	4.70E-02	4.77E-02
196	4.75E-02	4.75E-02	4.63E-02	4.64E-02
197	5.02E-02	5.02E-02	4.56E-02	4.52E-02
198	5.21E-02	5.22E-02	4.34E-02	4.43E-02
199	5.35E-02	5.44E-02	4.17E-02	4.26E-02
200	5.41E-02	5.40E-02	4.10E-02	4.23E-02
201	5.41E-02	5.36E-02	3.97E-02	4.06E-02
202	5.26E-02	5.31E-02	3.85E-02	3.91E-02
203	5.09E-02	5.02E-02	3.73E-02	3.86E-02
204	4.90E-02	4.88E-02	3.66E-02	3.76E-02
205	4.53E-02	4.53E-02	3.60E-02	3.66E-02
206	3.69E-02	3.76E-02	3.11E-02	3.17E-02
207	4.26E-02	4.23E-02	3.79E-02	3.83E-02
208	3.56E-02	3.50E-02	3.41E-02	3.46E-02
209	3.16E-02	3.13E-02	3.27E-02	3.36E-02
210	2.77E-02	2.79E-02	3.21E-02	3.32E-02
211	2.39E-02	2.36E-02	3.07E-02	3.18E-02
212	2.27E-02	2.24E-02	3.25E-02	3.31E-02
213	1.87E-02	1.85E-02	3.02E-02	3.09E-02
214	1.64E-02	1.62E-02	2.99E-02	3.00E-02
215	1.41E-02	1.40E-02	2.95E-02	3.01E-02
216	1.21E-02	1.18E-02	2.91E-02	2.92E-02
217	1.04E-02	1.03E-02	2.86E-02	2.89E-02
218	8.70E-03	8.72E-03	2.84E-02	2.93E-02
219	7.15E-03	7.28E-03	2.80E-02	2.87E-02

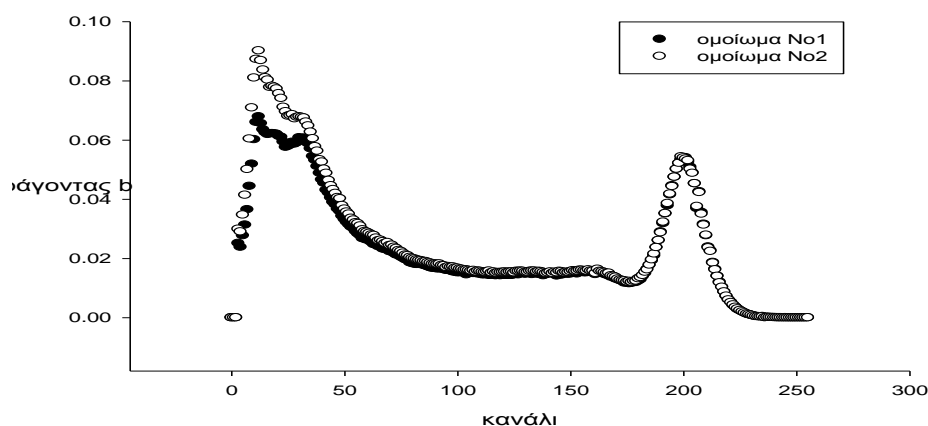
Πίνακας 4.17: (συνέχεια)

Κανάλι MCA	Τιμή <i>b</i> ομοίωμα Νο1	Τιμή <i>b</i> ομοίωμα Νο2	Τιμή <i>c</i> ομοίωμα Νο3	Τιμή <i>c</i> ομοίωμα Νο4
220	6.11E-03	6.04E-03	2.85E-02	2.92E-02
221	5.25E-03	5.12E-03	2.86E-02	2.93E-02
222	4.18E-03	4.33E-03	2.85E-02	2.97E-02
223	3.63E-03	3.54E-03	2.94E-02	2.96E-02
224	2.81E-03	3.00E-03	2.99E-02	3.02E-02
225	2.41E-03	2.44E-03	3.05E-02	3.11E-02
226	1.95E-03	1.98E-03	3.29E-02	3.28E-02
227	1.65E-03	1.59E-03	3.31E-02	3.38E-02
228	1.24E-03	1.26E-03	3.55E-02	3.46E-02
229	9.92E-04	1.06E-03	3.60E-02	3.67E-02
230	8.20E-04	8.41E-04	3.74E-02	3.83E-02
231	6.34E-04	5.81E-04	3.90E-02	3.96E-02
232	4.77E-04	4.13E-04	4.14E-02	4.17E-02
233	3.82E-04	3.67E-04	4.25E-02	4.32E-02
234	3.33E-04	3.05E-04	4.52E-02	4.56E-02
235	3.92E-04	3.58E-04	8.78E-02	8.76E-02
236	2.29E-05	3.43E-05	8.83E-03	8.64E-03
237	1.24E-04	1.18E-04	5.08E-02	5.07E-02
238	1.03E-04	1.04E-04	5.21E-02	5.21E-02
239	7.74E-05	7.90E-05	5.37E-02	5.32E-02
240	6.51E-05	3.96E-05	5.31E-02	5.37E-02
241	5.06E-05	3.23E-05	5.47E-02	5.46E-02
242	1.69E-05	2.45E-05	5.49E-02	5.44E-02
243	2.34E-05	1.76E-05	5.37E-02	5.35E-02
244	1.61E-05	1.38E-05	5.25E-02	5.25E-02
245	2.62E-05	1.46E-05	5.13E-02	5.12E-02
246	5.60E-06	6.16E-06	4.94E-02	4.96E-02
247	1.56E-06	1.64E-06	4.67E-02	4.59E-02
248	0.00E+00	4.66E-06	4.40E-02	4.48E-02
249	1.51E-06	1.76E-06	4.25E-02	4.24E-02
250	0.00E+00	1.36E-06	3.98E-02	3.92E-02
251	0.00E+00	0.00E+00	3.72E-02	3.76E-02
252	0.00E+00	0.00E+00	3.56E-02	3.46E-02
253	0.00E+00	0.00E+00	3.27E-02	3.25E-02
254	0.00E+00	0.00E+00	3.12E-02	3.08E-02
255	0.00E+00	0.00E+00	2.83E-02	2.83E-02

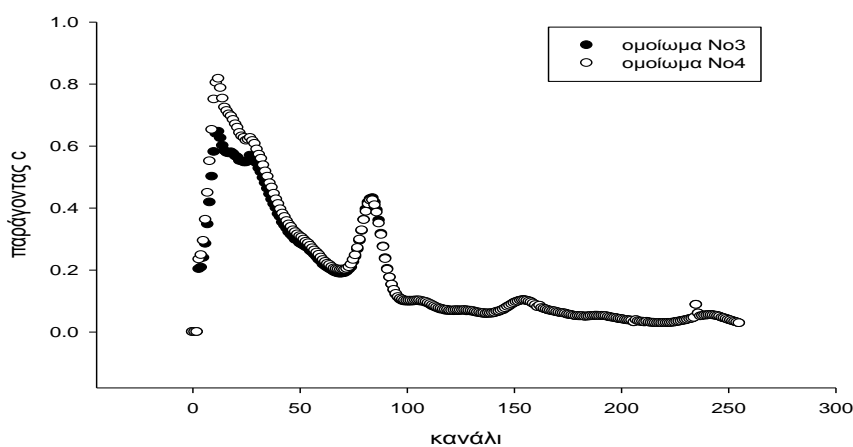
Σύγκριση για διάφορους σωματότυπους

Με σκοπό την μελέτη της εξάρτησης των συντελεστών b και c από τον σωματότυπο του εξεταζόμενου, αναπαράστηκαν οι τιμές των στηλών 2 και 3 και 4 και 5 του Πίνακα 3.16 σε κοινό διάγραμμα σε συνάρτηση με το κανάλι του MCA.

Όπως παρατηρείται από τη μορφή των διαγραμμάτων καθώς και από τα αριθμητικά δεδομένα των αντίστοιχων Πινάκων, μεταβολές στο σωματότυπο του εξεταζόμενου δεν επηρεάζουν δραστικά την τιμή της διόρθωσης μέχρι περίπου το κανάλι 18, που αντιστοιχεί σύμφωνα με την ισχύουσα ενεργειακή βαθμονόμηση σε ενέργεια 131 keV. Σε κανάλια μικρότερης ενέργειας ο παράγοντας b στο ομοίωμα No2 έχει τιμή έως και 25 % μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή στο ομοίωμα No1. Παρόμοια είναι η συμπεριφορά του παράγοντα c , ο οποίος στα μικρότερα κανάλια εμφανίζει διαφορές της τάξης του 20 % ανάμεσα στα δύο ομοιώματα.



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα της τιμής του παράγοντα b σε συνάρτηση με το κανάλι καταγραφής για τα ομοιώματα No1 και No2



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα της τιμής του παράγοντα c σε συνάρτηση με το κανάλι καταγραφής για τα ομοιώματα No1 και No2

4.6 Συμπεράσματα

Μελετήθηκαν εναλλακτικές τεχνικές ανάλυσης των φασμάτων που προκύπτουν από τις μετρήσεις με τη χρήση του MOA με σκοπό την υιοθέτηση της βέλτιστης. Οι υπό μελέτη μέθοδοι αξιολογήθηκαν με βάση τις ποιοτικές παραμέτρους που αναφέρονται στη αξιοπιστία και την απόδοση των τελικών αποτελεσμάτων της μέτρησης. Από την σύγκριση των τεχνικών προέκυψε ότι η χρήση της μεθόδου απλής άθροισης των παλμών σε RoI που αντιστοιχεί περίπου στο 85% του μέσου FWHM των ανιχνευτών του συστήματος στην περίπτωση ακτινοβολίας- γ ενέργειας 1.46 MeV (^{40}K), δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα αναφορικά με το σχετικό σφάλμα αξιοπιστίας των μετρήσεων. Το συμπέρασμα αυτό προέκυψε από στατιστικό έλεγχο των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη μέτρηση ομοιωμάτων που περιείχαν ισότοπα μέσης και υψηλής ενέργειας (^{137}Cs , ^{40}K). Εκτός αυτού σημειώνεται πως η 1^η τεχνική δίνει καλύτερα αποτελέσματα τόσο σε περιοχές του φάσματος όπου το υπόστρωμα εμφανίζει δομή κορυφής, όπως είναι η περιοχή του ^{40}K , όσο και σε περιοχές όπου το υπόστρωμα έχει γραμμική συμπεριφορά.

Σε κάθε περίπτωση η τιμή αριθμού παλμών που βρέθηκαν με την πρώτη μέθοδο ήταν μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή της δεύτερης μεθόδου. Η διαφορά οφείλεται στην δομή του αλγορίθμου της δεύτερης μεθόδου, σύμφωνα με τον οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη η τιμή των παλμών στα έξι ακραία κανάλια του επιλεγμένου RoI. Αν και η συγκεκριμένη διαφορά δεν υποδηλώνει άμεσα μικρότερη απόδοση των αποτελεσμάτων της δεύτερης μεθόδου, παρόλα αυτά δημιουργεί τεχνικά προβλήματα κατά την εφαρμογή των τιμών αποδόσεων που υπολογίζονται με τη χρήση του κώδικα MCNP5 στα πειραματικά δεδομένα για τον υπολογισμό των ποσοτήτων των ανιχνευόμενων ισωτόπων.

Βασικό πρόβλημα που προκύπτει από την εφαρμογή της πρώτης μεθόδου ανάλυσης φασμάτων, είναι το γεγονός ότι η μέθοδος δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση στην περιοχή της φωτοκορυφής, φωτονίων που δεν οφείλονται στο υπό μελέτη ισότοπο και γενικά στη περίπτωση όπου ισότοπα, με εξαίρεση το υπό μελέτη, δεν παρουσιάζονται με παρόμοια ποσότητα στο φάσμα του υποστρώματος. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε κατάλληλη μέθοδος διόρθωσης, που βασίζεται στην τεχνική spectrum stripping. Η μέθοδος αναπτύχθηκε για την διόρθωση των παλμών λόγω της παρουσίας των ισωτόπων ^{40}K και ^{214}Bi τόσο στο φυσικό υπόστρωμα όσο και στον ίδιο τον άνθρωπο. Οι συντελεστές διορθώσεις υπολογίστηκαν για δύο ακραίους σωματότυπους εξεταζόμενων και διαπιστώθηκε πως οι τιμές τους είναι πρακτικά ανεξάρτητες της γεωμετρίας σε μεγάλο εύρος του φάσματος.

Κεφάλαιο 5

Μετρητικά χαρακτηριστικά συστήματος

5.1 Εισαγωγή

Η αναγνώριση και η *in vivo* μέτρηση της ραδιενέργειας πραγματοποιείται με γ-φασματοσκοπία. Ο ΜΟΑ που χρησιμοποιήθηκε έχει τη δυνατότητα λήψης φασμάτων με ταυτόχρονη χρήση έως και δεκαέξι ανιχνευτών. Η κτήση των πληροφοριών που προκύπτουν από τη διαδικασία μέτρησης γίνεται με εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων ανάλυσης φάσματος, οι οποίες περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4.

Για την αποτελεσματική εφαρμογή των τεχνικών ανάλυσης είναι απαραίτητη η διερεύνηση συνόλου παραμέτρων που σχετίζονται με τα μετρητικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτικού συστήματος και προσδιορίζουν τα λειτουργικά του χαρακτηριστικά, όπως οι συντελεστές βαθμονόμησης, η ενεργειακή διακριτική ικανότητα και η απόκριση του συστήματος σε διαφορετικούς ρυθμούς εισερχομένων παλμών. Σημαντικές παράμετροι ποιότητας είναι επίσης τα μεγέθη της ακρίβειας και της αξιοπιστίας καθώς και το ελάχιστο όριο ανιχνευσιμότητας κάθε ραδιονουκλιδίου. Τα εν λόγω μεγέθη αναφέρονται ως χαρακτηριστικά απόδοσης και περιγράφονται σε επόμενα κεφάλαια.

Με σκοπό τον προσδιορισμό των λειτουργικών χαρακτηριστικών, μελετήθηκαν οι παράμετροι που αφορούν την ενεργειακή βαθμονόμηση του συστήματος, τον προσδιορισμό της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας σε διάφορες περιοχές του φάσματος και η απόκριση του συστήματος σε σχέση με το ρυθμό καταγραφόμενων παλμών που επηρεάζεται κυρίως από την ενεργότητα της πηγής. Η διερεύνηση της τελευταίας παραμέτρου γίνεται υπό το πρίσμα της χρήσης του συστήματος πολύπλεξης δεκαέξι εισόδων, το οποίο αποτελεί τμήμα του ΜCB με το οποίο αντικαταστάθηκε ο προϋπάρχον ΜCA (βλέπε Κεφάλαιο 2).

5.2 Περιγραφή των υπό μελέτη μεγεθών

Ενεργειακή βαθμονόμηση

Ο όρος ενεργειακή βαθμονόμηση αναφέρεται στην διαδικασία αντιστοίχισης των καναλιών του φάσματος με τιμές ενέργειας φωτονίων. Η συγκεκριμένη διαδικασία είναι απαραίτητη για την αναγνώριση των ραδιονουκλιδίων που καταγράφονται στο φάσμα του ΜCA. Η διαδικασία που ακολουθείται περιλαμβάνει την κτήση του φάσματος από πηγές που εκπέμπουν ακτινοβολία-γ γνωστής ενέργειας, που να καλύπτουν το εύρος των χρήσεων του συστήματος και την αντιστοίχιση του καναλιού εμφάνισης της κορυφής με την ενέργεια εκπομπής. Η βαθμονόμηση μπορεί να γίνει με τη χρήση μονοενεργειακών ή πολυενεργειακών πηγών σε διάφορους συνδυασμούς.

Η αντιστοίχιση των καναλιών με τιμές ενέργειας εκφράζεται μαθηματικά συνήθως με μία γραμμική σχέση της μορφής:

$$energy = a + b \times channel \quad (5.1)$$

όπου *energy* είναι η ενέργεια φωτονίων που αντιστοιχεί στο κανάλι *channel* σε keV, *a* είναι ο σταθερός όρος σε keV και *b* είναι η κλίση της καμπύλης που προκύπτει από την προσαρμογή γραμμικής συσχέτισης στα δεδομένα.

Η γραμμική μορφή της συσχέτισης εκφράζει την αναλογικότητα μεταξύ του πλάτους του παλμού εξόδου με την ενέργεια που εναποτέθηκε στον ανιχνευτή. Τα περισσότερα συστήματα NaI(Tl) εμφανίζουν γραμμική συμπεριφορά για ένα εύρος ενεργειών μεταξύ 200-2000 keV [Sorenson 2004] ενώ η ισχύς της γραμμικότητας εξαρτάται από την συμπεριφορά των επιμέρους τμημάτων του συστήματος όπως είναι οι μονάδες ενίσχυσης και ο ADC. Φαινόμενα μη γραμμικής συμπεριφοράς της ενεργειακής βαθμονόμησης μπορεί να εμφανιστούν στα άκρα του φάσματος.

Ενεργειακή διακριτική ικανότητα

Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα *R* σχετίζεται με τη δυνατότητα διάκρισης δύο γειτονικών κορυφών στο φάσμα και περιγράφεται από τη σχέση:

$$R = \frac{FWHM}{H_0} \quad (5.2)$$

όπου H_0 είναι το κανάλι εμφάνισης της κορυφής και FWHM είναι το πλάτος της κορυφής στο επίπεδο της μισού.

Το μέγεθος της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας σχετίζεται με το σχήμα των μονοενεργειακών κορυφών στο φάσμα. Πιο συγκεκριμένα, οι κορυφές που οφείλονται σε φωτόνια της ίδιας ενέργειας εμφανίζουν διαπλάτυνση λόγω της στατιστικής φύσεως των διαδικασιών κατά την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με το υλικό του ανιχνευτή, κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των ανιχνευτών, και την επεξεργασία των σημάτων κατά την οποία εισάγεται ηλεκτρονικός θόρυβος.

5.3 Υλικά και μέθοδος

5.3.1 Βαθμονόμηση ανιχνευτών

Ο προσδιορισμός των σχέσεων που περιγράφουν την ενεργειακή βαθμονόμηση και την εξάρτηση του FWHM από την ενέργεια πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δεδομένων που προέκυψαν από μετρήσεις πηγών γ-ακτινοβολίας γνωστής ενέργειας.

Χρησιμοποιήθηκαν σημειακές πηγές βαθμονόμησης του Εργαστηρίου Ιατρικής Φυσικής, ραδιενεργά κατάλοιπα διαγνωστικών εξετάσεων από το Εργαστήριο

Πίνακας 5.1: Δεδομένα ραδιενεργών πηγών βαθμονόμησης

Ισότοπό	Γεωμετρία πηγής	Είδος	Ενέργεια κορυφής (MeV)
^{241}Am	Σημειακή	Πειραματική	0.060
^{109}Cd	Σημειακή	Πειραματική	0.088
^{152}Eu	Σημειακή	Πειραματική	0.122, 0.2447, 0.3446, 0.7789, 0.9641, 1.1121, 1408
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	Φιαλίδιο	Κατάλοιπο	0.141
^{111}Cd	Όγκου	Ενεργοποιημένο υλικό	0.245
^{51}Cr	Φιαλίδιο	Κατάλοιπο	0.320
^{198}Au	Όγκου	Ενεργοποιημένο υλικό	0.412
^{201}Tl	Φιαλίδιο	Κατάλοιπο	0.440
^{137}Cs	Σημειακή	Πειραματική	0.662
^{60}Co	Σημειακή	Πειραματική	1.173, 1.332
^{40}K	Όγκου	Άλας KCl σε φυσική μορφή	1.461

Πυρηνικής Ιατρικής του ΠΓΝΙ και πηγές που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο με νετρονική ενεργοποίηση υλικών υψηλής καθαρότητας (λεπτά φύλλα χρυσού και φύλλα καδμίου (Πίνακας 5.1).

Η ενεργοποίηση των υλικών έγινε με τη χρήση δυο πηγών $^{241}\text{Am-Be}$ του Εργαστηρίου Ιατρικής Φυσικής ονομαστικής ενεργότητας 111 GBq η κάθε μια, με παραγωγή $7.3 \cdot 10^6$ n/s μέσω αντιδράσεων (α,n). Η ακτινοβόληση έγινε με τοποθέτηση των φύλλων μεταξύ των δύο πηγών. Σε απόσταση περίπου 40 cm τοποθετήθηκε αριθμός δοχείων από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο, τα οποία περιείχαν απιονισμένο νερό με τρόπο ώστε να περιβάλλεται η διάταξη υλικών-πηγών. Τα δοχεία χρησιμοποιήθηκαν για την θερμοποίηση των εκπεμπόμενων νετρονίων από την πηγή.

Πραγματοποιήθηκε λήψη φάσματος με τοποθέτηση κάθε πηγής σε απόσταση 12 cm από το κέντρο της επιφάνειας του κάθε ανιχνευτή (Σχήμα 5.1). Κάθε μέτρηση πραγματοποιήθηκε με χρήση φασματικής περιοχής 256 καναλιών και προτοποθέτηση του ρολογιού του MCA σε preset Real Time. Οι μονάδες ενίσχυσης σήματος ρυθμίστηκαν ώστε η κορυφή των 1460 keV του ^{40}K να βρίσκεται στο κανάλι 200 του κάθε ανιχνευτή.



Σχήμα 5.1: Πειραματική διάταξη ενεργειακής βαθμονόμησης ανιχνευτών

5.3.2 Μελέτη απόκρισης συστήματος σε συνάρτηση με την ενεργότητα της πηγής

Μελετήθηκε η ανιχνευτική απόδοση για εύρος ενεργοτήτων της πηγής ακτινοβολίας από ~ 5 MBq ως 400 Bq ^{99m}Tc με επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σε ανθρωπόμορφο ομοίωμα με ομοιόμορφη κατανομή πηγής ^{99m}Tc στο εσωτερικό του.

Το ομοίωμα δομήθηκε από πλαστικά δοχεία όγκου 1 και 2 l, τα χαρακτηριστικά των οποίων περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3. Χρησιμοποιήθηκαν έξι δοχεία του ενός λίτρου και τριάντα δοχεία των δύο λίτρων. Το εσωτερικό κάθε δοχείου περιείχε διάλυμα KCl με συγκέντρωση 2.2 g-K/l (δεδομένα σχετικά με το διάλυμα παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3). Στο εσωτερικό των δοχείων προστέθηκε 1 ml ανά λίτρο ονομαστικού όγκου του δοχείου με υδατικό διάλυμα ^{99m}Tc συγκέντρωσης (670.4 ± 67) kBq/ml. Αποτέλεσμα της εν λόγω διαδικασίας ήταν η δημιουργία ομοιώματος με συνολικό όγκο υδατικού διαλύματος με KCl και ^{99m}Tc 66 l, που περιείχε αρχικά 44.246 MBq ^{99m}Tc και 4501 Bq ^{40}K . Η συνολική μάζα του ομοιώματος υπολογίστηκε ίση προς 75558 g και οι αρχικές ειδικές ενεργότητες ίσες προς 585 Bq/g ^{99m}Tc και 0.059 Bq/g ^{40}K . Κατά την διενέργεια των μετρήσεων η ειδική ενεργότητα ^{99m}Tc κυμάνθηκε μεταξύ 0.005 έως 66 Bq/g.

Η μέτρηση του ομοιώματος έγινε με σάρωση για συνολικό μήκος 8 m (2 ορθές και 2 ανάστροφες). Ο MCA ρυθμίστηκε σε Preset Real Time=1400 s. Το ομοίωμα μετρήθηκε σε βάθος χρόνου 13.5 ημιζωών του ^{99m}Tc , δηλαδή 81 ώρες. Σε κάθε χρονική περίοδο έγιναν δύο μετρήσεις ίδιας διάρκειας. Στην πρώτη μέτρηση γινόταν χρήση όλων των ανιχνευτών του συστήματος, και στην δεύτερη μέτρηση γινόταν χρήση μόνο των ανιχνευτών τύπου A1. Η εκτίμηση των επιπέδων της ακτινοβολίας υποστρώματος γινόταν με μέτρηση ομοιώματος παρόμοιων γεωμετρικών διαστάσεων. Ο Πίνακας 5.2 παρουσιάζει τα χρονικά διαστήματα στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις του ομοιώματος, καθώς και την ενεργότητα και το ρυθμό εκπομπής φωτονίων ενέργειας 140.5 keV από την πηγή ^{99m}Tc .

Στις τιμές ενεργότητας του ^{99m}Tc στο ομοίωμα εφαρμόστηκε διόρθωση για την αποδιέγερση του ισότοπου τόσο μεταξύ των μετρήσεων όσο και κατά τη διάρκεια κάθε μέτρησης. Η διόρθωση της ενεργότητας $A(t)$ για τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των μετρήσεων περιγράφεται μαθηματικά από τη σχέση:

$$A(t) = A(0)e^{-\ln 2 \times t / T_{1/2}} \quad (5.3)$$

όπου $A(0)$ συμβολίζει την ενεργότητα του ομοιώματος την χρονική στιγμή 0 min και $T_{1/2}$ συμβολίζει το χρόνο ημιζωής του ισотоπυ σε min.

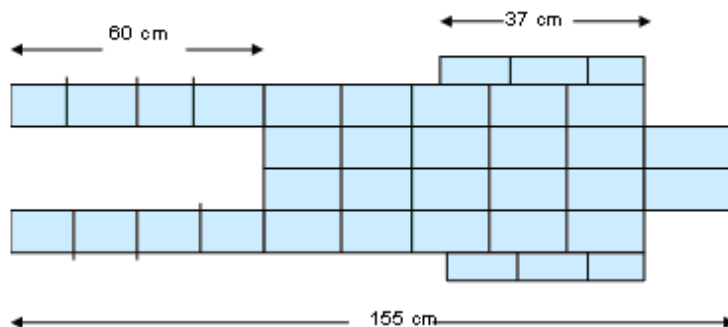
Πίνακας 5.2: Χρονικά σημεία διενέργειας μετρήσεων ομοιώματος ^{99m}Tc

Αριθμός μέτρησης	Χρονικό σημείο μέτρησης με όλους τους ανιχνευτές (min)	Ενεργότητα ομοιώματος (MBq)	Χρονικό σημείο μέτρησης με τους ανιχνευτές A1(min)	Ενεργότητα ομοιώματος (MBq)
1	0	5.2918	0	4.6713
2	652	1.5143	641	1.3653
3	1339	0.4052	1329	0.3646
4	2005	0.1129	1995	0.1016
5	3320	0.0091	3309	0.0082
6	4349	0.0012	4933	0.0004
7	4897	0.0004	-	-

Η διόρθωση για την αποδιέγερση του ισотоπυ κατά τη διάρκεια της μέτρησης αναφέρεται από τον Sorenson [2004]:

$$A(t, \Delta t) = A(0)e^{-\ln 2 \times t / T_{1/2}} \times \left[\frac{1 - e^{-\ln 2 \times \Delta t / T_{1/2}}}{\ln 2 \times \Delta t / T_{1/2}} \right] \quad (5.4)$$

όπου Δt συμβολίζει τη χρονική διάρκεια της μέτρησης σε min.



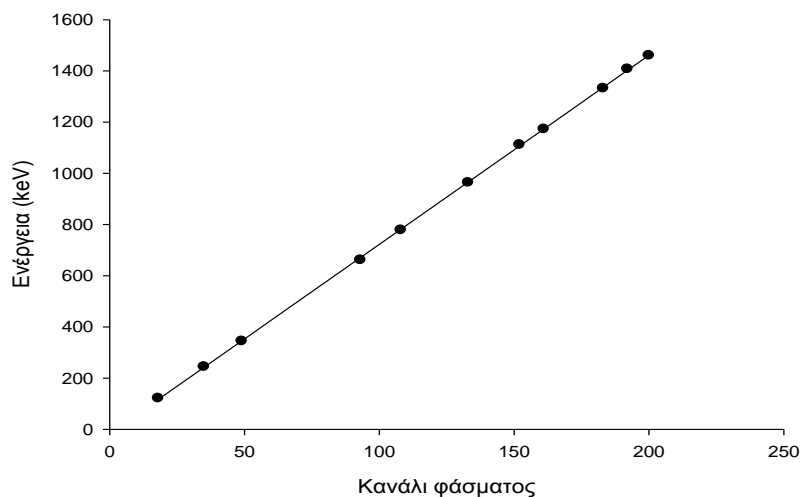
Σχήμα 5.2: Η διάταξη των δοχείων του ομοιώματος ^{99m}Tc

Το Σχήμα 5.2 παρουσιάζει τη διάταξη των δοχείων για το σχηματισμό του ομοιώματος. Τα άνω άκρα δομούνται από τρία δοχεία όγκου 1.0 l το καθένα, ενώ οι υπόλοιπες ανατομικές δομές σχηματίστηκαν από δοχεία των 2.0 l.

5.4 Αποτελέσματα

A. Ενεργειακή βαθμονόμηση

Η ενεργειακή βαθμονόμηση κάθε ανιχνευτή έγινε με εντοπισμό και καταγραφή του καναλιού εμφάνισης της κορυφής της γ -ακτινοβολίας στο φάσμα. Χρησιμοποιήθηκαν πηγές ^{152}Eu , ^{137}Cs , ^{60}Co και ^{40}K με ενέργειες εκπομπής φωτονίων μεταξύ 121 keV και 1460 keV. Το Γράφημα 5.3 απεικονίζει τη σχέση του καναλιού καταγραφής της κορυφής σε σχέση με την ενέργεια για τον ανιχνευτή #3.



Σχήμα 5.3: Καμπύλη ενεργειακής βαθμονόμησης του ανιχνευτή #3

Στα πειραματικά σημεία των γραφημάτων έγινε προσαρμογή γραμμικής σχέσης της μορφής:

$$energy = a + b \times channel \quad (5.5)$$

όπου *energy* είναι η ενέργεια της κορυφής που καταγράφεται στο κανάλι *channel* του MCA. Ο Πίνακας 5.3 περιέχει τις τιμές του σταθερού όρου *a* και της κλίσης της καμπύλης *b* που προκύπτουν από την προσαρμογή της Σχέσης 5.5 στα πειραματικά σημεία κάθε ανιχνευτή. Οι τιμές του σταθερού όρου και της κλίσης των καμπυλών βαθμονόμησης συνοδεύονται από την τιμή του υπολογιζόμενου σφάλματος σε παρένθεση. Βρέθηκε ότι κατά ημερομηνία μετρήσεων υπήρχε μέση μετάθεση του μηδενός κατά ~2.5 κανάλια. Οι μετρήσεις ενεργειακής βαθμονόμησης διεξήχθησαν

την ίδια μέρα ενώ προηγήθηκε διαδικασία ρύθμισης της ενίσχυσης κάθε ανιχνευτή ώστε η κορυφή 1460 keV να αντιστοιχεί στο κανάλι 200.

Πίνακας 5.3: Ο σταθερός όρος και η κλίση της καμπύλης βαθμονόμησης.

Αριθμός Ανιχνευτή	a (keV)	b (keV/κανάλι)	Συντελεστής συσχέτισης R^2
1	-17.3 (4.3)	7.38 (0.03)	0.9998
2	-27.5 (4.8)	7.45 (0.04)	0.9998
3	-16.2 (3.1)	7.39 (0.02)	0.9999
4	-20.6 (7.6)	7.57 (0.06)	0.9995
5	-16.8 (3.9)	7.40 (0.03)	0.9999
6	-15.1 (3.0)	7.37 (0.02)	0.9999
7	-19.0 (8.6)	7.50 (0.06)	0.9993
8	-13.4 (7.5)	7.33 (0.06)	0.9995
9	-16.6 (4.4)	7.40 (0.03)	0.9998
10	-15.7 (4.2)	7.38 (0.03)	0.9998
11	-15.1 (2.5)	7.36 (0.02)	0.9999
12	-16.2 (2.9)	7.38 (0.02)	0.9999
13	-15.7 (4.5)	7.41 (0.03)	0.9998
14	-18.2 (4.2)	7.38 (0.03)	0.9998
15	-24.0 (5.0)	7.41 (0.04)	0.9998
16	-18.4 (3.7)	7.36 (0.03)	0.9999

Ο αριθμός ανιχνευτή που παρουσιάζεται στον Πίνακα σχετίζεται με τον αριθμό της εισόδου (input) που καταλαμβάνει ο ανιχνευτής στον MCB. Στο Παράρτημα Α παρουσιάζεται αναλυτικά στοιχεία για την αντιστοίχιση των αριθμών αναγνώρισης των ανιχνευτών σύμφωνα.

B. Ενεργειακή διακριτική ικανότητα

Υπολογίστηκε το μέγεθος του FWHM για κορυφές διαφόρων ενεργειών με τη χρήση του αλγορίθμου που προτάθηκε από τον Gilmore [2008]:

1. Έγινε καταγραφή των παλμών N_0 που αντιστοιχούν στο κεντροειδές κανάλι της κορυφής C_0 .
2. Υπολογίστηκε ο καθαρός αριθμός παλμών του κεντροειδούς με βάση τη σχέση $N_{0NET} = N_0 - N_{Bg}$ όπου N_{Bg} είναι οι παλμοί που καταγράφονται για ίδιο χρόνο μέτρησης της ακτινοβολίας υποστρώματος στη θέση του κεντροειδούς.
3. Υπολογίστηκε η ποσότητα $N_{0NET}/2$.

4. Βρέθηκαν τα κανάλια αριστερά και δεξιά της κορυφής στα οποία καταγράφηκε αριθμός παλμών ίσος με $N_{0NET}/2$. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει κανάλι στο οποίο να έχει καταγραφεί ο συγκεκριμένος αριθμός παλμών ακολουθείται διαδικασία υπολογισμού του καναλιού με τη χρήση γραμμικής παρεμβολής στα σημεία του φάσματος. Προς τούτο εντοπίζονται τα κανάλια στα οποία έχουν καταγραφεί ο πλησιέστερος μικρότερος και μεγαλύτερος αριθμός παλμών προς τον $N_{0NET}/2$. Έστω ότι για την πλευρά χαμηλής ενέργειας του φάσματος το κανάλι με το μικρότερο αριθμό παλμών συμβολίζεται με C_1 και περιέχει N_1 παλμούς, ενώ το κανάλι με το μεγαλύτερο αριθμό παλμών συμβολίζεται με C_2 και περιέχει N_2 παλμούς, τότε το κανάλι C_L που περιέχει αριθμό παλμών ίσο προς $N_{0NET}/2$ δίνεται από τη σχέση:

$$C_L = \frac{\left(\frac{N_{0NET}}{2}\right) - N_1}{N_2 - N_1} + C_1 \quad (5.6)$$

5. Αντίστοιχα για την πλευρά υψηλής ενέργειας της κορυφής, έστω ότι το κανάλι με το μεγαλύτερο αριθμό παλμών συμβολίζεται με C_3 και περιέχει N_3 παλμούς ενώ το κανάλι με το μικρότερο αριθμό παλμών συμβολίζεται με C_4 και περιέχει N_4 παλμούς, τότε το κανάλι C_H που περιέχει αριθμό παλμών ίσο προς $N_{0NET}/2$ δίνεται από τη σχέση:

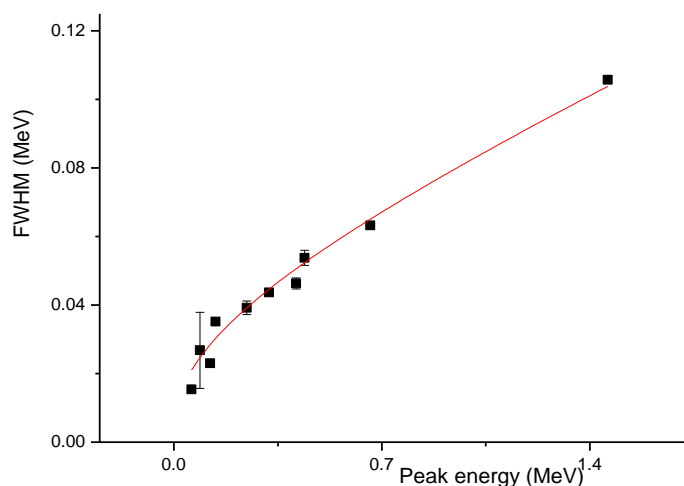
$$C_H = \frac{N_3 - \left(\frac{N_{0NET}}{2}\right)}{N_3 - N_4} + C_3 \quad (5.7)$$

6. Η διαφορά $C_H - C_L$ είναι ίση με το FWHM σε κανάλια. Το πηλίκο $(C_H - C_L)/C_0$ αποτελεί το μέγεθος της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας. Το σφάλμα του FWHM υπολογίζεται με τον κανόνα διάδοσης σφαλμάτων των ποσοτήτων N_1 , N_2 , N_3 , N_4 και N_{0NET} . Θεωρήθηκε ότι ο αριθμός παλμών υπόκειται στην στατιστική Poisson και ως εκ τούτου ισχύει $\sigma(N_\gamma) = (N_\gamma)^{1/2}$.

Το Γράφημα 5.4 παρουσιάζει τη σχέση του FWHM σε σχέση με την ενέργεια της κορυφής για τον ανιχνευτή #1. Στα πειραματικά σημεία του Γραφήματος προσαρμόστηκε συνάρτηση που περιγράφεται από τη σχέση:

$$FWHM = A + B \times \sqrt{Energy} + C \times Energy^2 \quad (5.8)$$

που προτείνεται από το εγχειρίδιο χρήσης του κώδικα MCNP5 για την εισαγωγή της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας στο αρχείο εισόδου του κώδικα. Έτσι βρέθηκε για παράδειγμα τυπικές τιμές της παραμέτρου 37 και 135 keV για φωτόνια ενέργειας μεταξύ 140 και 1460 keV, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.4: Η καμπύλη ενεργειακής βαθμονόμησης του FWHM του ανιχνευτή #1

Πίνακας 5.4: Οι συντελεστές της σχέσης 5.8 για κάθε ανιχνευτή χωριστά, όπως προέκυψαν κατά την εφαρμογή της συνάρτησης 5.8 στα πειραματικά δεδομένα και *Energy* η ενέργεια των φωτονίων σε MeV (Παράρτημα Β)

Αριθμός Ανιχνευτή	FWHM 0.662 MeV (MeV)	A	B	C	Συντελεστής συσχέτισης R^2
1	0.0648	0.0029	0.0680	0.3773	0.976
2	0.0914	0.0002	0.1051	0.2064	0.965
3	0.0792	0.0107	0.0604	1.4260	0.962
4	0.1022	0.0003	0.0892	1.4700	0.988
5	0.0765	0.0068	0.0786	0.2817	0.938
6	0.0706	0.0040	0.0793	0.1002	0.950
7	0.0984	-0.0001	0.1100	0.3190	0.961
8	0.1041	0.0036	0.0860	1.6051	0.987
9	0.0648	0.0051	0.0681	0.2448	0.930
10	0.0873	0.0088	0.0681	1.5206	0.974
11	0.0822	0.0100	0.0829	0.2226	0.918
12	0.0698	0.0082	0.0575	1.1084	0.966
13	0.0788	0.0039	0.0848	0.2672	0.970
14	0.1176	-0.0170	0.1641	0.0242	0.859
15	0.1069	0.0115	0.0732	2.3647	0.962
16	0.0707	-0.0063	0.1070	-0.3291	0.897

Γ. Εξάρτηση της απόκρισης του συστήματος από την ενεργότητα

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του ανθρωπόμορφου ομοιώματος με ομοιόμορφη κατανομή ^{99m}Tc και ^{40}K , με τις δύο μεθοδολογίες μέτρησης (χρήση όλων των ανιχνευτών ή χρήση των ανιχνευτών A1 μόνο) παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.5 και 5.6 αντίστοιχα. Τα δεδομένα που καταγράφηκαν από κάθε μέτρηση ήταν ο αναγραφόμενος νεκρός χρόνος, ο ρυθμός παλμών που προέκυψε από την άθροιση των παλμών που περιέχονται σε ενεργειακό παράθυρο του ^{99m}Tc , 116.8 keV-175.2 keV, δηλαδή πλάτους εννέα καναλιών, ή ~ 1.6 FWHM. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για το ομοίωμα με το διάλυμα ραδιονουκλιδίων και για το αντίστοιχο ομοίωμα υποστρώματος.

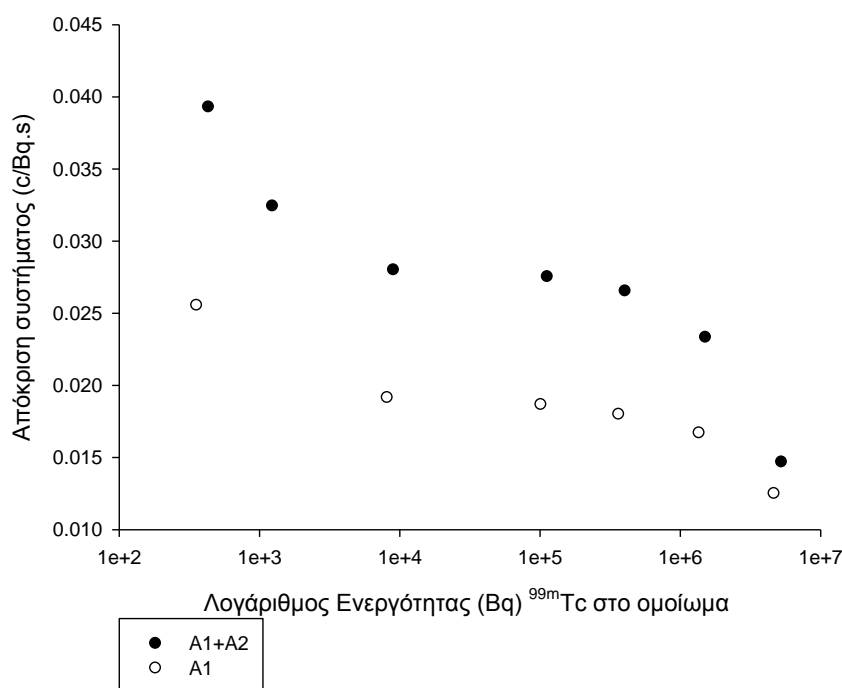
Πίνακας 5.5: Δεδομένα των μετρήσεων του ομοιώματος με όλους τους ανιχνευτές

Ενεργότητα ομοιώματος (kBq)	Χρονικό σημείο (min)	Νεκρός χρόνος %	Live/Real χρόνος (min)	Ρυθμός παλμών ομοιώματος ^{99m}Tc (cps)	Ρυθμός παλμών ομοιώματος υποστρώματος (cps)	Καθαρός ρυθμός παλμών (cps)
5.2918	0	78.39	302/1400	77701	44	77657
1.5143	652	51.22	682/1400	35351	39	35312
0.4052	1339	25.34	1045/1400	10784	36	10749
0.1129	2005	12.93	1219/1400	3143	38	3106
0.0091	3320	6.90	1303/1400	289	36	253
0.0012	4349	6.70	1959/2100	73	33	40
0.0004	4897	7.04	1952/2100	52	35	17

Πίνακας 5.6: Δεδομένα των μετρήσεων του ομοιώματος με τους ανιχνευτές τύπου A1

Ενεργότητα ομοιώματος (kBq)	Χρονικό σημείο (min)	Νεκρός χρόνος %	Live /Real χρόνος (min)	Ρυθμός παλμών ομοιώματος ^{99m}Tc (cps)	Ρυθμός παλμών ομοιώματος υποστρώματος (cps)	Καθαρός ρυθμός παλμών (cps)
4671	0	67.82	450/1400	58381	25	58355
1365	641	39.62	845/1400	22819	24	22795
365	1329	18.08	1146/1400	6581	22	6559
101.6	1995	9.79	1263/1400	1919	23	1895
8.16	3309	6.90	1319/1400	179	22	156
0.358	4933	6.99	1953/2100	31	22	9

Η απόκριση του συστήματος μελετήθηκε με έλεγχο της απόδοσης ανίχνευσης φωτονίων που καταγράφονται στο ενεργειακό παράθυρο του ^{99m}Tc σε σχέση με την ενεργότητα του ^{99m}Tc στο ομοίωμα. Ως απόκριση ορίστηκε το πηλίκο του ρυθμού φωτονίων στην ενεργειακή περιοχή του ^{99m}Tc που μετρώνται προς την ονομαστική ενεργότητα του ομοιώματος. Το Σχήμα 5.5 παρουσιάζει σε κοινό διάγραμμα την απόδοση του συστήματος σε σχέση με την ενεργότητα του ^{99m}Tc στο ομοίωμα για τις δύο μεθόδους μέτρησης που εφαρμόστηκαν.



Σχήμα 5.5: Κοινό διάγραμμα της απόκρισης του συστήματος σε σχέση με την ενεργότητα του ομοιώματος σε ^{99m}Tc .

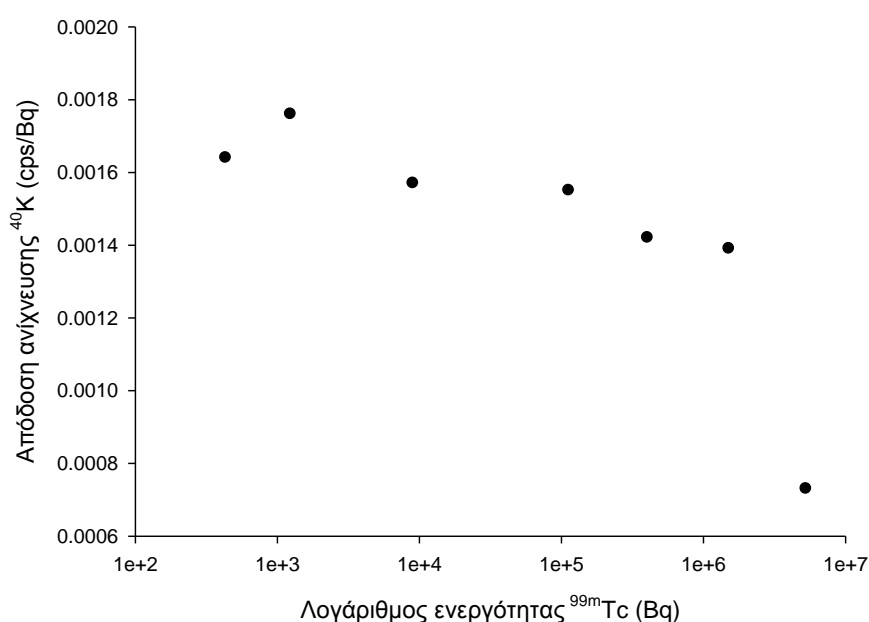
Ο Πίνακας 5.7 περιέχει στοιχεία για την απόκριση του MOA στην ενεργειακή περιοχή του ^{40}K για τις διάφορες τιμές ενεργότητας ^{99m}Tc .

Πίνακας 5.7: Δεδομένα των μετρήσεων του ομοιώματος στην ενεργειακή περιοχή του ^{40}K με όλους τους ανιχνευτές

Ενεργότητα ομοιώματος (kBq)	Χρονικό σημείο (min)	Νεκρός χρόνος %	Live/Real χρόνος (min)	Καθαρός ρυθμός παλμών ^{40}K ομοιώματος (cps)	Απόκριση συστήματος στο παράθυρο του ^{40}K (cps)
5292	0	78.39	302/1400	3.2778	0.00073
1514	652	51.22	682/1400	6.2580	0.00139
405	1339	25.34	1045/1400	6.3795	0.00142
113	2005	12.93	1219/1400	6.9786	0.00155

Πίνακας 5.7: (συνέχεια)

Ενεργότητα ομοιώματος (kBq)	Χρονικό σημείο (min)	Νεκρός χρόνος %	Live/Real χρόνος (min)	Καθαρός ρυθμός παλμών ^{40}K ομοιώματος (cps)	Απόκριση συστήματος στο παράθυρο του ^{40}K (cps)
9.05	3320	6.90	1303/1400	7.0834	0.00157
1.24	4349	6.70	1959/2100	7.9233	0.00176
0.43	4897	7.04	1952/2100	7.3983	0.00164



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα της απόκρισης του συστήματος στην ενεργειακή περιοχή του ^{40}K σε σχέση με την ενεργότητα $^{99\text{m}}\text{Tc}$

5.5 Ανάλυση-Συζήτηση

Α. Σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 5.3, η ενεργειακή βαθμονόμηση των ανιχνευτών του MOA παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά της μορφής 5.5 σε σχέση με το κανάλι καταγραφής της ενέργειας των εκπεμπόμενων φωτονίων. Ο σταθερός όρος της σχέσης εμφανίζει στατιστικά σημαντική τιμή διάφορη του μηδενός. Η μέγιστη τιμή του σταθερού όρου είναι -13.4 keV και η ελάχιστη -27.5 keV. Η μέση τιμή του σταθερού όρου για τους ανιχνευτές A1 είναι (-17.2 ± 3.3) keV και για τους ανιχνευτές A2 (-25.7 ± 2.5) keV. Αναφορικά με την κλίση της γραμμής, η μικρότερη τιμή είναι 7.33 keV/ch και η μεγαλύτερη 7.57 keV/ch. Η μέση τιμή της κλίσης για τους ανιχνευτές A1 βρέθηκε ίση προς (7.39 ± 0.04) keV/ch και για τους ανιχνευτές A2 (7.49 ± 0.11) keV/ch, μέσες τιμές που διαφέρουν στατιστικά σημαντικά.

Β. Η ικανότητα διάκρισης γειτονικών κορυφών εκτιμήθηκε με βάση τον υπολογισμό του μεγέθους FWHM για διάφορες ενέργειες στο σύνολο των ανιχνευτών. Στην περιοχή χαμηλών ενεργειών φωτονίων, π.χ., στα 140 keV, η ποσότητα FWHM κυμαίνεται μεταξύ 33-53 keV, με μέση τιμή 45 keV η δε μέση σχετική διακριτική ικανότητα ~ 32 %. Στην περιοχή ενδιάμεσων ενεργειών, π.χ., στα 662 keV, η ποσότητα FWHM κυμαίνεται μεταξύ 63-101 keV με μέση τιμή 80 keV, η δε μέση σχετική διακριτικής ικανότητας ~12 %. Στην περιοχή υψηλών ενεργειών, γύρω από τα 1460 keV, το FWHM κυμαίνεται μεταξύ 88-201 keV, με μέση απόλυτη και σχετική τιμή 142 keV και ~9.8 %, αντίστοιχα

Γ. Το κοινό Διάγραμμα 5.5 απεικονίζει την σχέση της απόδοσης ανίχνευσης φωτονίων στην ενεργειακή περιοχή από 116.8 ως 175.2 keV, για ένα εύρος ενεργειών 450 Bq έως 5.3×10^6 Bq ^{99m}Tc πρακτικά ομοιόμορφα κατανομημένου στο ομοίωμα. Παρατηρούνται ομοιότητες στη συμπεριφορά της απόδοσης για τις μετρήσεις με το σύνολο των ανιχνευτών με τις μετρήσεις με τη χρήση μόνο των ανιχνευτών A1. Η διάταξη των σημείων στα γράφημα προσδιορίζει την ύπαρξη τριών περιοχών:

1. Στο τμήμα χαμηλής ενεργότητας των γραφημάτων το σύστημα παρουσιάζει βαθμιαία μείωση της απόδοσης μέχρι περίπου την τιμή 10 kBq ^{99m}Tc στο ομοίωμα. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της περιοχής είναι η παρατηρούμενη αύξηση της απόδοσης κατά τη μείωση της ενεργότητας χωρίς να παρατηρείται ταυτόχρονη μεταβολή στις τιμές του νεκρού χρόνου των μετρήσεων, ο οποίος ήταν της τάξης του ~7%.

2. Στο κοινό γράφημα προσδιορίζεται περιοχή σταθερών αποδόσεων για τις μετρήσεις που έγιναν με τη χρήση που εκτείνεται μεταξύ 10 kBq και 400 kBq για το σύστημα που κάνει χρήση όλων των ανιχνευτών και μεταξύ 10 kBq και 1.4 MBq για το σύστημα με του ανιχνευτές A1. Η μέση τιμή της απόδοσης σε αυτό το τμήμα προσδιορίζεται από τις επιμέρους τιμές απόδοσης των σημείων που το δομούν και είναι ίση προς 0.02862 και 0.01812 αντίστοιχα.

3. Η τελευταία περιοχή του γραφήματος αναφέρεται σε συνθήκες υψηλής ενεργότητας του ομοιώματος, όπου η απόδοση μειώνεται καθώς η ενεργότητα αυξάνεται. Για το σύστημα με όλους τους ανιχνευτές, η απόδοση σε συνθήκες υψηλής ενεργότητας ομοιώματος περίπου 5.3 MBq, 0.01467 cps/Bq, βρέθηκε περίπου 50 % μικρότερη από την μέση τιμή της απόδοσης στη περιοχή σταθερότητας. Αντίστοιχα, για το σύστημα με ανιχνευτές A1 η απόδοση ανίχνευσης κατά τη μέτρηση ομοιώματος ενεργότητας 4.7 MBq, 0.1249 cps/Bq, βρέθηκε περίπου 31% μικρότερη από την μέση τιμή της περιοχής σταθερότητας.

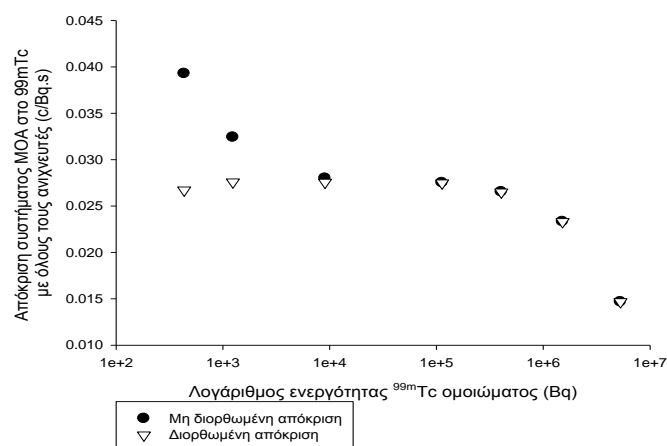
Για την αιτιολόγηση της παρατηρούμενης απώλειας της γραμμικής συμπεριφοράς του συστήματος σε συνθήκες χαμηλού ρυθμού εκπομπής παλμών από το ομοίωμα χωρίς παρατηρούμενη μεταβολή του νεκρού χρόνου των μετρήσεων, εξετάστηκε η πιθανότητα συνεισφοράς στην περιοχή του ^{99m}Tc παλμών από ισότοπα που βρίσκονται παρόντα στο διάλυμα του ομοιώματος και στο περιβάλλον. Προς τούτο καταγράφηκαν οι παλμοί στην ενεργειακή περιοχή του ^{40}K και του ^{214}Bi σύμφωνα με την μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4. Με χρήση του Πίνακα 4.16 που προσδιορίζει τη συνεισφορά στο κανάλι ενδιαφέροντος των παλμών που καταγράφονται στις περιοχές των 1460 keV και 1760 keV προσδιορίστηκε η συνεισφορά των δύο ραδιονουκλιδίων στο ενεργειακό παράθυρο του ^{99m}Tc τόσο στο ομοίωμα με το ισότοπο όσο και στο ομοίωμα υποστρώματος. Ο Πίνακας 5.8 παρουσιάζει τις διορθωμένες τιμές της απόκρισης μετά την αφαίρεση των παλμών, που οφείλονται σε ισότοπα υψηλότερων ενεργειών.

Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα η διορθωμένη με τη μη διορθωμένη απόκριση του συστήματος ως προς την συνεισφορά παλμών από ισότοπα που εκπέμπουν υψηλότερες ενέργειες φωτονίων κατά τις μετρήσεις με όλους τους ανιχνευτές. Όπως παρατηρείται η εφαρμογή της διόρθωσης έχει ως αποτέλεσμα πρακτικά την εξαφάνιση της πρώτης περιοχής και την ενσωμάτωση της στην γραμμική περιοχή

Το Σχήμα 5.8 παρουσιάζει την απόκριση του συστήματος βάση της διορθωμένης τιμής των παλμών στην περιοχή του ^{99m}Tc σε συνάρτηση με το νεκρό χρόνο που καταγράφεται από τη μονάδα MCB.

Πίνακας 5.8: Διορθωμένες τιμές απόδοσης του συστήματος

Αριθμός μέτρησης	Ενεργότητα ομοιώματος κατά τη διάρκεια της μέτρησης (kBq)	Διορθωμένος απόκριση ^{99m}Tc με όλους τους ανιχνευτές (cps)	Ενεργότητα ομοιώματος κατά τη διάρκεια της μέτρησης (kBq)	Διορθωμένη απόκριση ^{99m}Tc με τους ανιχνευτές A1 (cps)
1	5292	0.0147	4671	0.0125
2	1514	0.0233	1365	0.0167
3	405.2	0.0265	364.6	0.0180
4	112.9	0.0275	101.6	0.0186
5	9.050	0.0276	815.9	0.0187
6	1.242	0.0276	0.358	0.0181
7	0.434	0.0267	-	-



Σχήμα 5.7: Κοινό διάγραμμα της απόκρισης του συστήματος σε σχέση με την ενεργότητα του ομοιώματος

Παρατηρείται ότι η αύξηση του αναγραφόμενου νεκρού χρόνου πέραν του 25% έχει ως αποτέλεσμα την αξιολογή μείωση της απόδοσης του συστήματος. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι για νεκρό χρόνο 80%, η απόδοση μειώνεται κατά περίπου 50% σε σχέση με την απόδοση στην γραμμική περιοχή λειτουργίας.

Μελετήθηκε η μεταβολή του αναγραφόμενου νεκρού χρόνου της μέτρησης με τον ρυθμό παλμών που καταγράφονται σε όλο το φάσμα. Στο Σχήμα 5.8 απεικονίζεται σε κοινό διάγραμμα η σχέση του νεκρού χρόνου του συστήματος με το ρυθμό καθαρών παλμών για τις δύο μεθοδολογίες. Παρατηρείται πως δεν υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ νεκρού χρόνου και αριθμού ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται στη μέτρηση, γεγονός που σημαίνει ότι η λειτουργία της πολύπλεξης δεν επηρεάζεται δραστικά από την παρουσία των ανιχνευτών A2, δηλαδή από την απενεργοποίηση δυο εισόδων στο σύστημα πολύπλεξης.

Τα διαγράμματα 5.9 και 5.10 παρουσιάζουν την μεταβολή του νεκρού χρόνου (DT) σε συνάρτηση με το ρυθμό παλμών και το διορθωμένο για το υπόστρωμα ρυθμό παλμών (R) του συνολικού φάσματος, αντίστοιχα.

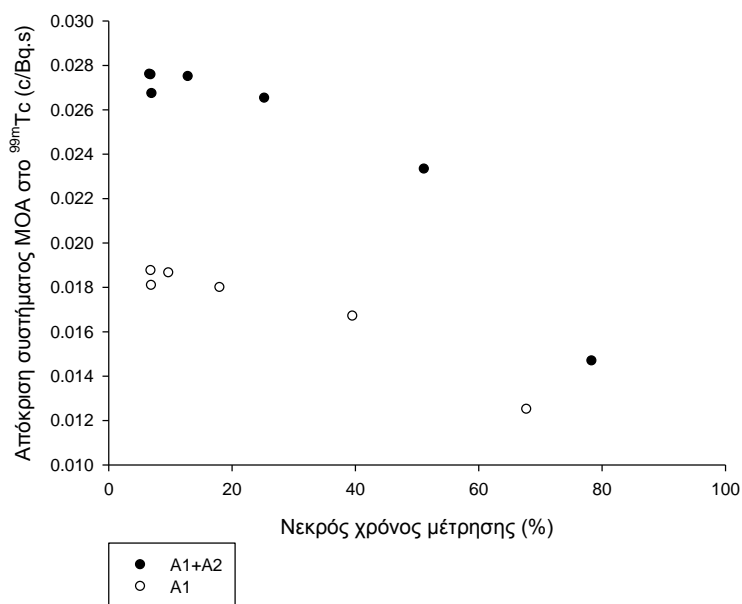
Στα δεδομένα των δύο διαγραμμάτων προσαρμόστηκε πολυωνυμική συνάρτηση 2^{ου} βαθμού της μορφής:

$$R = R_0 + a \times DT + b \times DT^2$$

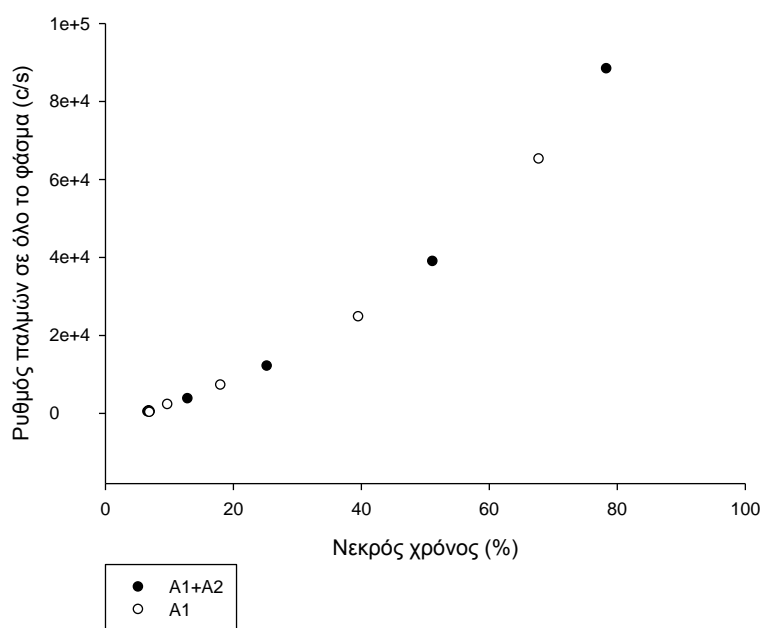
Για την καμπύλη 5.9 βρέθηκε συντελεστής συσχέτισης $R^2=0.999$ και οι τιμές των παραμέτρων R_0 , a και b ίσες προς $-1024(\pm 673)$, $160(\pm 53)$, $12.4(\pm 0.6)$.

Για την καμπύλη 5.10 βρέθηκε συντελεστής συσχέτισης $R^2=0.999$ και οι τιμές των παραμέτρων R_0 , a και b ίσες προς $-1267(\pm 670)$, $160(\pm 54)$, $12.4(\pm 0.6)$.

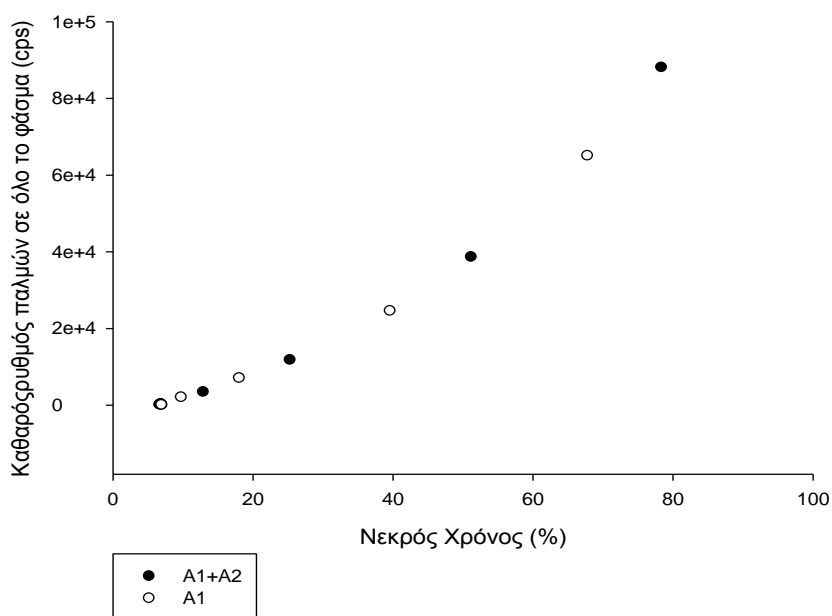
Επίσης μελετήθηκε η απόδοση ανίχνευσης φωτονίων ενέργειας 1.46 MeV του ^{40}K σε συνάρτηση με τον νεκρό χρόνο της μέτρησης (Σχήμα 5.9).



Σχήμα 5.8: Κοινό διάγραμμα της απόκρισης του συστήματος σε σχέση με την τον νεκρό χρόνο



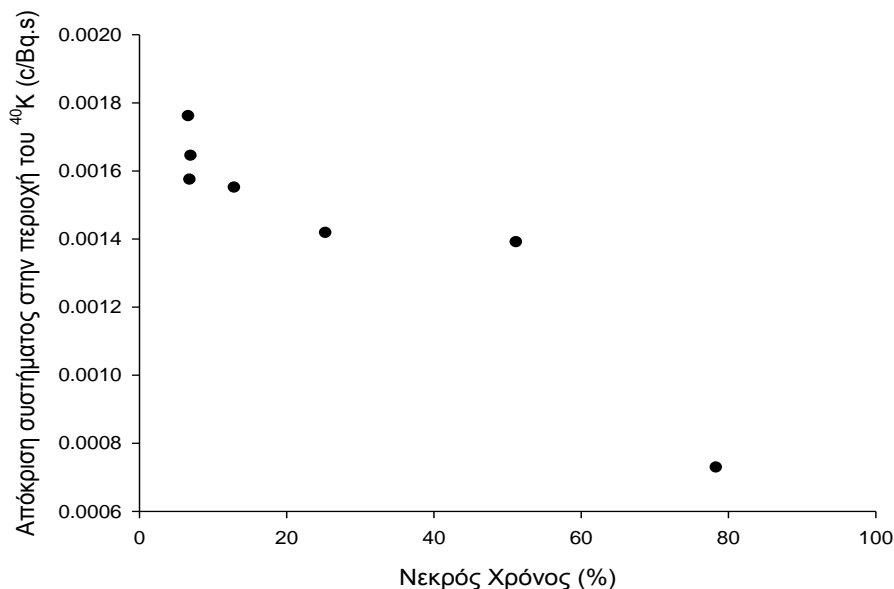
Σχήμα 5.9: Κοινό διάγραμμα του ρυθμού παλμών σε όλο φάσμα, σε σχέση με την τον νεκρό χρόνο.



Σχήμα 5.10: Κοινό διάγραμμα του καθαρού ρυθμού παλμών σε όλο φάσμα, σε σχέση με την τον νεκρό χρόνο.

Με βάση την εικόνα των γραφημάτων 5.6 και 5.11, παρατηρείται πως η ανιχνευτική απόδοση του συστήματος στο ισότοπο υψηλής ενέργειας επηρεάζεται εξαιτίας του υψηλού ρυθμού παλμών που καταγράφεται στην περιοχή του ^{99m}Tc . Χαρακτηριστική είναι η έλλειψη περιοχής σταθερότητας στο γράφημα 5.11, γεγονός που ίσως

οφείλεται σε προβληματική λειτουργία της πολύπλεξης. Πιθανή αιτία αποτελεί το γεγονός ότι ο πολυπλέκτης δίνει προτεραιότητα σε φωτόνια που προέρχονται από την ισχυρή πηγή που σε αυτήν την περίπτωση είναι το ^{99m}Tc εις βάρος των φωτονίων της ασθενούς πηγής [Gilmore 2008].



Σχήμα 5.11: Διάγραμμα της ανιχνευτικής απόδοσης του συστήματος στην περιοχή του ^{40}K σε σχέση με την τον νεκρό χρόνο για τη μέτρηση με όλους τους ανιχνευτές.

5.6 Συμπεράσματα

Α. Μελετήθηκε η αναλογικότητα κατά τη διαδικασία μετατροπής της απορροφημένης ενέργειας στον ανιχνευτή σε ηλεκτρικό παλμό. Βρέθηκε μέσω του υπολογισμού των συντελεστών ενεργειακής βαθμονόμησης ότι το σύνολο των ανιχνευτών παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά, που περιγράφεται από τις αντίστοιχες σχέσεις βαθμονόμησης στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Β. Μελετήθηκε η ποσότητα FWHM για διαφορετικές ενέργειες φωτονίων για κάθε ανιχνευτή και προσδιορίστηκαν οι σχέσεις εξάρτησης της ποσότητας από την ενέργεια. Οι σχετικοί συντελεστές στο αρχείο εισόδου του μοντέλου του MOA στον κώδικα MCNP5, που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 8.

Γ. Μελετήθηκε η απόκριση του συστήματος του MOA για δυο διαφορετικές μεθοδολογίες μέτρησης ομοιώματος με υψηλό ρυθμό εκπομπής φωτονίων και προσδιορίστηκε περιοχή σταθερής λειτουργίας του συστήματος.

Κεφάλαιο 6

Έλεγχος αξιοπιστίας μετρήσεων

6.1 Εισαγωγή

Η διασφάλιση της ποιότητας των μετρητικών αποτελεσμάτων των συστημάτων ΜΟΑ θεωρείται απαραίτητη για την αποδοτική εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν. Βασικοί παράγοντες που δύναται να αυξήσουν τα τυχαία σφάλματα των μετρήσεων και με αυτό τον τρόπο να υποβαθμισθεί η ποιότητα των αποτελεσμάτων, είναι η μη ικανοποιητική λειτουργία των πυρηνικών ηλεκτρονικών του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων και των ηλεκτρονικών στοιχείων των ανιχνευτών [Pomme 2000] και η αδυναμία επίτευξης επαναλήψιμων συνθηκών μέτρησης εξαιτίας μεταβολών σε περιβαλλοντικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία και κυρίως η ακτινοβολία υποστρώματος [Parthasarathy 1976, Lykken 1983].

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του ΜΟΑ, πραγματοποιήθηκε αριθμός μετρήσεων με σκοπό την διερεύνηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών του. Διαπιστώθηκε ότι ο μετρητής παρουσίαζε προβληματική λειτουργία ως προς την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Εκτός αυτού, το σύστημα εμφάνισε προβλήματα που σχετιζόταν με την λειτουργία των ηλεκτρονικών μερών του. Για αυτό το σκοπό έγινε εμπειριστατώμενος ποιοτικός έλεγχος που περιλάμβανε την αξιολόγηση του μεγέθους της αξιοπιστίας των μετρήσεων και αναπτύχθηκε εμπειρική μεθοδολογία για τη βελτιστοποίηση της ποιότητάς τους.

6.2 Ανασκόπηση αποτελεσμάτων-συζήτηση βιβλιογραφίας

Ακτινοβολία υποστρώματος

Η ακτινοβολία υποστρώματος θεωρείται μια από τις κυριότερες πηγές τυχαίων σφαλμάτων στις μετρήσεις νουκλιδίων χαμηλής ενεργότητας. Ο όρος «σήμα υποστρώματος» αναφέρεται σε οποιοσδήποτε τύπο σήματος που συγχέεται με το υπό μέτρηση φαινόμενο και έχει ισχύ σε ευρύ φάσμα διαδικασιών. Στην περίπτωση της γ-φασματοσκοπίας, ο ηλεκτρονικός θόρυβος και η ακτινοβολία υποστρώματος θεωρούνται ως η πιο σημαντικές πηγές σήματος υποστρώματος. [Knoll 2000, Gilmore 2008].

Η ακτινοβολία υποστρώματος που εμπλέκεται στις μετρήσεις γ-φασματοσκοπίας έχει διάφορες πηγές προέλευσης και χαρακτηρίζεται από διαφορετικές μορφές και είδη. Μια αρχική κατηγοριοποίηση της ακτινοβολίας υποστρώματος γίνεται σύμφωνα με τον τύπο και την πηγή της που το προκαλεί και μπορεί να είναι φυσική ή τεχνητή. Παραδείγματα τεχνητών πηγών ακτινοβολίας υποστρώματος είναι τα ραδιονουκλίδια που παρήχθησαν στην ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια των υπέργειων πυρηνικών εκρήξεων που έγιναν στο παρελθόν στην ατμόσφαιρα, την αποδέσμευση ραδιονουκλιδίων από πυρηνικούς αντιδραστήρες (κυρίως κατά τη διάρκεια καταστάσεων εκτάκτου ανάγκης) καθώς και ραδιενεργά κατάλοιπα που προέρχονται

από νοσοκομεία, ερευνητικά κέντρα ή άλλες πηγές. Σε αντίθεση, η φυσική ακτινοβολία υποβάθρου οφείλεται στην κοσμική ακτινοβολία και το φυσικό περιβάλλον του πλανήτη.

Ο Knoll [2000] παρουσιάζει μια εστιασμένη, στις ανάγκες της τεχνικής της γ-φασματοσκοπίας, κατηγοριοποίηση της ακτινοβολίας υποστρώματος, η οποία περιλαμβάνει το είδος των ραδιενεργών πηγών και τη φυσική τους μορφή π.χ. αέριοι ή επίγειοι φορείς ραδιενέργειας. Η ακτινοβολία υποστρώματος διακρίνεται στις εξής πέντε ομάδες:

- α) η φυσική ραδιενέργεια που υπάρχει στο υλικό των ανιχνευτών,
- β) η φυσική ραδιενέργεια των υλικών που υπάρχουν κοντά στο μετρητικό σύστημα,
- γ) η ραδιενέργεια που υπάρχει στη γήινη επιφάνεια και στα υλικά κατασκευής των κτιρίων,
- δ) η ραδιενέργεια στον αέρα, και
- ε) η κοσμική ακτινοβολία.

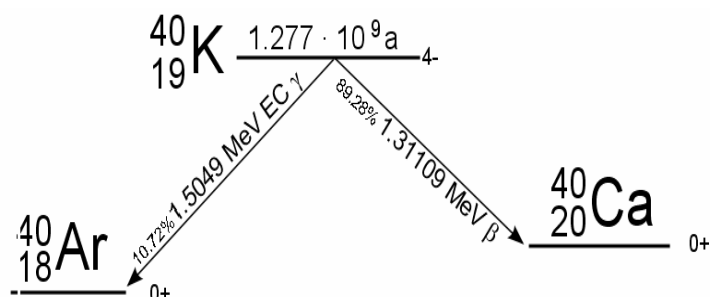
Χαρακτηριστικά παραδείγματα νουκλιδίων που αναφέρονται ως πηγές ακτινοβολίας υποστρώματος στη γ-φασματοσκοπία είναι α) φυσικές πηγές ^{40}K , ^{238}U , ^{235}U και ^{232}Th μαζί με τα θυγατρικά προϊόντα τους, β) τα νουκλίδια ^{137}Cs και ^{60}Co , που είναι προϊόντα ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, γ) το ^7Be , που δημιουργείται μέσω πυρηνικών αντιδράσεων που επάγονται από την κοσμική ακτινοβολία.

Βασικό στοιχείο στη συζήτηση για το υπόστρωμα ακτινοβολίας είναι το ζήτημα της σχετικής συνεισφοράς των προαναφερθέντων πηγών ακτινοβολίας υποστρώματος στο συνολικό ανιχνευόμενο υπόστρωμα. Η διερεύνηση της συγκεκριμένης παραμέτρου για συστήματα τα οποία είναι εγκατεστημένα σε χώρους όπου δεν υπάρχουν ρυπάνσεις από ανθρωπογενής δραστηριότητες αποκαλύπτει ότι η σχετική συνεισφορά εξαρτάται από τις συνθήκες θωράκισης του ανιχνευτικού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα η θωράκιση των ανιχνευτών μειώνει σε μεγάλο βαθμό την συνεισφορά της κοσμικής ακτινοβολίας [Mehl, 1967, Schmier, 1972, Noz, 1980, Oliveira, 1989]. Σε αυτή την περίπτωση, η ακτινοβολία που προέρχεται από την ραδιενεργό διάσπαση νουκλιδίων που περιέχονται στα διάφορα υλικά στη γειτονιά των ανιχνευτών συμπεριλαμβανομένου του αέρα, γίνεται η πιο σημαντική πηγή υποστρώματος. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου ο/οι ανιχνευτές του συστήματος είναι αθωράκιστοι, τότε η κοσμική ακτινοβολία και η ακτινοβολία από υλικά του δωματίου όπου είναι εγκατεστημένος ο ΜΟΑ παίζουν τον πιο σημαντικό ρόλο.

Όπως έχει αναφερθεί στην περιγραφή του συστήματος του ΜΟΑ (Κεφ. 2), οι ανιχνευτές είναι εγκατεστημένοι σε ειδικά θωρακισμένη κατασκευή για την ελαχιστοποίηση της επίδρασης της κοσμικής ακτινοβολίας καθώς και αυτής που προέρχεται από την τη ισόγεια αίθουσας όπου εγκαταστάθηκε ο ΜΟΑ (υπάρχει και 1°s όροφος με αυξημένο πάχος σκυροδέματος μεταξύ τους, αλλά δεν υπάρχει υπόγειο). Ως εκ τούτου και σύμφωνα με τις αναφορές που προηγήθηκαν, αναμένεται ότι οι κύριες πηγές ακτινοβολίας περιβάλλοντος εκτός της κοσμικής ακτινοβολίας που συνεισφέρουν στο συνολικό σήμα υποστρώματος του ΜΟΑ, είναι τα φυσικά ισότοπα ^{40}K , ^{238}U , ^{235}U και ^{232}Th καθώς και τα θυγατρικά τους προϊόντα.

Ο Minty [1997] αναφέρει ότι τα ισότοπα ^{40}K , ^{238}U , ^{235}U και ^{232}Th σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια της δημιουργίας του σύμπαντος και έχουν χρόνους ημιζωής της τάξεως μεγέθους της ηλικίας της γης, περίπου 5×10^9 y, με εξαίρεση το ^{235}U που έχει

χρόνο ημιζωής 7×10^8 y. Οι μέσες περιεκτικότητες των εν λόγω στοιχείων στο φλοιό της γης είναι για το κάλιο 2%, για το ουράνιο 2.7 ppm και για το θόριο 8.5 ppm. Για παράδειγμα, ο Anagnostakis και συν. [1996] βρήκε ότι ο γεωμετρικός μέσος όρος ραδιενέργειας 1440 δειγμάτων επιφανειακού χώματος από όλη την Ελλάδα ήταν 378 ± 172 Bq/kg ^{40}K , 27 ± 12 Bq/kg ^{226}Ra και 25 ± 14 Bq/kg ^{228}Ra , ενώ ειδικά για την Ήπειρο, οι Probonas, Kritidis [1993] βρήκαν μέσες τιμές 440 Bq/kg ^{40}K , 44 Bq/kg ^{238}U , 42 Bq/kg ^{228}Ra , 32 Bq/kg ^{238}Th , και 42 Bq/kg ^{226}Ra . Επιπλέον στα κτίρια της πόλης των Ιωαννίνων, αναφέρουν οι Clouvas και συν. [2004], βρήκαν με in situ γ-φασματοσκοπία, ότι από το συνολικό μέσο εξωτερικό ρυθμό δόσης στον αέρα, (48.6 ± 5.3) nSv/h, περίπου το 45% σχετίζεται με το ^{40}K , το 30% με το θόριο και τα θυγατρικά του και 25% στο ουράνιο και τα θυγατρικά του. Το ^{40}K είναι το μοναδικό ραδιενεργό ισότοπο του καλίου που υπάρχει στη φύση και παρουσιάζεται σε αναλογία 0.0117% [ΙΑΕΑ 1989] στο φυσικό κάλιο. Το 89% των πυρήνων του ^{40}K αποδιεγείρονται με εκπομπή ηλεκτρονίων (σωμάτια βήτα) σε πυρήνες ^{40}Ca , ενώ το υπόλοιπο 11% αποδιεγείρεται μέσω του μηχανισμού της σύλληψης ηλεκτρονίου σε ^{40}Ar . Ο δεύτερος τύπος αποδιέγερσης συνοδεύεται από εκπομπή μονοενεργειακής γ ακτινοβολίας ενέργειας 1.460 MeV. Εξαιτίας του γεγονότος ότι το ^{40}K βρίσκεται σε σταθερή αναλογία στο κάλιο του φυσικού περιβάλλοντος, η ροή ακτινοβολίας γάμμα που εκπέμπεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της συνολικής ποσότητας καλίου. Το Σχήμα 6.1 παρουσιάζει τους τρόπους αποδιέγερσης του ^{40}K .



Σχήμα 6.1: Το σχήμα αποδιέγερσης του ^{40}K

Το ^{40}K είναι πολύ ασθενέστερη πηγή ακτινοβολίας σε σύγκριση με τη σειρά του ουρανίου και του θορίου σε όρους ενεργότητας ανά μονάδα μάζας. Το ουράνιο εμφανίζεται στη φύση κυρίως ως ^{238}U και ^{235}U με χρόνους ημιζωής 47×10^9 y και 7.13×10^8 y, αντίστοιχα. Η αποδιέγερσή τους καταλήγει σταθερά ισότοπα του μολύβδου, ^{206}Pb και ^{207}Pb αντίστοιχα. Στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται δεδομένα για τα σχήματα αποδιέγερσης των ισοτόπων του ουρανίου και του θορίου.

Στατιστικές μέθοδοι ελέγχου μεγεθών

Βασικό κριτήριο για τον έλεγχο καλής λειτουργίας μιας διάταξης γ-φασματοσκοπίας είναι η σύγκριση της στατιστικής συμπεριφοράς των πειραματικών αποτελεσμάτων των μετρήσεων έναντι των προβλέψεων που υπαγορεύονται από την θεωρητική κατανομή που περιγράφει τα εμπλεκόμενα φυσικά φαινόμενα [Muller 1979, Winkler 1998]. Η στατιστική των φαινομένων που εμπλέκονται στις διαδικασίες της

πυρηνικής διάσπασης και στην ανίχνευση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας συζητείται ευρύτατα στη βιβλιογραφία [Knoll 2000, Gilmore 2008, Jenkins 1995, Pomme 2000]. Οι διαδικασίες αποδιέγερσης χαρακτηρίζονται ως τυχαίες, γεγονός που σημαίνει πως το αποτέλεσμα της μέτρησης του αριθμού των διασπάσεων ή του αριθμού των ανιχνευόμενων γεγονότων μέσα σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, υπόκεινται σε μεταβολές και συνδέονται με τυχαία αβεβαιότητα.

Μέγεθος ενδιαφέροντος είναι η αναμενόμενη τιμή $E(x)$ της μεταβλητής x , όπου στην περίπτωση των μετρήσεων φαινομένων που σχετίζονται με την πυρηνική διάσπαση αναφέρεται ως ο αριθμός των διασπάσεων ανά μονάδα χρόνου ή ο ρυθμός των ανιχνευόμενων γεγονότων. Η διασπορά των μετρούμενων τιμών x_i γύρω από την αναμενόμενη τιμή μπορεί να περιγραφεί από το μέγεθος της τυπικής απόκλισης σ ή από το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης, που ονομάζεται διακύμανση και εκφράζεται από τη σχέση:

$$Var(x) = E[(x - E(x))^2] = E(x^2) - [E(x)]^2 \quad (6.1)$$

όπου ο τελεστής E συμβολίζει την αναμενόμενη τιμή. Βασιζόμενοι σε πεπερασμένο αριθμό μετρητικών αποτελεσμάτων που κτήθηκαν κάτω από ίδιες συνθήκες, x_i ($i=1, 2, \dots, n$), μόνο προσεγγίσεις των μεγεθών της $E(x)$ και $Var(x)$ είναι εφικτό να γίνουν. Αυτές οι προσεγγίσεις αναφέρονται αντίστοιχα στο μέγεθος της μέσης τιμής $\langle x \rangle$ της μετρούμενης μεταβλητής x και στην πειραματική διακύμανση του δείγματος μετρήσεων.

Για οποιαδήποτε ακολουθία τυχαίων μεταβλητών, ισχύει η ακόλουθη προσέγγιση για την διακύμανση ενός μεγέθους f που αποτελεί συνάρτηση τυχαίων μεταβλητών x_1, x_2, \dots, x_n , $f=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$:

$$Var(f) \approx \sum_i^n \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_\mu^2 \sigma_{x_i}^2 \right] + 2 \sum_{i < j}^n \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_\mu \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right)_\mu Cov(x_i, x_j) \right] \quad (6.2)$$

Η ποσότητα $Cov(x_i, x_j)$ δίνεται από τη σχέση $Cov(x_i, x_j) = \rho \sigma_{x_i} \sigma_{x_j}$ όπου ρ είναι ο συντελεστής συσχέτισης των μεταβλητών x_i και x_j . Ο δείκτης μ υποδεικνύει ότι οι παράγωγοι πρέπει να υπολογίζονται για τη αναμενόμενη τιμή των μεταβλητών.

Μια ειδική περίπτωση υπολογισμού της διακύμανσης ενός δείγματος συναντάται στις *in vivo* μετρήσεις κατά ζεύγη. Θεμελιώδης υπόθεση κατά την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας είναι ότι η διακύμανση της κατανομής μιας σειράς μετρήσεων που γίνονται σε ένα άτομο στη διάρκεια μιας ημέρας, δεν διαφέρει από εξεταζόμενο σε εξεταζόμενο. Σε αυτή την περίπτωση ισχύει ότι αν σε κάθε άτομο έχουν γίνει k ανεξάρτητες ομάδες μετρήσεων, όπου κάθε ομάδα αποτελείται από n_i ($i=1, 2, \dots, k$) μετρήσεις με παρατηρούμενες διακυμάνσεις s_1^2, s_2^2, \dots και s_k^2 , αντίστοιχα, η καλύτερη εκτίμηση για την τυπική απόκλιση της κατανομής αυτών των μετρήσεων δίνεται από την σχέση:

$$sd = \left[\frac{\sum_{i=1}^k n_i s_i^2}{\left(\sum_{i=1}^k n_i \right) - k} \right]^{0.5} \quad \text{όπου } n_i \geq 2, k \geq 1 \quad (6.3)$$

Επειδή στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις (x_i, y_i) ανά εξεταζόμενο ($n_1 = n_2 = \dots = n_k = 2$) και μετρήθηκαν k άτομα, η τυπική απόκλιση (sd) για τη συνολική διαδικασία μπορεί να προσεγγιστεί μέσω της σχέσης:

$$sd = \left[\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - y_i)^2}{2k} \right]^{0.5} \quad (6.4)$$

Ανεξάρτητα από τη μεθοδολογία υπολογισμού της διακύμανσης και σύμφωνα με την κοινή πρακτική, η διασπορά των πειραματικών τιμών x_i γύρω από την αναμενόμενη τιμή $E(x)$ πρέπει να είναι σύμφωνη με το νόμο που περιγράφει τη διαδικασία Poisson. Σε περιπτώσεις όπου οι αναμενόμενες τιμές είναι μεγάλες, π.χ. $E(x) \geq 10$, τότε οι στατιστική Poisson μεταπίπτει σε στατιστική συμπεριφορά που περιγράφεται ικανοποιητικά και από την κατανομή Gauss. Και στις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις, η διακύμανση των καταγεγραμμένων παλμών, υποθέτοντας σταθερή ενεργότητα της πηγής, είναι ίση με την αναμενόμενη τιμή.

Στη βάση του θεωρητικού μοντέλου διασποράς που χρησιμοποιείται, η αβεβαιότητα μιας μέτρησης μπορεί να εκτιμηθεί και να εκφραστεί ως η τετραγωνική ρίζα του αριθμού των καταγεγραμμένων παλμών. Για αριθμό επαναλαμβανόμενων μετρήσεων στις ίδιες συνθήκες, δηλαδή με την ίδια διακύμανση σε κάθε μέτρηση, η καλύτερη εκτίμηση της διασπορά των ανεξάρτητων μετρήσεων x_i , δίνεται από την τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής $(\langle x \rangle)^{0.5}$. Η συγκεκριμένη τιμή μπορεί να συγκριθεί με την αντίστοιχη πειραματική τιμή της τυπικής απόκλισης με σκοπό τον έλεγχο της ποιότητας των μετρητικών αποτελεσμάτων. Η απόκλιση μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής τιμής της διακύμανσης ή της τυπικής απόκλισης, λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένα στατιστικά όρια, μπορεί να υποδεικνύει προβληματική λειτουργία του εξοπλισμού.

Αναφορικά με την μεθοδολογία σύγκρισης της πειραματικής με τη θεωρητική τιμή της διακύμανσης και τα όρια που λαμβάνονται υπόψη, πρέπει να σημειωθεί πως η δειγματική κατανομή των διακυμάνσεων ενός πληθυσμού δεν είναι συμμετρική, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η χρήση της κανονικής ή της student κατανομής για τον έλεγχο των υποθέσεων αναφορικά με το μέγεθος σ^2 και των ορίων εμπιστοσύνης γύρω από το σ^2 . Σύμφωνα με τη θεωρία [Zar 2010] ισχύει, για δείγμα που προέρχεται από κανονικά κατανομημένο πληθυσμό, η σχέση:

$$\chi^2 = \nu s^2 / \sigma^2 \quad (6.3)$$

όπου χ^2 αντιπροσωπεύει την στατιστική κατανομή, η οποία μεταβάλλεται σύμφωνα με τους βαθμούς ελευθερίας ν , όπου $\nu = N - 1$.

Υποθέτοντας το ζευγάρι μιας δίπλευρης υπόθεσης, $H_0 : \sigma^2 = \sigma_0^2$ και την εναλλακτική υπόθεση $H_A : \sigma^2 \neq \sigma_0^2$ όπου σ_0^2 είναι η διακύμανση του πληθυσμού και υπολογίζοντας την ποσότητα της σχέσης 6.3 έχουμε τις εξής περιπτώσεις:

- αν η υπολογιζόμενη ποσότητα χ^2 είναι $\geq \chi_{\alpha/2, v}^2$ ή $\leq \chi_{(1-\alpha/2), v}^2$ τότε η H_0 απορρίπτεται.
- αν η υπολογιζόμενη ποσότητα χ^2 είναι $\chi_{(1-\alpha/2), v}^2 \leq \chi^2 \leq \chi_{\alpha/2, v}^2$ τότε η H_0 δεν απορρίπτεται

Τα διαστήματα εμπιστοσύνης εκφράζουν την αξιοπιστία των παραμέτρων για τις οποίες υπολογίζονται. Εφαρμόζοντας την χ^2 κατανομή, είναι δυνατόν να οριστεί ένα διάστημα μέσα στο οποίο υπάρχει μία πιθανότητα $1-\alpha$ να περιλαμβάνεται η σ^2 σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. Το διάστημα εμπιστοσύνης μέσα στο οποίο βρίσκεται η διακύμανση δίνεται από τη σχέση:

$$vs2/ \chi_{\alpha/2, v}^2 \leq \sigma^2 \leq \chi_{(1-\alpha/2), v}^2 \quad (6.5)$$

Ανασκόπησης παλαιότερων μετρήσεων - ενέργειες αποκατάστασης συστήματος

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του αναβαθμισμένου ΜΟΑ, έγινε σειρά μετρήσεων με σκοπό την εκτίμηση της λειτουργικής κατάστασης του νέου συστήματος στις αρχές της δεκαετίας του 2000. Αυτές οι πρώτες μετρήσεις αφορούσαν την καταγραφή των γεγονότων που προερχόταν από την ποσότητα ^{40}K στο εσωτερικό του σώματος των εξεταζόμενων.

Με βάση τα αποτελέσματα των πρώτων *in vivo* μετρήσεων ελέγχου του συστήματος που πραγματοποιήθηκαν σε υγιές άρρεν άτομο με εκτιμώμενη ποσότητα καλίου στο σώμα του 143 g καλίου που μετρήθηκε επτά φορές, βρέθηκε ότι η πειραματική τυπική απόκλιση των μετρήσεων ήταν 7.6 g καλίου και ο αντίστοιχος συντελεστής μεταβλητότητας 5.3%. Η σύγκριση μεταξύ της θεωρητικής και της πειραματικής τιμής της τυπικής απόκλισης κατέδειξε πειραματικό συντελεστή μεταβλητότητας περίπου διπλάσιο σχέση με αυτόν που υπολογίστηκε βάση του θεωρητικού μοντέλου της κατανομής Poisson, 2.6%. Παρόμοια, ο συντελεστής μεταβλητότητας (8.2%) στην περίπτωση ατόμου που μετρήθηκε τέσσερις μόνο φορές, βρέθηκε επίσης πολύ μεγαλύτερος από το αναμενόμενο. Αρχικά, η μειωμένη αξιοπιστία αποδόθηκε σε απώλεια αριθμού παλμών λόγω του αυξημένου νεκρού χρόνου λήψης των μετρήσεων (νεκρός χρόνος περίπου 15%). Επιτεύχθηκε μείωση του νεκρού χρόνου με κατάλληλη ρύθμιση της κάρτας GPIB-PCII/IIA [Σουσιανάς 2004] και επιλογής από το λογισμικό πρόγραμμα φασματοσκοπίας (*Oxford Instruments Inc, Nuclear Measurements Group*) ενεργοποιώντας τη λειτουργία ελέγχου διόρθωσης του νεκρού χρόνου (επιλογή: *dead time mode: external*)

Ο μετρητής έξι μήνες μετά την αποπεράτωσή της αναβαθμισμένης μορφής του, τον Ιανουάριο του 2006 εμφάνισε μείζον πρόβλημα στην ηλεκτρονική μονάδα επεξεργασίας σήματος και πιο συγκεκριμένα στον αναλυτή πολλαπλών καναλιών και στην μονάδα πολύπλεξης σήματος. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος το σύστημα λειτούργησε για διάστημα περίπου δύο ετών με τη χρήση αναλυτή πολλαπλών καναλιών, ο οποίος υποστήριζε τη χρήση σημάτων μόνο από δύο ανιχνευτές [Βαλάκης 2006].

Τον Μάιο του 2008 αποκτήθηκε σύστημα μετρητή πολλαπλών καναλιών MCB 920E ORTEC® τα χαρακτηριστικά του οποίου περιγράφονται στο Κεφάλαιο 2. Μετά το

πέρας της εγκατάστασης του εν λόγω συστήματος, διαπιστώθηκε προβληματική λειτουργία σε δύο ανιχνευτές του συστήματος καθώς επίσης και σε μονάδες ενίσχυσης καθώς επίσης και σε μονάδες τροφοδοσίας NIM BIN. Έπειτα από εκτεταμένο έλεγχο των επιμέρους τμημάτων έγινε αντικατάσταση των εν λόγω μονάδων.

6.3 Υλικά και μέθοδος

Μελετήθηκε η αξιοπιστία των μετρήσεων έπειτα από την εγκατάσταση του αναλυτή πολλαπλών καναλιών τύπου 920E, και των σχετικών διορθωτικών παρεμβάσεων με επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σε ομοιώματα υδατικών διαλυμάτων KCl ή ^{137}Cs (πρακτικά ομοιόμορφη κατανομή ραδιονουκλιδίων), με ταυτόχρονη χρήση και των 16 ανιχνευτών του συστήματος. Ο έλεγχος της αξιοπιστίας πραγματοποιήθηκε μέσω σύγκρισης των μεγεθών της πειραματικής διακύμανσης και του συντελεστή διακύμανσης των καταγεγραμμένων παλμών σε καθορισμένες περιοχές του φάσματος με την αντίστοιχη τιμή που προβλέπεται από το θεωρητικό μοντέλο της κατανομής Poisson.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με σάρωση του δείγματος για συνολικό μήκος 12 m (τρεις ορθές και τρεις ανάστροφες σαρώσεις της εξεταστικής κλίνης). Η μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με επιλογή της λειτουργίας Preset Real στο ρολόι του αναλυτή πολλαπλών καναλιών. Για κάθε μέτρηση ομοιώματος με ραδιενεργό πηγή, έγινε μέτρηση της ακτινοβολίας υποστρώματος με αντίστοιχο ομοίωμα. Η ακολουθία μέτρησης του δείγματος και του ομοιώματος υποστρώματος ήταν τυχαία, αλλά σε κάθε περίπτωση το χρονικό διάστημα έναρξης της δεύτερης μέτρησης δεν ξεπερνούσε τα 20 min από το πέρας της πρώτης.

Πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σε τέσσερα ομοιώματα σε χρονικό διάστημα ενός χρόνου. Στον Πίνακα 6.1 δίνονται στοιχεία για με τα ομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 6.1: Ομοιώματα προκαταρκτικών μετρήσεων αξιοπιστίας

Ομοίωμα	Ύψος (cm)	Συνολική Μάζα (g)	Ισότοπο περιεχομένου διαλύματος	Ημερομηνία μέτρησης	Ενεργότητα (Bq)
1	177.0	72969	^{40}K	12/2009-1/2010	4365
2	136.5	47857	^{40}K	11/2010	2864
3	177.0	72969	^{137}Cs	11/2010	1133
4	136.5	47857	^{137}Cs	11/2010	743

Το αποτέλεσμα κάθε μέτρησης, κύριου δείγματος ή ομοιώματος υποστρώματος, ήταν συνολικά δεκαέξι φάσματα, ένα φάσμα από κάθε ανιχνευτή, Στον Πίνακα 6.2 αναφέρονται τα βήματα για την ανάλυση και εξαγωγή αριθμητικών δεδομένων.

Πίνακας 6.2: Η μεθοδολογία ανάλυσης των μετρήσεων

Ενέργεια	Περιγραφή	Σχόλια
1	Εντοπισμός της κορυφής ενδιαφέροντος στο φάσμα	Χρήση της καμπύλης ενεργειακής βαθμονόμησης-
2	Σχεδίαση της περιοχής ενδιαφέροντος (RoI) γύρω από την κορυφή	RoI ^{40}K : 1372 keV-1548 keV ^{137}Cs : 598 keV-744 keV
3	Καταγραφή παλμών (Gross counts) που περιλαμβάνονται στο RoI	-
4	Επανάληψη 1-3 για κάθε ένα από τα δεκαέξι φάσματα της μέτρησης	-
5	Άθροιση των παλμών του βήματος 3 από όλους τους ανιχνευτές	Ο ρυθμός παλμών προσδιορίζεται από το πηλίκο των συνολικών παλμών προς το LiveTime (s)

6.4 Αποτελέσματα

Ο Πίνακας 6.3 περιέχει τα αποτελέσματα των δεκαεννιά μετρήσεων του πρώτου ομοιώματος που προσομοιάζει ένα ενήλικα άνδρα μάζας σώματος 72 kg με ~60 Bq ^{40}K ανά kg μάζας σώματος (δηλαδή συγκέντρωση καλίου παρόμοιας της συνήθους για άνδρα νεαρής ηλικίας) καθώς και τα αποτελέσματα των αντίστοιχων μετρήσεων υποστρώματος. Η 2^η, 3^η και 4^η στήλη περιέχουν τα μεγέθη του «Live» χρόνου, του ρυθμού παλμών στην περιοχή των 1460 keV για ενεργειακό παράθυρο της περιοχής ενδιαφέροντος (RoI) από 1372 keV έως 1548 keV (ονομάζεται περιοχή ^{40}K) και τον ρυθμό παλμών στην ενεργειακή περιοχή των 1764 keV για ενεργειακό παράθυρο από 1691 έως 1837 keV, αντίστοιχα (ονομάζεται περιοχή ^{214}Bi). Η επιλογή στενότερου παραθύρου για τον υπολογισμό των παλμών στην περιοχή των 1764 keV, υπαγορεύτηκε από το γεγονός ότι η συγκεκριμένη βρίσκεται κοντά στο άνω όριο του φάσματος που καταγράφεται από το σύστημα.

Στις στήλες 5 έως 7 καταγράφονται τα αντίστοιχα μεγέθη για το ομοίωμα υποστρώματος. Η 8^η στήλη του πίνακα περιέχει τον καθαρό ρυθμό παλμών ο οποίος προσδιορίζεται με βάση τη μεθοδολογία που προτείνεται στο Κεφάλαιο 4 (παλμοί ομοιώματος με πηγή μείον παλμοί ομοιώματος υποστρώματος). Ο Πίνακας 6.4

περιέχει δεδομένα για τα στατιστικά των μετρήσεων που αναφέρονται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3: Στοιχεία μετρήσεων του πρώτου ομοιώματος με διάλυμα KCl

Μέτρηση	Διάρκεια μέτρησης ομοιώματος KCl (s)	Ρυθμός παλμών ^{40}K ομοιώματος KCl (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi ομοιώματος KCl (c/s)	Διάρκεια μέτρησης ομοιώματος (s)	Ρυθμός παλμών ^{40}K υποστρώματος (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi υποστρώματος (c/s)	Καθαρός ρυθμός παλμών (c/s)
1	1956	14.41	3.91	1958	9.17	3.17	5.24
2	1956	14.51	3.80	1957	9.51	3.43	5.00
3	1955	14.72	4.09	1955	9.64	3.58	5.08
4	1952	14.89	4.28	1960	9.67	3.53	5.23
5	1955	14.56	3.97	1955	9.66	3.65	4.90
6	1951	14.72	3.96	1954	9.76	3.71	4.96
7	1959	14.54	3.88	1962	9.93	3.72	4.61
8	1957	14.34	3.67	1959	9.91	3.80	4.43
9	1957	14.50	3.94	1960	9.39	3.48	5.11
10	1959	14.43	3.75	1960	9.47	3.45	4.96
11	1962	14.08	3.58	1963	9.32	3.34	4.76
12	1961	14.19	3.51	1963	9.49	3.35	4.70
13	1961	14.18	3.55	1962	9.34	3.31	4.84
14	1913	13.94	3.30	1940	8.89	2.72	5.05
15	1914	13.58	2.91	1939	8.68	2.68	4.90
16	1918	13.36	2.85	1941	8.70	2.70	4.67
17	1921	13.44	2.89	1940	8.69	2.71	4.75
18	1931	13.57	3.01	1940	8.90	2.83	4.66
19	1943	13.92	3.48	1947	9.16	3.19	4.76

Ο Πίνακας 6.5 είναι αντίστοιχος του Πίνακα 6.3 και περιέχει τα αποτελέσματα των είκοσι μετρήσεων του δεύτερου ομοιώματος, που προσομοιάζει έφηβο με $\sim 2.4 \text{ Bq } ^{40}\text{K}$ ανά kg μάζας σώματος (δηλαδή συγκέντρωση καλίου πολύ μικρότερη της

συνήθους) καθώς και τα αποτελέσματα των αντίστοιχων μετρήσεων με χρήση ομοιώματος υποστρώματος. Ο Πίνακας 6.6 περιέχει δεδομένα για τα στατιστικά των μετρήσεων του Πίνακα 6.5.

Ο Πίνακας 6.7 περιέχει τα αποτελέσματα των δεκατεσσάρων μετρήσεων του τρίτου ομοιώματος που προσομοιάζει ενήλικα άνδρα μολυσμένο με ~ 2.5 kBq ^{137}Cs (~ 39 Bq/kg) καθώς και τα αποτελέσματα των αντίστοιχων μετρήσεων υποστρώματος. Στον Πίνακα 6.8 δίδονται τα αντίστοιχα στατιστικά στοιχεία.

Πίνακας 6.4: Στατιστική ανάλυση μετρήσεων πρώτου ομοιώματος (^{40}K)

Παράμετρος/ Πειραματικό μέγεθος	Ρυθμός παλμών ^{40}K ομοιώματος KCl (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi ομοιώματος (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{40}K υποστρώμα- τος (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi υποστρώμα- τος (c/s)	Καθαρός ρυθμός παλμών (c/s)
Κανονικότητα	ναι ($P \geq 0.20$)	ναι ($P \geq 0.20$)	ναι ($P \geq 0.20$)	ναι ($P \geq 0.20$)	ναι ($P \geq 0.20$)
Μέση τιμή	14.20	3.60	9.33	3.28	4.87
Διακύμανση	0.211	0.185	0.164	0.144	0.045
Συντελεστής μεταβλητότητας	0.032	0.120	0.043	0.116	0.045
Θεωρητική διακύμανση	0.007	0.002	0.005	0.002	0.012
Συντελεστής μεταβλητότητας Poisson	0.006	0.012	0.007	0.013	0.023

Πίνακας 6.5: Στοιχεία μετρήσεων του δεύτερου ομοιώματος με KCl

Μέτρηση	Διάρκεια μέτρησης ομοιώμα- τος (s)	Ρυθμός παλμών ^{40}K ομοι- ώματος KCl (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi ομοιομα- τος (c/s)	Διάρκεια μέτρησης ομοιώμα- τος (s)	Ρυθμός παλμών ^{40}K υποστρώ- ματος (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi υποστρώ- ματος (c/s)	Καθαρός ρυθμός παλμών (c/s)
1	2019	13.45	3.69	2018	10.90	4.12	2.55
2	2019	13.36	3.61	2021	10.48	3.79	2.88
3	2018	13.90	4.11	2018	10.71	4.03	3.19
4	2019	13.81	4.13	2020	10.84	4.18	2.97
5	2016	13.12	3.61	2016	10.61	4.00	2.51
6	2015	12.98	3.36	2015	9.81	3.22	3.17
7	2016	12.43	2.95	2018	9.39	2.89	3.04
8	2014	12.43	2.86	2014	9.51	2.82	2.92

Πίνακας 6.5: (συνέχεια)

Μέτρηση	Διάρκεια μέτρησης ομοιώματος (s)	Ρυθμός παλμών ^{40}K ομοιώματος KCl (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi ομοιώματος KCl (c/s)	Διάρκεια μέτρησης ομοιώματος (s)	Ρυθμός παλμών ^{40}K υποστρώματος (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi υποστρώματος (c/s)	Καθαρός ρυθμός παλμών (c/s)
9	2015	12.55	2.89	2015	9.80	3.07	2.75
10	2014	13.03	3.48	2012	10.08	3.46	2.95
11	2015	13.04	3.54	2015	10.31	3.77	2.73
12	2013	12.83	3.34	2012	10.40	3.60	2.43
13	2014	13.00	3.28	2014	10.10	3.49	2.90
14	2012	12.95	3.33	2014	10.11	3.51	2.84
15	2013	13.05	3.38	2012	9.92	3.35	3.13
16	2010	13.17	3.60	2011	10.20	3.53	2.97
17	2009	13.96	4.34	2011	10.66	4.06	3.30
18	2010	13.49	3.88	2010	10.76	4.10	2.73
19	2010	13.36	3.80	2011	10.58	3.93	2.78
20	2010	13.41	3.77	2009	10.78	4.21	2.63

Πίνακας 6.6: Στατιστική ανάλυση μετρήσεων δεύτερου ομοιώματος (^{40}K)

Παράμετρος / Πειραματικό μέγεθος	Ρυθμός παλμών ^{40}K ομοιώματος KCl (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi ομοιώματος KCl (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{40}K υποστρώματος (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi υποστρώματος (c/s)	Καθαρός ρυθμός παλμών (c/s)
Κανονικότητα	ναι ($P \geq 0.20$)	ναι ($P \geq 0.20$)	ναι ($P \geq 0.20$)	ναι ($P \geq 0.20$)	ναι ($P \geq 0.20$)
Μέση τιμή	13.17	3.55	10.30	3.66	2.87
διακύμανση	0.192	0.159	0.202	0.186	0.055
Συντελεστής μεταβλητότητας	0.033	0.113	0.044	0.118	0.082
Θεωρητική διακύμανση	0.007	0.002	0.005	0.002	0.0116
Συντελεστής μεταβλητότητας Poisson	0.0061	0.0118	0.0069	0.0116	0.038

Ο Πίνακας 6.7 περιέχει τα αποτελέσματα των δεκατεσσάρων μετρήσεων του τρίτου ομοιώματος που προσομοιάζει άνδρα ρυπασμένο με ~ 2.5 kBq ^{137}Cs (~ 39 Bq/kg) καθώς και τα αποτελέσματα των αντίστοιχων μετρήσεων υποστρώματος, ενώ ο Πίνακας 6.8 τα αντιστοιχα στατιστικά στοιχεία.

Πίνακας 6.7: Στοιχεία μετρήσεων του τρίτου ομοιώματος με ^{137}Cs

Μέτρηση	Διάρκεια μέτρησης ομοιώματος (s)	Ρυθμός παλμών ^{137}Cs ομοιώματος (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi ομοιώματος ^{137}Cs (c/s)	Διάρκεια μέτρησης ομοιώματος (s)	Ρυθμός παλμών ^{137}Cs υποστρώματος (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi υποστρώματος (c/s)	Καθαρός ρυθμός παλμών (c/s)
1	2011	35.34	2.74	2011	15.96	3.11	19.38
2	2014	35.57	2.68	2014	15.97	3.01	19.60
3	2013	37.08	3.07	2015	16.42	3.07	20.66
4	2012	38.24	3.20	2009	21.61	4.41	16.63
5	2007	40.31	3.51	2011	19.93	4.00	20.38
6	2008	39.91	3.53	2003	18.10	3.54	21.81
7	2029	37.44	3.15	2029	17.82	3.48	19.62
8	2030	37.25	3.10	2030	16.97	3.23	20.28
9	2030	37.61	3.12	2031	19.11	3.76	18.50
10	2029	38.05	3.11	2032	18.33	3.62	19.72
11	2032	39.55	3.44	2033	22.13	4.41	17.42
12	2032	39.45	3.45	2021	20.73	4.21	18.72
13	2016	40.10	3.69	2003	20.64	4.22	19.46
14	2010	38.86	3.40	2011	15.96	3.11	22.90

Πίνακας 6.8: Στατιστική ανάλυση μετρήσεων του τρίτου ομοιώματος (^{137}Cs)

Παράμετρος/ Πειραματικό μέγεθος	Ρυθμός παλμών ^{137}Cs ομοιώματος (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi ομοιώματος (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{137}Cs υποστρώματος (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi υποστρώματος (c/s)	Καθαρός ρυθμός παλμών (c/s)
Κανονικότητα	ναι ($P \geq 0.20$)	ναι ($P \geq 0.20$)	ναι ($P \geq 0.20$)	ναι ($P \geq 0.20$)	ναι ($P \geq 0.20$)
Μέση τιμή	38.20	3.23	18.55	3.66	19.65

Πίνακας 6.8: (συνέχεια)

Παράμετρος/ Πειραματικό μέγεθος	Ρυθμός παλμών ^{137}Cs ομοιώματος ^{137}Cs (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi ομοιώματος (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{137}Cs υποστρώ- ματος (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi υποστρώ- ματος (c/s)	Καθαρός ρυθμός παλμών (c/s)
Διακύμανση	2.539	0.086	4.724	0.267	2.583
Συντελεστής μεταβλητότητας	0.042	0.091	0.117	0.141	0.082
Θεωρητική διακύμανση	0.019	0.002	0.009	0.002	0.028
Συντελεστής μεταβλητότητας Poisson	0.004	0.012	0.005	0.012	0.009

Ο Πίνακας 6.9 περιέχει τα αποτελέσματα επτά μόνο μετρήσεων του τέταρτου ομοιώματος που προσομοιάζει έφηβο μολυσμένο με 743 Bq ^{137}Cs (~15.5 Bq/kg), καθώς και τα αποτελέσματα των αντίστοιχων μετρήσεων υποστρώματος, ενώ ο Πίνακας 6.10, τα αντίστοιχα στατιστικά στοιχεία.

Πίνακας 6.9: Στοιχεία μετρήσεων του τέταρτου ομοιώματος με ^{137}Cs

Μέτρηση	Διάρκεια μέτρησης ομοιώμα- τος ^{137}Cs (s)	Ρυθμός παλμών ^{137}Cs ομοιώμα- τος ^{137}Cs (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi ομοιώμα- τος ^{137}Cs (c/s)	Διάρκεια μέτρησης ομοιωμα- τος υπο- στρώματος (s)	Ρυθμός παλμών ^{137}Cs υποστρώ- ματος (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi υποστρώ- ματος (c/s)	Καθαρός ρυθμός παλμών (c/s)
1	2025	28.47	3.44	2027	18.85	3.63	9.62
2	2004	30.12	3.89	2018	19.16	3.69	10.96
3	2018	28.84	3.57	2015	20.46	4.01	8.38
4	2013	29.54	3.65	2012	20.03	3.94	9.51
5	2009	28.73	3.61	2015	19.10	3.76	9.63
6	2002	28.00	3.30	1997	18.33	3.50	9.67
7	1993	27.37	3.29	1990	18.74	3.63	8.63

Πίνακας 6.10: Στατιστική ανάλυση μετρήσεων του τέταρτου ομοιώματος (^{137}Cs)

Παράμετρος/ Πειραματικό μέγεθος	Ρυθμός παλμών ^{137}Cs ομοιώμα τος ^{137}Cs (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi ομοιώματος (c/s)	Ρυθμός παλμών ^{137}Cs υποστρώ- ματος(c/s)	Ρυθμός παλμών ^{214}Bi υποστρώ- ματος (c/s)	Καθαρός ρυθμός παλμών (c/s)
Κανονικότητα	ναι ($P \geq 0.20$)	ναι ($P \geq 0.20$)	ναι ($P = 0.178$)	ναι ($P \geq 0.20$)	ναι ($P = 0.128$)
Μέση τιμή	28.72	3.54	19.24	3.74	9.49
διακύμανση	0.842	0.045	0.561	0.033	0.700
Συντελεστής μεταβλητότητας	0.032	0.060	0.039	0.049	0.088
Θεωρητική διακύμανση	0.014	0.002	0.010	0.002	0.024
Συντελεστής μεταβλητότητας Poisson	0.004	0.012	0.005	0.012	0.016

6.5 Συζήτηση-Ανάλυση

Με βάση τα στατιστικά δεδομένα μετρήσεων με το πρώτο ομοίωμα, το μέγεθος της πειραματικής διακύμανσης του καθαρού ρυθμού παλμών στην ενεργειακή περιοχή του ^{40}K (φωτόνια ενέργειας 1460 keV) είναι περίπου τέσσερις φορές μεγαλύτερο από το θεωρητικά αναμενόμενο, υποθέτοντας κατανομή Poisson. Παρόμοιες παρατηρήσεις ισχύουν για τις επιμέρους ποσότητες που μετρούνται στα φάσματα, δηλαδή τον μικτό ρυθμό παλμών, το ρυθμό παλμών ^{214}Bi στις μετρήσεις του κύριου ομοιώματος και του ομοιώματος υποστρώματος οι διακυμάνσεις των οποίων είναι 30, 92, 82, 72 φορές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες θεωρητικές τιμές. Σε κάθε περίπτωση, οι πειραματικές τιμές εμφανίζουν μεγαλύτερα σφάλματα σε σχέση με τα εκτιμώμενα.

Παρόμοια συμπεράσματα ισχύουν για το δεύτερο ομοίωμα, όπου η πειραματική διακύμανση του ρυθμού καθαρών παλμών είναι πέντε φορές μεγαλύτερη από την θεωρητική εκτίμηση και οι διαφορές των διακυμάνσεων των υπολοίπων μεγεθών με τους θεωρητικούς υπολογισμούς είναι στα επίπεδα του 1^{00} ομοιώματος.

Η διαφορά μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής διακύμανσης εμφανίζεται αρκετά πιο διευρυμένη στους ρυθμούς καθαρών παλμών φωτονίων ενέργειας 662 keV από πηγή ^{137}Cs , που προκύπτουν από τις μετρήσεις των αντίστοιχων ομοιωμάτων. Στο 3^ο ομοίωμα η πειραματική διακύμανση είναι 92 φορές μεγαλύτερη από την θεωρητική, ενώ στο τέταρτο ομοίωμα είναι 29 φορές μεγαλύτερη.

Οι πειραματικοί συντελεστές μεταβλητότητας στις μετρήσεις των ομοιωμάτων ^{40}K βρέθηκαν για το 1^ο και 2^ο ομοίωμα ίσοι προς 4.5% και 8.2% αντίστοιχα έναντι της θεωρητικής εκτίμησης που υπολογίστηκε ίση προς 2.3% και 3.8%. Στις μετρήσεις ^{137}Cs οι πειραματικοί συντελεστές μεταβλητότητας για το 3^ο και 4^ο ομοίωμα βρέθηκαν ομοίωμα ίσοι προς 8.2% και 8.8% αντίστοιχα έναντι της θεωρητικής εκτίμησης που υπολογίστηκε ίση προς 0.9% και 1.6%.

Γενικά παρατηρείται ότι οι συντελεστές μεταβλητότητας σε κάθε περίπτωση είναι στατιστικά πολύ μεγαλύτεροι από τις αντίστοιχες αναμενόμενες θεωρητικές τιμές, γεγονός που υποδηλώνει είτε προβληματική λειτουργία του εξοπλισμού είτε αδυναμία αναπαραγωγής των ίδιων συνθηκών σε κάθε μέτρηση. Επιπλέον βρέθηκε ότι η απόκλιση στα ομοιώματα με πηγή ^{137}Cs είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν σε ομοιώματα με πηγή φωτονίων μεγαλύτερης ενέργειας, ^{40}K . Το γεγονός αυτό αποδόθηκε στην ύπαρξη της ασταθούς κορυφής ενέργειας 609 keV του ^{214}Bi , που αποτελεί θυγατρικό προϊόν της αλυσίδας αποδιέγερσης του ^{238}U .

Για τη βελτίωση της αξιοπιστίας των μετρήσεων αναπτύχθηκαν δυο εναλλακτικές μεθοδολογίες, μια που σχετίζεται με την επεξεργασία των φασμάτων (βλέπε παράγραφο 6.5.1) και μια που σχετίζεται με τη μείωση του ραδονίου και των θυγατρικών του στο χώρο (βλέπε παράγραφο 6.5.2).

6.5.1 Ανάπτυξη εμπειρικής διόρθωσης

Μελετήθηκε η σχέση μεταξύ του ρυθμού παλμών που καταγράφονται στην ενεργειακή περιοχή 1691 ως 1837 keV, που έχει ως κέντρο την ενέργεια της ακτινοβολίας-γ του ^{214}Bi 1764.5 keV με τους ρυθμούς παλμών που καταγράφονται στις περιοχές του ^{40}K (1372 ως 1548 keV) και του ^{137}Cs (598 ως 744 keV) στις μετρήσεις των αντίστοιχων ομοιωμάτων. Σημειώνεται ότι στο ενεργειακό παράθυρο 1690 και ως 1837 keV συνεισφέρουν εκτός των άλλων, η ακτινοβολία-γ ενέργειας 1730, 1764.5 και ~1840 keV, που εκπέμπεται από το ^{214}Bi με συχνότητα ~3.1%, 15.9%, και 2.5%, η ακτινοβολία-γ 1648 keV του ^{210}Tl , που παράγεται με χαμηλή συχνότητα μετά το ^{214}Bi , καθώς και η ακτινοβολία-γ ενέργειας 1621 και 2614 keV που εκπέμπονται από τα μέλη της σειράς του θορίου ^{212}Bi και ^{208}Tl με συχνότητα 1.5% και 99.8%, αντίστοιχα (Πίνακες Γ-1 και Γ3-Παράρτημα Γ).

Τα Σχήματα 6.2 και 6.3 απεικονίζουν σε κοινό διάγραμμα τη σχέση μεταξύ του ρυθμού καθαρών παλμών ^{40}K στα ομοιώματα υποστρώματος των μετρήσεων καλίου με τον ρυθμό παλμών του ^{214}Bi και του ρυθμού παλμών ^{137}Cs στα ομοιώματα υποστρώματος των μετρήσεων ^{137}Cs με τον ρυθμό παλμών του ^{214}Bi αντίστοιχα. Στα πειραματικά δεδομένα προσαρμόστηκε γραμμική σχέση, τα στοιχεία της οποίας παρουσιάζονται για κάθε ομοίωμα στον Πίνακα 6.11

Με βάση τη μορφή των γραφημάτων 6.2 και 6.3 και τα αποτελέσματα της εφαρμογής καμπύλης γραμμικής προσαρμογής στα δεδομένα, παρατηρείται ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των ρυθμών παλμών στις περιοχές του ^{40}K και του ^{137}Cs με τον ρυθμό παλμών στην περιοχή των 1764 keV του ^{214}Bi . Παρατηρείται πως οι τιμές της κλίσης της καμπύλης συσχέτισης δεν έχουν στατιστικά σημαντική μεταξύ των ομοιωμάτων που περιέχουν ^{40}K καθώς και των ομοιωμάτων που περιέχουν ^{137}Cs , που σημαίνει πως η παρουσία ^{214}Bi επιδρά κατά το ίδιο ποσοστό στην τιμή του ρυθμού παλμών στις περιοχές του ^{40}K και ^{137}Cs , ανεξάρτητα από το μέγεθος του ομοιώματος.

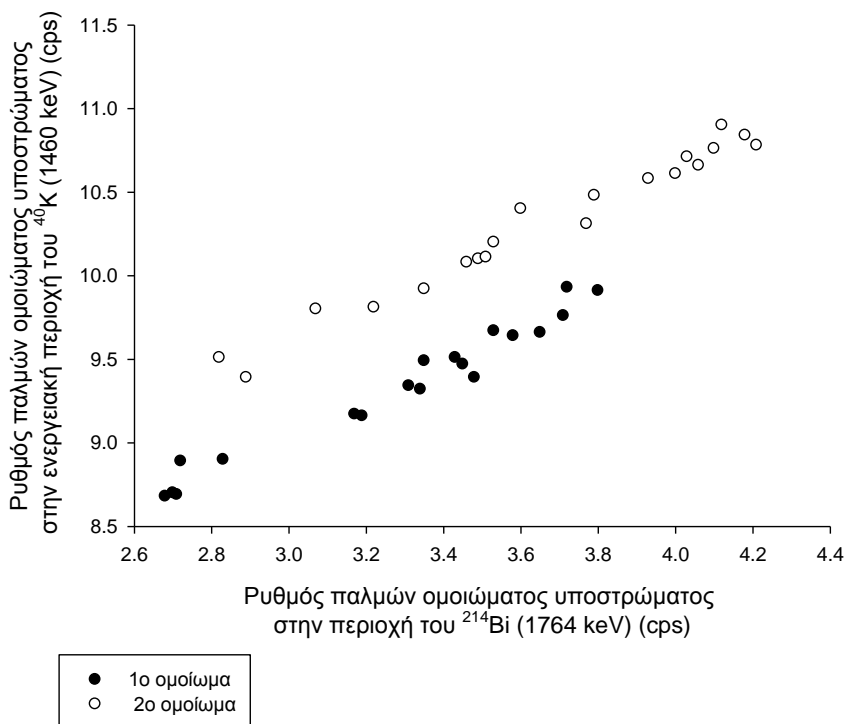
Δεδομένης της ύπαρξης ^{214}Bi στο χώρο του μετρητή λόγω φυσικής ραδιενέργειας που ακολουθεί τις αυξομειώσεις του ραδονίου στο χώρο, αναπτύχθηκε εμπειρική μέθοδος για τη διόρθωση του ρυθμού παλμών του ^{40}K και ^{137}Cs . Στόχος της μεθόδου ήταν η απομάκρυνση της επίδρασης του ^{214}Bi στις ενεργειακές περιοχές των μελετούμενων ισotόπων με τη χρήση των εμπειρικών σχέσεων:

$$R_{40\text{K}}^{\text{cor}} = R_{40\text{K}} - 1.046 \times R_{214\text{Bi}} \quad (6.4)$$

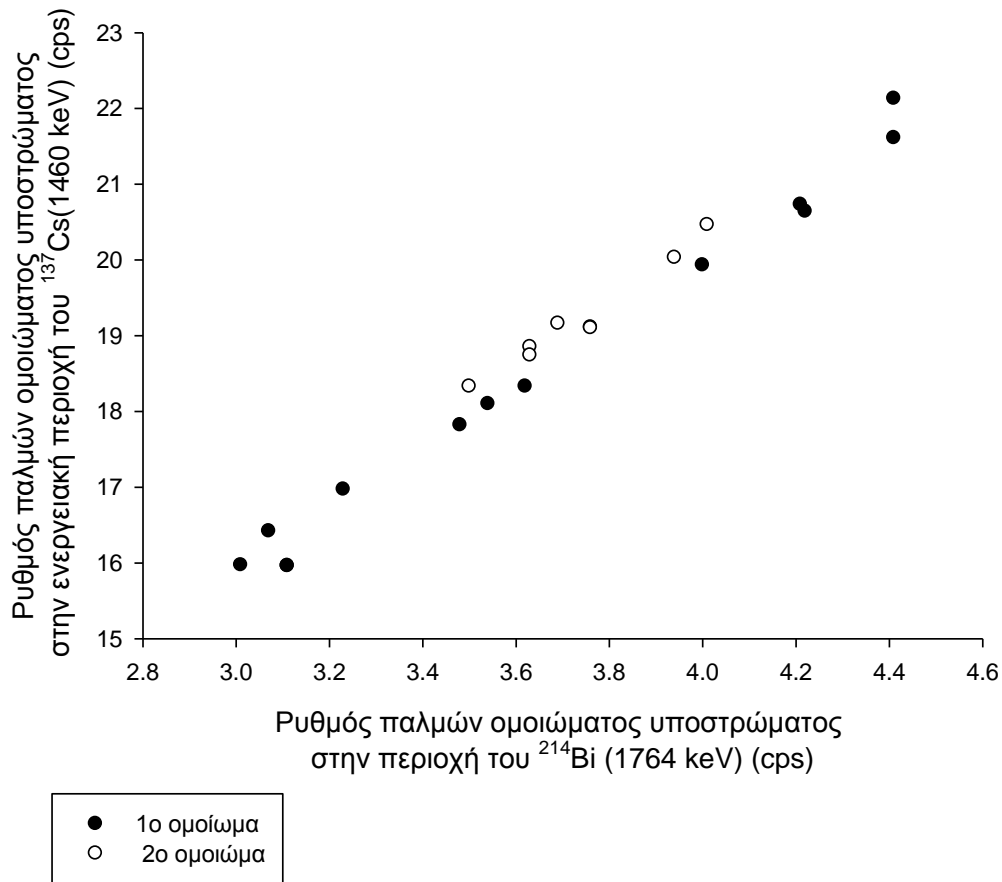
$$R_{137\text{Cs}}^{\text{cor}} = R_{137\text{Cs}} - 4.181 \times R_{214\text{Bi}} \quad (6.5)$$

όπου $R_{40\text{K}}^{\text{cor}}$ και $R_{137\text{Cs}}^{\text{cor}}$ συμβολίζουν τους διορθωμένους ρυθμούς που υπολογίζονται για ^{40}K και το ^{137}Cs αντίστοιχα, $R_{40\text{K}}$ και $R_{137\text{Cs}}$ συμβολίζουν τους ρυθμούς που μετρούνται για το ^{40}K και το ^{137}Cs αντίστοιχα με τη χρήση των παραθύρων που αναφέρονται στον Πίνακα 6.1, και $R_{214\text{Bi}}$ συμβολίζει το ρυθμό που καταγράφεται στο ενεργειακό παράθυρο γύρω από την ενέργεια 1764 keV.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4, ο καθαρός ρυθμός παλμών σε κάποια ενεργειακή περιοχή προκύπτει από την αφαίρεση του ρυθμού των παλμών υποστρώματος από τον ρυθμό παλμών της κύριας μέτρησης. Ως εκ τούτου, η διόρθωση πρέπει να εφαρμόζεται τόσο στα δεδομένα της κύριας μέτρησης όσο και στα δεδομένα της μέτρησης σήματος του υποστρώματος.



Σχήμα 6.2: Διάγραμμα ρυθμού παλμών ομοιώματος υποστρώματος ^{40}K σε συνάρτηση με τον ρυθμό παλμών στην περιοχή του ^{214}Bi



Σχήμα 6.3: Διάγραμμα ρυθμού παλμών ομοιώματος υποστρώματος ^{137}Cs σε συνάρτηση με τον ρυθμό παλμών στην περιοχή του ^{214}Bi

Πίνακας 6.11: Οι τιμές των παραμέτρων γραμμικής προσαρμογής

Ομοίωμα	Σταθερός όρος (cps)	Κλίση	Συντελεστής συσχέτισης R^2
1	5.890 ($\pm 0.1.59$)	1.046 (± 0.048)	0.965
2	6.548 (± 0.15)	1.025 (± 0.041)	0.972
3	3.264 (± 0.46)	4.181 (± 0.125)	0.989
4	4.012 (± 1.125)	4.074 (± 0.301)	0.973

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε στα δεδομένα των ομοιωμάτων και υπολογίστηκαν εκ νέου οι συντελεστές διακύμανσης. Ο Πίνακας 6.12 παρουσιάζει τις τιμές του συντελεστή συσχέτισης και την μέση τιμή του ρυθμού παλμών για κάθε ομοίωμα πριν και μετά της εφαρμογή της διόρθωσης.

Πίνακας 6.12: Συγκριτικά αποτελέσματα

Ομοίωμα	Συντελεστής μεταβλητότητας χωρίς διόρθωση	Μέση τιμή (cps) χωρίς διόρθωση	Συντελεστής μεταβλητότητας με διόρθωση	Μέση τιμή (cps) με διόρθωση
1	0.045	4.87	0.017	4.54
2	0.082	2.87	0.033	2.98
3	0.082	19.65	0.024	21.44
4	0.088	9.49	0.023	10.33

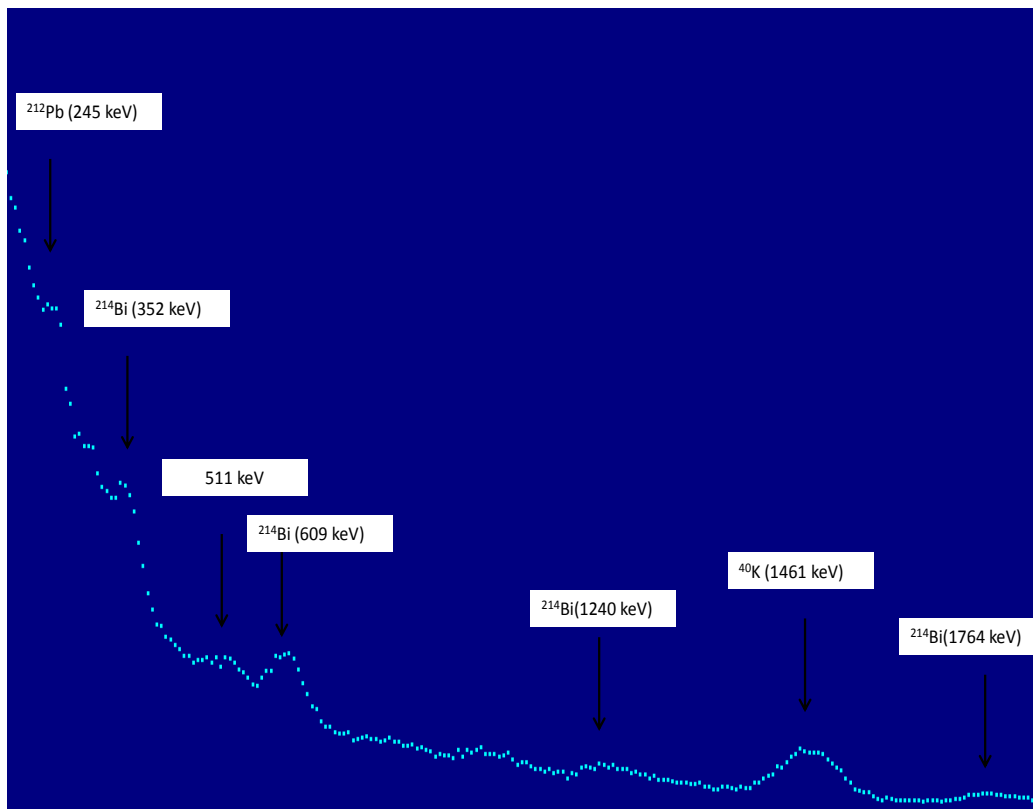
Η εφαρμογή της μεθοδολογίας που βασίζεται στον αριθμό των παλμών που ανιχνεύονται στην ενεργειακή περιοχή 1.69–1.84 MeV, βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό την επαναληψιμότητα των μετρήσεων και στα τέσσερα ομοιώματα. Ο συντελεστής μεταβλητότητας για τα διορθωμένα δεδομένα του πρώτου ομοιώματος είναι κατά 62% μικρότερος από την αρχική εκτίμηση, ενώ η μέση τιμή του ρυθμού καθαρών παλμών είναι κατά 7% μικρότερη από την αρχική, δηλαδή 7% των παλμών στο ενεργειακό παράθυρο του ^{40}K (1.37–1.55 MeV) αποδίδεται σε παλμούς που σχετίζονται με την ύπαρξη ^{214}Bi , κυρίως δε φωτονίων ενέργειας 1.73 και 1.76 MeV (με συχνότητα εκπομπής 3% και 15.8%, αντίστοιχα), που δεν εναπόθεσαν όλη την ενέργειά τους στον ενεργό όγκο των ανιχνευτών, καθώς και φωτονίων ενέργειας 1.40, 1.41 και 1.51 MeV (με συχνότητα εκπομπής 1.4%, 4.1% και 2.2%, αντίστοιχα). Η εν λόγω διόρθωση είχε ως συνέπεια τη βελτίωση της αξιοπιστίας των μετρήσεων στο δεύτερο, το τρίτο και τέταρτο ομοίωμα κατά 60%, 70% και 74%, αντίστοιχα. Επίσης οι μέσες τιμές των διορθωμένων αποτελεσμάτων είναι μειωμένες σε σχέση με τις μη διορθωμένες.

6.5.2 Μελέτη επίδρασης μεθόδου αερισμού στο υπόστρωμα του χώρου - μετρήσεις επιπέδων ^{214}Bi στο χώρο

Με σκοπό την μείωση των επιπέδων ακτινοβολίας στο χώρο του μετρητή το 2011 εγκαταστάθηκε βοηθητικό σύστημα εξαναγκασμένου αερισμού, αποτελούμενο από δύο ανεμιστήρες με δυνατότητα εισαγωγής αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον ή εξαγωγή αέρα από το δωμάτιο προς το περιβάλλον ή εισαγωγής αέρα από τον ένα και εξαγωγής από τον άλλο (βλέπε κεφάλαιο 2). Για τον προσδιορισμό της επίδρασης του τρόπου αερισμού του δωματίου πραγματοποιήθηκε σειρά μετρήσεων που περιλάμβανε:

- Δωδεκάωρες μετρήσεις του υποστρώματος του χώρου κατά τη διάρκεια της νύχτας με τη χρήση του μετρητή σε διαφορετικές συνθήκες αερισμού του χώρου, δηλαδή, με εισαγωγή αέρα στο δωμάτιο από το ύπαιθρο, με εξαγωγή αέρα από το δωμάτιο προς το ύπαιθρο και με συνεχή εναλλαγή αέρα και χωρίς εξαναγκασμένο εξαερισμό σε διαδοχικές νύχτες κατά τις οποίες υπήρχαν ικανοποιητικά σταθερές μετεωρολογικές συνθήκες.

- Μετρήσεις υποστρώματος με τη χρήση ομοιώματος υποστρώματος και διαφορετικές συνθήκες αερισμού.
- Μετρήσεις ^{40}K και ^{137}Cs σε ομοιώματα σε διαφορετικές συνθήκες αερισμού.



Σχήμα 6.4: Τυπικό φάσμα υποστρώματος που αναδεικνύει τον αριθμό παλμών που καταγράφηκαν στις ενεργειακές περιοχές του ^{137}Cs (0.598-0.744 MeV), του ^{40}K (1.37-1.55 MeV) και του ^{214}Bi (1.69 – 1.84 MeV) στο οποίο φαίνεται και η κορυφή που σχετίζεται με την ακτινοβολία- γ 0.61 MeV του ^{14}Bi .

Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζεται το φάσμα από 12ωρη μέτρηση (432000 s) του υποστρώματος στο χώρο του MOA που διενεργήθηκε κατά τη διάρκεια της νύχτας κατά την 29-30 Ιουλίου 2011 με σταθερές μετεωρολογικές συνθήκες. Διακρίνονται καθαρά οι κορυφές που οφείλονται σε φωτόνια που εκπέμπονται από το ^{40}K στα 1460 keV και από το ^{214}Bi στα 1764 keV, 1240 keV και στα 609 keV. Παρατηρείται επίσης κορυφή με ενέργεια περίπου 352 keV η οποία πιθανών ανήκει στον ^{212}Pb , που είναι ραδιονουκλίδιο της αλυσίδας διάσπασης του ^{232}Th ή και του ^{214}Pb που αποτελεί θυγατρικό ισότοπο της αλυσίδας διάσπασης του ^{238}U . Επίσης στην ενεργειακή περιοχή μεταξύ 900 και 1200 keV παρατηρείται μια ασαφής δομή πεπλατυσμένης κορυφής που πιθανώς να οφείλεται στο ισότοπο ^{234}Pa το οποίο εκπέμπει στα 765 και 1001 keV.

Πίνακας 6.13: Συγκριτικά αποτελέσματα μεθόδων αερισμού δωματίου ΜΟΑ

Μέθοδος αερισμού	Παλμοί σε όλο το φάσμα (c)	Παλμοί ^{137}Cs (c)	Παλμοί ^{40}K (c)	Παλμοί ^{214}Bi (c)
Εισαγωγή αέρα	10 033 371	724 733	447 637	126 322
Εξαγωγή αέρα	10 557 222	771 274	465 023	136 361
Εισαγωγή και εξαγωγή αέρα	10 653 153	780 119	465 750	139 204
Χωρίς πρόσθετο αερισμό	10 501 368	782 097	464 365	142 696

Σύμφωνα με τα δεδομένα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.13, η μέθοδος εισαγωγής αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον στο δωμάτιο είναι η πιο αποτελεσματική σε σχέση με τη μείωση της φυσικής ραδιενέργειας στο χώρο του μετρητή, διότι παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές τόσο στην περιοχή του ^{214}Bi , όσο και σε όλες τις άλλες περιοχές που μελετήθηκαν σε σχέση με τον φυσικό (μη εξαναγκασμένο) εξαερισμό. Για παράδειγμα, η εξαναγκασμένη εισαγωγή αέρα από το ύπαιθρο μειώνει κατά 11.5%, 3.6%, 73% και 4.5% τον αριθμό των παλμών στην φασματική περιοχή 1.69 – 1.84 MeV που σχετίζεται με το ^{214}Bi , στην περιοχή 1.37-1.55 MeV του ^{40}K , (συνεφέρει εκτός των άλλων και η ακτινοβολία-γ του ^{214}Bi ενέργειας, 1.38 MeV (4.1%), 1.385 MeV (0.8%), 1.40 MeV (1.4%), 1.41 MeV (2.5%), 1.51 MeV (2.2%) και 1.54 MeV (0.8%)) και στην περιοχή 0.598-0.744 MeV του ^{137}Cs (συμβάλλουν και η ακτινοβολία-γ του ^{214}Bi ενέργειας 0.61 MeV (4%), 0.665 MeV (7.6%) και ~0.71 MeV (0.9%)), αντίστοιχα.

Ο εξαερισμός με εξαναγκασμένη εξαγωγή αέρα από το δωμάτιο προς το ύπαιθρο ήταν η αμέσως καλύτερη λειτουργία. Αντίθετα, η ταυτόχρονη εισαγωγή και εξαγωγή αέρα αύξανε το σήμα υποστρώματος σε όλες τις περιπτώσεις.

Για κάθε μέθοδο αερισμού του δωματίου πραγματοποιήθηκαν με χρήση ομοιώματος που περιείχε απιονισμένο νερό δύο ομάδες των επτά μετρήσεων η κάθε μία, και καταγράφηκαν οι παλμοί στις τρεις ενεργειακές περιοχές. Ο Πίνακας 6.14 περιέχει τις τιμές των παλμών υποστρώματος (με κανονικοποίηση σε χρόνο μέτρησης 2000 s) σε διάφορες περιοχές του φάσματος. Και σε αυτή τη σειρά μετρήσεων ο μικρότερος αριθμός παλμών και στις τρεις περιοχές παρατηρήθηκε στην περίπτωση εξαναγκασμένης εισαγωγής αέρα από το ύπαιθρο και μάλιστα η μείωση την περιοχή 1.69 – 1.84 MeV που σχετίζεται με το ^{214}Bi σε σχέση με την μη εξαναγκασμένη κίνηση του αέρα ήταν ~20%, έναντι 18% που βρέθηκε στις μετρήσεις διάρκειας 12 h χωρίς ομοίωμα.

Πίνακας 6.14: Αποτελέσματα μετρήσεων σήματος υποστρώματος

Μέθοδος αερισμού	Παλμοί ⁴⁰ K (c)	Συντελεστής μεταβλητότητας	Παλμοί ¹³⁷ Cs (c)	Συντελεστής μεταβλητότητας	Παλμοί ²¹⁴ Bi (c)	Συντελεστής μεταβλητότητας
Χωρίς πρόσθετο αερισμό	19277±802	0.042	33002±2778	0.084	6602±697	0.106
Εισαγωγή αέρα	18957±233	0.012	33110± 977	0.030	6344±192	0.030
Εξαγωγή αέρα	17730±115	0.006	28638±320	0.011	5198±95	0.018
Εισαγωγή και εξαγωγή αέρα	17688±172	0.010	28278±174	0.006	5118±62	0.012
	18322±62	0.003	30270±115	0.004	5572±72	0.013
	18607±235	0.013	31581±802	0.025	5927±206	0.035
	18132±208	0.011	29498±1139	0.039	5624±269	0.048
	18163±263	0.014	30240±855	0.028	5539±235	0.042

Πίνακας 6.15: Αποτελέσματα μετρήσεων με ομοίωμα ομοιόμορφης κατανομής ⁴⁰K και ¹³⁷Cs

Μέθοδος αερισμού δωματίου	Καθαρός αριθμός παλμών ⁴⁰ K	Καθαρός αριθμός παλμών ¹³⁷ Cs
Χωρίς πρόσθετο αερισμό	8816±617 (7.0%)	28554±1107 (3.9%)
Εισαγωγή αέρα	9260±115 (1.2%)	29458±277 (0.94%)
Εξαγωγή αέρα	9393±405 (4.3%)	28283±849 (3.00%)
Εισαγωγή και εξαγωγή αέρα	9304±200 (2.1%)	29362±1370 (4.7%)

Ο Πίνακας 6.15 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο ομοίωμα No12 ύψους 177 cm και μάζας 68.3 kg (βλέπε Κεφάλαιο 3), στο οποίο υπάρχει πρακτικά ομοιόμορφη κατανομή ⁴⁰K και ¹³⁷Cs (συνολικά 4092 και 1062 Bq, αντίστοιχα). Συγκεκριμένα, καταγράφονται οι μέσες τιμές των καθαρών παλμών στο ομοίωμα σύμφωνα με τη μέθοδο που προτείνεται στο Κεφάλαιο 4 που προέκυψαν από επτά μετρήσεις, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας. Η θεωρητική τυπική απόκλιση για τις μετρήσεις ⁴⁰K και ¹³⁷Cs είναι 217 c και 307 παλμούς αντίστοιχα, έναντι 115 και 277 παλμούς που βρέθηκε πειραματικά στην περίπτωση εξαναγκασμένης εισαγωγής αέρα.

Ως εκ τούτου, η διερεύνηση των επιπέδων υποστρώματος που πραγματοποιήθηκε με μετρήσεις ομοιωμάτων υποστρώματος και ομοιωμάτων με ομοιόμορφη κατανομή

ραδιενεργού πηγής, έδειξε πως ο αερισμός του χώρου με την εισαγωγή αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον αποτελεί το βέλτιστο τρόπο αερισμού του δωματίου σε όρους μείωσης του της ακτινοβολίας υποστρώματος στο εσωτερικό του δωματίου του μετρητή.

Από τη μελέτη των δύο θεωρούμενων τεχνικών διόρθωσης προκύπτει ότι η εφαρμογή της εμπειρικής διόρθωσης με τη χρήση των σχέσεων 6.4 και 6.5 μείωσε το συντελεστή μεταβλητότητας για το ^{40}K στο ομοίωμα #1 κατά 2.6 φορές, στο 1.7 % από 4.5 %. Ο συντελεστής μεταβλητότητας για το ^{137}Cs στο ομοίωμα #3 μειώθηκε κατά 3.4 φορές, στο 2.4% από 8.2 %. Από την άλλη πλευρά, η εφαρμογή της εξαναγκασμένης εισαγωγής αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον μείωσε το συντελεστή μεταβλητότητας για το ^{40}K κατά 5.8 φορές, στο 1.2% από 7.0%. Ο συντελεστής μεταβλητότητας για το ^{137}Cs μειώθηκε κατά 3.6 φορές, στο 0.94% από 3.9%. Παρατηρείται ότι σε κάθε περίπτωση η μείωση του συντελεστή μεταβλητότητας καθώς και η τιμή της επαναληπτικότητας που επιτυγχάνονται με τη χρήση του εξαερισμού του δωματίου είναι καλύτερες σε σχέση με την εφαρμογή της εμπειρικής διόρθωσης. Παρόλα αυτά, η διόρθωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική τεχνική βελτίωσης της επαναληπτικότητας σε περίπτωση βλάβης του συστήματος εξαερισμού και κατά τις *in vivo* μετρήσεις καλίου για τη διόρθωση των παλμών καλίου εξαιτίας της ύπαρξης ^{214}Bi στο ανθρώπινο σώμα.

6.5.3 Ελάχιστη Ανιχνεύσιμη Ενεργότητα (MDA)

Βασικό μέγεθος για το χαρακτηρισμό της ποιότητας των μετρήσεων με τη χρήση της τεχνικής της γ -φασματοσκοπίας είναι η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ενεργότητα. Το μέγεθος αυτό ορίζεται ως η ποσότητα ενός ραδιονουκλιδίου στο σώμα που θα ανιχνευθεί με πιθανότητα 95%, έναντι 5% πιθανότητας να προκύψει σφάλμα Τύπου I (ψευδώς θετικό αποτέλεσμα). Η πιθανότητα σφάλματος Τύπου II (ψευδώς αρνητικό αποτέλεσμα) είναι επίσης 5% [Currie 1968]. Στην παρούσα μελέτη υιοθετήθηκε η μαθηματική σχέση για τον υπολογισμό της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ενεργότητας που προτείνεται από τον Brodsky [1986] και παρουσιάζεται από τον Toohey και συν. [1991]:

$$\text{MDA}=4.65 \sigma_{\beta} f \quad (6.6)$$

όπου σ_{β} συμβολίζει την τυπική απόκλιση της μέτρησης του ομοιώματος υποστρώματος και f ο συντελεστής βαθμονόμησης της απόδοσης του συστήματος για συγκεκριμένο ραδιονουκλίδιο.

Ο υπολογισμός του MDA πραγματοποιήθηκε με υπολογισμό της τυπικής απόκλισης βάση της στατιστικής Poisson και από την τυπική απόκλιση που προέκυψε από σειρά δέκα μετρήσεων σε ομοίωμα υποστρώματος σε συνθήκες λειτουργίας του συστήματος αερισμού του χώρου με εισαγωγή αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον (Πίνακας 6.16). Για την μετατροπή του ρυθμού παλμών σε ενεργότητα ραδιονουκλιδίου χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές ανιχνευτικής απόδοσης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.7 για τις αντίστοιχες ενέργειες.

Πίνακας 6.16: MDA για διάρκεια μέτρησης (Live Time) 2000 s (μετρήσεις σε ομοιώματα κατά τη διάρκεια ενός μήνα-12/2011)

Ισότοπο	Ενέργεια (keV)	Ενεργειακό παράθυρο (keV)	Απόδοση εκπομπής	Ενεργειακή απόδοση	Τυπική απόκλιση ρυθμού παλμών Poisson (cps)	Τυπική απόκλιση ρυθμού παλμών από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις (cps)	MDA Poisson (Bq)	MDA Επαναλαμβανόμενες μετρήσεις (Bq)
^{214}Bi	1764	1690-1840	0.159	0.001170	0.036	0.056	90	140
^{40}K	1460	1372-1547	0.107	0.009915	0.070	0.1317	307	577
^{137}Cs	662	613-715	0.851	0.013899	0.076	0.3611	30	142
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	140.5	118-162	0.877	0.025790	0.113	0.3948	23	81

6.6 Συμπεράσματα

Ο προσδιορισμός της επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων από προκαταρκτικές *in vivo* μετρήσεις κατέδειξε μη αξιόπιστη λειτουργία, γεγονός που αποδόθηκε σε συνδυασμό με την παλαιότητα του εξοπλισμού και την γενικευμένη λειτουργική αστάθεια του συστήματος, σε πρόβλημα σχετιζόμενο με τα πυρηνικά ηλεκτρονικά. Μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε ομοιώματα με ^{40}K και ^{137}Cs επιβεβαίωσαν την εικόνα προβληματικής αξιοπιστίας στο όργανο.

Μελετήθηκε η επίδραση της ακτινοβολίας υποστρώματος στις μετρήσεις ^{40}K και ^{137}Cs με χρήση της κορυφής των 1764 keV του θυγατρικού προϊόντος που παρουσιάζεται στην αλυσίδα διάσπασης του φυσικού ισότοπου ^{238}U , ^{214}Bi . Βρέθηκε ισχυρή συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού παλμών στην περιοχή του ^{40}K και ^{137}Cs με τον ρυθμό παλμών στην περιοχή του ^{214}Bi .

Για τη διόρθωση της επίδρασης του ^{214}Bi αναπτύχθηκε μέθοδος διόρθωσης μετά τη λήψη της μέτρησης, η εφαρμογή της οποίας είχε ως αποτέλεσμα τη βελτίωση του συντελεστή μεταβλητότητας κατά 3.5 φορές στην περιοχή του ^{40}K . Επίσης εγκαταστάθηκε σύστημα εξαναγκασμένου αερισμού στο χώρο του μετρητή (βλέπε παράγραφο 2.26) και διερευνήθηκε η επίδραση του τρόπου αερισμού του χώρου ως προς τα επίπεδα υποστρώματος. Βρέθηκε πως η μέθοδος εισαγωγής αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον βελτιώνει πιο αποτελεσματικά τις συνθήκες μέτρησης στο δωμάτιο του ΜΟΑ.

Κεφάλαιο 7

Προσομοίωση με τη χρήση υπολογιστικού κώδικα

7.1 Εισαγωγή

Η ποσοτικοποίηση των ραδιονουκλιδίων που ανιχνεύονται με τη χρήση συστημάτων γ-φασματοσκοπίας προϋποθέτει βαθμονόμηση της ανιχνευτικής ικανότητας του συστήματος (η απόδοση ανίχνευσης ορίζεται στο Κεφάλαιο 1). Βαθμονόμηση μπορεί να προκύψει κατά την μέτρηση πρότυπων πειραματικών πηγών με γνωστή συγκέντρωση ραδιονουκλιδίου σε συνθήκες παρόμοιες με εκείνες που χρησιμοποιούνται κατά τη μέτρηση του άγνωστου δείγματος. Κατά το στάδιο της βαθμονόμησης είναι σημαντική η επίτευξη κατάλληλης γεωμετρίας μέτρησης συμπεριλαμβανομένης και της χρήσης πηγής αναφοράς με σχήμα και κατανομή ραδιονουκλιδίου παρόμοιας με εκείνη του άγνωστου δείγματος.

Εναλλακτικά της χρήσης πρότυπων πηγών, η βαθμονόμηση μπορεί να γίνει με υπολογιστικά μοντέλα προσομοίωσης του μετρητικού συστήματος με χρήση κωδίκων Monte Carlo, όπως π.χ. ο MCNP, FLUKA, GEANT4 κ.α. Η εφαρμογή τεχνικών βαθμονόμησης με αυτή τη μέθοδο παρουσιάζει σημαντική ευελιξία ιδιαίτερα όταν οι γεωμετρίες παρουσιάζουν περίπλοκη δομή και είναι δύσκολη η κατασκευή πρότυπων πηγών [Ishikawa και συν. 1996, Beewley και συν. 1988] .

Αναπτύχθηκε υπολογιστικό μοντέλο για την προσομοίωση του MOA. Το μοντέλο βασίστηκε στην μορφή που έλαβε η διάταξη μετά το πέρας της κατασκευής της και των διορθωτικών ενεργειών που ακολούθησαν. Επιπρόσθετα αναπτύχθηκε μεθοδολογία με στόχο τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων που σχετίζονται με τις διαστάσεις των ανιχνευτών που εισήχθησαν στον κώδικα ως πληροφορίες εισόδου. Διενεργήθηκε έλεγχος με σκοπό τον προσδιορισμό της ακρίβειας των υπολογισμών του κώδικα σε σχέση με τα αποτελέσματα μετρήσεων σε ανθρωπόμορφα ομοιώματα.

7.2 Χαρακτηριστικά μοντέλου

Η μαθηματική περιγραφή του MOA έγινε με τη χρήση του κώδικα Monte Carlo, MCNP Version 5 [X-5 Monte Carlo Team 2005]. Ο κώδικας MCNP χρησιμοποιείται για την προσομοίωση φαινομένων μεταφοράς νετρονίων για ενέργειες από 10^{-11} MeV έως 20 MeV, φωτονίων από 1 keV έως 100 GeV, ηλεκτρονίων από 1 keV έως 1 GeV σε διάφορους συνδυασμούς.

Η περιγραφή των γεωμετρικών δομών γίνεται χρήση τρισδιάστατου μοναδιαίου συστήματος αναφοράς. Οι πιθανότητα των αλληλεπιδράσεων περιγράφεται από σημειακές ενεργές διατομές οι οποίες περιέχονται σε βιβλιοθήκες πυρηνικών και ατομικών δεδομένων για περιοχές συνεχών ενεργειών. Οι κυριότερες πηγές πυρηνικών δεδομένων είναι οι βιβλιοθήκες ENDF, ACTI, ENDL, EPDL, ACTL.

Κατά τις αλληλεπιδράσεις φωτονίων ο κώδικας λαμβάνει υπόψη φαινόμενα όπως ελαστικές και ανελαστικές σκεδάσεις, φαινόμενα φθορισμού μετά από φωτοηλεκτρική απορρόφηση, καθώς και την απορρόφηση μετά από παραγωγή ζευγών ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων. Οι διαδικασίες μεταφοράς ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων περιλαμβάνουν φαινόμενα γωνιακής εκτροπής της τροχιάς των σωματιδίων λόγω πολλαπλών σκεδάσεων Compton, την παραγωγή δευτερευόντων σωματιδίων, όπως ακτίνες -X και ηλεκτρόνια Auger, ακτινοβολία πέδησης (bremsstrahlung) και ακτινοβολία εξαύλωσης. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν αλληλεπιδράσεις, στις οποίες συμμετέχουν φωτόνια και ηλεκτρόνια (mode p:e).

Οι πληροφορίες που περιγράφουν τον MOA δηλώνονται με καθορισμένο τρόπο σε ένα αρχείο εισόδου που διαβάζεται από τον κώδικα και αφορούν τα εξής πεδία: 1) την γεωμετρία, 2) τα υλικά, 3) την πηγή ακτινοβολιών, 4) την καταγραφή των φαινόμενων και 5) τις τεχνικές περιορισμού των διακυμάνσεων των καταγραφόμενων τιμών. Η μέθοδος μοντελοποίησης συστημάτων αναφέρεται λεπτομερώς στο εγχειρίδιο χρήσης του κώδικα.

7.2.1 Γεωμετρία και υλικά

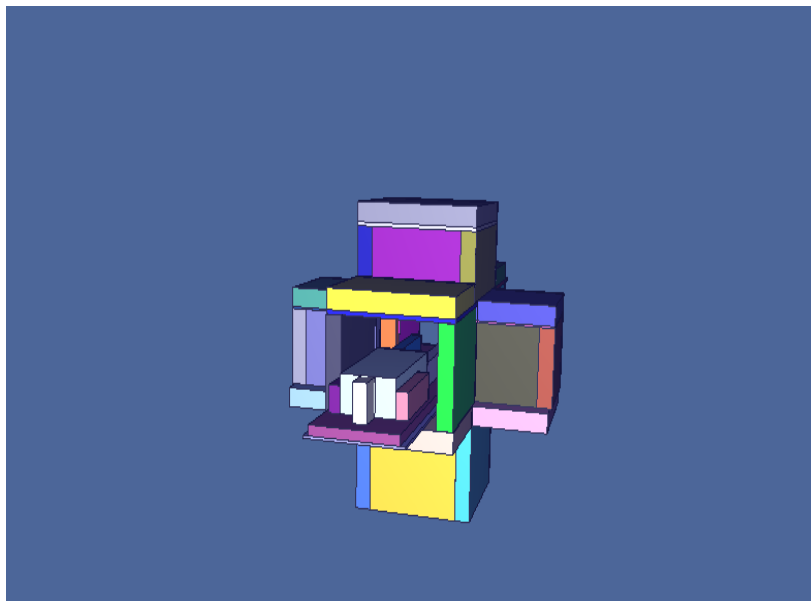
Για την ανάπτυξη του υπολογιστικού μοντέλου, αναγνωρίστηκαν και προσομοιώθηκαν τα σημαντικότερα δομικά στοιχεία του συστήματος. Ως τέτοια θεωρήθηκαν η θωράκιση του συστήματος η κατασκευή στήριξης, η εξεταστική κλίνη και οι ανιχνευτές. Αναπτύχθηκαν επίσης μαθηματικά μοντέλα για τα φυσικά ομοιώματα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3 και για ανθρωποειδή ομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση της ανιχνευτικής ικανότητας του συστήματος.

Η ανάπτυξη του μοντέλου της θωράκισης του MOA βασίστηκε στα μηχανολογικά σχέδια του Σουψανά [2004] κατά τη διάρκεια της κατασκευής του μετρητή, καθώς επίσης και σε μετρήσεις που έγιναν κατά την ανάπτυξη του παρόντος μοντέλου. Στοιχεία για τις διαστάσεις, τη γεωμετρία και τον προσδιορισμό της θέσης των τμημάτων που δομούν τη θωράκιση δίνονται στο Κεφάλαιο 2.

Η περιγραφή των δομών στο αρχείο εισόδου του κώδικα, της βάσης στήριξης και των επιμέρους τμημάτων της θωράκισης έγινε με τη χρήση γεωμετρικών αντικειμένων σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου. Οι επιφάνειες του μετρητή που καλύπτονται από μολύβδινα τούβλα θεωρήθηκαν ως ενιαία γεωμετρικά αντικείμενα χωρίς να ληφθούν υπόψη πιθανά σημεία ασυνέχειας στη θωράκιση.

Η εξεταστική κλίνη προσομοιώθηκε σύμφωνα με το μηχανολογικό σχέδιο που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 2, ενώ το υλικό που δηλώθηκε για την κύρια κατασκευή ήταν Al με πυκνότητα 2.70 g/cm^3 . Για την προσομοίωση του υλικού του στρώματος χρησιμοποιήθηκε η εξής κατά βάρος αναλογία στοιχείων: H: 4.1%, C: 54.4 %, N: 12.1, O: 29.4 %. Η πυκνότητα που δηλώθηκε προσδιοριστικέ με μέτρηση του όγκου και της μάζας του αντικειμένου και βρέθηκε ίση με 0.0775 g/cm^3 .

Οι ανιχνευτές και τα φυσικά ομοιώματα προσομοιώθηκαν σύμφωνα με τις υπολογισμούς και τις παραδοχές που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη και παρουσιάζονται στα Κεφάλαια 2 και 3 αντίστοιχα.

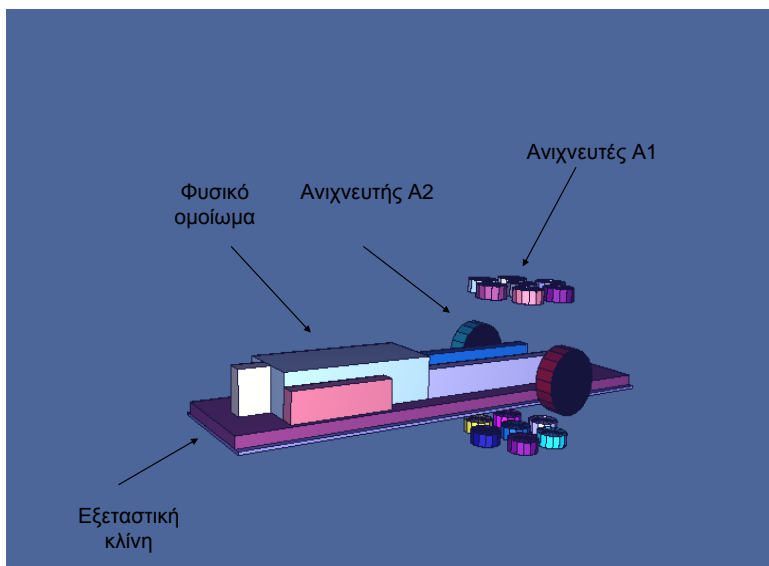


Σχήμα 7.1: Τρισδιάστατη απεικόνιση της θωράκισης (MCNP Visual Editor Version 19L)

Η διαδικασία της σάρωσης του ομοιώματος που λαμβάνει χώρα προσομοιώθηκε με εκτέλεση του μοντέλου για δεκαπέντε θέσεις, όπου μεταβαλλόταν η σχετική απόσταση του ομοιώματος και της κλίνης από το κέντρο της διάταξης [Kramer 2002, Τζίμα 2004]. Η προσομοίωση της μέτρησης κάθε ομοιώματος πραγματοποιήθηκε με υπολογισμό της απόδοσης σε δεκαπέντε θέσεις σάρωσης μεταξύ των θέσεων -100 cm και 100 cm. Κάθε θέση αντιστοιχεί στην απόσταση κατά τον άξονα σάρωσης του ομοιώματος (Άξονας-χ) μεταξύ του κέντρου των ανιχνευτών και ενός σημείου της εξεταστικής κλίνης το οποίο απέχει απόσταση 40 cm από το σημείο τοποθέτησης της κορυφής της κεφαλής του ομοιώματος, το οποίο είναι το ίδιο για όλα τα ομοιώματα. Ειδικότερα, υπολογίστηκαν οι αποδόσεις στις θέσεις 0 cm, 10 cm, 25cm, 40 cm, 55 cm, 70 cm, 85 cm, 100 cm και στις συμμετρικές τους ως προς το κέντρο της διάταξης των ανιχνευτών που αντιστοιχεί στη θέση 0 cm. Η απόδοση της σάρωσης του ομοιώματος μήκους 200 cm υπολογίστηκε από τη μέση τιμή της απόδοσης που προκύπτει από δεκαπέντε επιμέρους θέσεις ή από το εμβαδόν της μαθηματικής περιοχής που περικλείεται από την καμπύλη του περιγράφει τη σχέση της απόδοσης με τη σχετική θέση του ομοιώματος με τη χρήση ολοκληρωμάτων Riemann.

7.2.2 Καταγραφή και αρχείο εξόδου

Η καταγραφή των πληροφοριών από τις προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του καταγραφέα του κώδικα F8, ο οποίος παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ενεργειακή κατανομή των παλμών που δημιουργούνται στον ανιχνευτή κατά την αλληλεπίδραση με την ακτινοβολία. Η καταγραφή έγινε για 256 διαφορετικές ενεργειακές θέσεις (energy bins). Για την προσομοίωση του φαινομένου της παρατηρούμενης διαπλάτυνσης του φάσματος χρησιμοποιήθηκε η ρουτίνα GEB, η οποία δηλώθηκε σύμφωνα με τα στοιχεία που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις του FWHM που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 5.



Σχήμα 7.2: Τρισδιάστατη απεικόνιση της εξεταστικής κλίνης, του φυσικού ομοιώματος και των ανιχνευτών (MCNP Visual Editor Version 19L)

Το αρχείο εξόδου της προσομοίωσης παρουσιάζει την τιμή του ύψους παλμού που καταγράφεται σε καθεμιά από τις 256 ενεργειακές θέσεις κάθε ανιχνευτή συνοδευμένη από σχετικό σφάλμα αξιοπιστίας. Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων κάθε κώδικα χρησιμοποιήθηκε διαδικασία παρόμοια με αυτή που εφαρμόζεται κατά την ανάλυση των πειραματικών φασμάτων όπου πραγματοποιείται άθροιση των παλμών που περιέχονται στο ενεργειακό παράθυρο της περιοχής ενδιαφέροντος. Στην περίπτωση των αποτελεσμάτων του κώδικα, το άθροισμα των παλμών σε κάθε ανιχνευτή συνοδεύεται από σφάλμα, το οποίο θεωρήθηκε ότι ισούται με την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων για κάθε ενεργειακή θέση καταγραφής (bin). Στην περίπτωση προσδιορισμού του συνολικού αριθμού παλμών από όλους τους ανιχνευτές, το σφάλμα ορίστηκε ως το άθροισμα των επιμέρους σφαλμάτων του αθροίσματος παλμών σε κάθε ανιχνευτή.

7.3 Έλεγχος ακρίβειας μοντέλου

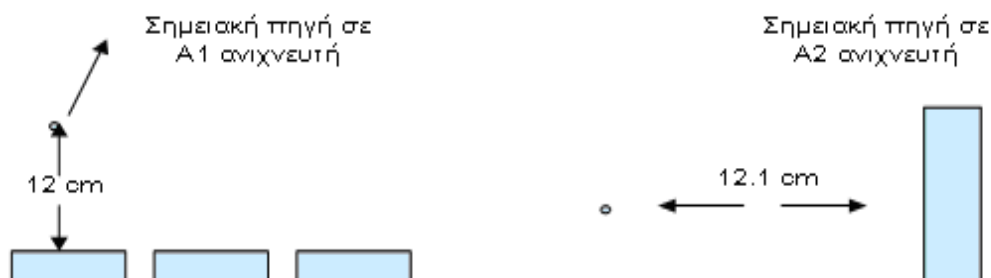
Οι προβλέψεις του υπολογιστικού μοντέλου του μετρητή ελέγχθηκαν έναντι πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από μετρήσεις σε πειραματικές πηγές βαθμονόμησης και ανθρωποειδή ομοιώματα.

7.3.1 Έλεγχος διαστάσεων ανιχνευτών

Με σκοπό τον έλεγχο του υπολογιστικού μοντέλου των ανιχνευτών, πραγματοποιήθηκε σύγκριση της πειραματικής απόδοσης με την απόδοση που υπολογίζεται με τη χρήση του μοντέλου. Προς τούτο μετρήθηκαν πηγές ακτινοβολίας γνωστής ενεργότητας. Χρησιμοποιήθηκαν δύο πειραματικές σημειακές πηγές βαθμονόμησης ^{152}Eu , ^{137}Cs και μια χωρική πηγή ^{40}K .

Η σημειακή πηγή ^{152}Eu παραγωγής της εταιρίας Amersham είχε ονομαστική ενεργότητα 38.5 kBq ($\pm 8.7\%$) κατά την ημερομηνία αναφοράς 1-9-1989, άρα 13.074 kBq κατά την ημερομηνία μέτρησης 23-5-2010, διότι έχει χρόνο ημιζωής 13.3 y. Η σημειακή πηγή ^{137}Cs επίσης κατασκευής Amersham, είχε ονομαστική ενεργότητα 42.772 kBq ($\pm 6.0\%$) κατά την ημερομηνία αναφοράς 1-1-1982 (το ^{137}Cs έχει χρόνο ημιζωής 30.17 y). Επίσης χρησιμοποιήθηκε ποσότητα ~ 1.0 kg ξηρού άλατος KCl, παρασκευής της εταιρίας FLUKA, το οποίο ήταν συσκευασμένο σε πλαστικό δοχείο διαστάσεων 10.5 cm (πλάτος) x 10.5 cm (μήκος) x 9.5 cm (ύψος). Η πυκνότητα του άλατος υπολογίστηκε ίση προς 0.95476 g/cm³ (γεωμετρική πυκνότητα). Για τον προσδιορισμό της ποσότητας K στο άλας χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3. Βρέθηκε πως η ενεργότητα της πηγής ^{40}K στην συσκευασία KCl είναι ίση με 16.26 kBq.

Οι μετρήσεις έγιναν με κεντρική τοποθέτηση κάθε πηγής σε απόσταση 12.0 cm από το πρόσθιο παράθυρο κάθε ανιχνευτή τύπου A1 και σε απόσταση 12.1 cm από το πρόσθιο παράθυρο των ανιχνευτών A2. Το Σχήμα 7.1 απεικονίζει την θέση τοποθέτησης της πηγής ως προς τον ανιχνευτή. Η μέτρηση της χωρικής πηγής ^{40}K έγινε με της πηγής σε κεντρικό σημείο της διάταξης, επάνω στον κεντρικό ανιχνευτή της κάτω ομάδας ανιχνευτών A1. Σε αυτή την περίπτωση έγινε ταυτόχρονη λήψη φάσματος από όλους τους ανιχνευτές. Για κάθε κύρια μέτρηση έγινε μέτρηση της ακτινοβολίας υποστρώματος.



Σχήμα 7.3: Τοποθέτηση της πηγής αναφοράς για τον προσδιορισμό της πειραματικής απόδοσης

Από τη διαδικασία των μετρήσεων προέκυψαν τρία φάσματα για κάθε ανιχνευτή. Στα φάσματα ^{152}Eu έγινε εντοπισμός της κορυφής με ενέργεια 121.8 keV και πραγματοποιήθηκε άθροιση των παλμών στο ενεργειακό παράθυρο 100 keV έως 143 keV. Στα φάσματα που προέκυψαν από τη μέτρηση των δύο άλλων πηγών αθροίστηκαν οι παλμοί στις ενεργειακές περιοχές 574 keV έως 749 keV γύρω από την κορυφή των 662 keV για το ^{137}Cs και στην περιοχή 1336 keV έως 1584 keV γύρω από την ενέργεια 1460 keV για την πηγή ^{40}K . Η διαδικασία προσομοιώθηκε με τη χρήση του υπολογιστικού μοντέλου. Στην περίπτωση της πηγής ^{152}Eu , έγινε για κάθε ανιχνευτή μια επιπλέον προσομοίωση για τον προσδιορισμό της συνεισφοράς στο ενεργειακό παράθυρο 100 keV έως 143 keV από τα σκεδαζόμενα φωτόνια υψηλότερων ενεργειών.

Ο Πίνακας 7.1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για την απόδοση ανίχνευσης φωτονίων ενέργειας 1.46 MeV που εκπέμπονται από την πηγή ^{40}K . Η 2^η και 4^η στήλη του πίνακα παρουσιάζουν τις τιμές της απόδοσης που προέκυψαν για τους ανιχνευτές τύπου A1 (#1-#14) και A2 (#15 και #16) από το υπολογιστικό μοντέλο και τις πειραματικές μετρήσεις αντίστοιχα. Η 3^η και 5^η στήλη παρουσιάζουν τα σφάλματα

των τιμών απόδοσης. Σύμφωνα με ότι αναφέρθηκε στην περιγραφή του αρχείου εξόδου του κώδικα, η καταγραφή των αποτελεσμάτων συνοδεύεται από τιμή του συνολικού σφάλματος που σχετίζεται με τον αριθμό ιστοριών σωματιδίων που έχουν προσομοιωθεί από τον κώδικα. Η πειραματική απόδοση που παρουσιάζεται στην 4^η στήλη του Πίνακα 7.1 υπολογίστηκε από την σχέση:

$$\text{απόδοση} = \frac{R_s - R_{Bg}}{R_{K/KCl} \times M_{KCl} \times A_{40K} \times f} \quad (7.1)$$

όπου R_s και R_{Bg} είναι ο ρυθμός παλμών στο ενεργειακό παράθυρο του ^{40}K που μετρήθηκε στο δείγμα και στο υπόστρωμα σε cps, $R_{K/KCl}$ η αναλογία μάζας καλίου ανά μονάδα μάζας ξηρού άλατος KCl, M_{KCl} η μάζα ξηρού άλατος που χρησιμοποιήθηκε, 1000 (± 50) g, A_{40K} η ενεργότητα ^{40}K ανά g καλίου ίση προς 31.00(± 0.33) Bq [IAEA, 1989] και f η πιθανότητα 10.67% εκπομπής φωτονίων 1.46 MeV ανά Bq ^{40}K [IAEA, 1989]. Το σφάλμα της πειραματικής απόδοσης υπολογίστηκε με χρήση του κανόνα διάδοσης σφαλμάτων. Το σφάλμα του αριθμητή υπολογίστηκε με την παραδοχή ότι οι μετρήσεις υπόκεινται στην στατιστική Poisson.

Πίνακας 7.1: Υπολογιζόμενη απόδοση ανίχνευσης φωτονίων ενέργειας 1.46 MeV

Αριθμός ανιχνευτή	Απόδοση MCNP	Στατιστικό Σφάλμα	Πειραματική απόδοση	Ολικό Σφάλμα	Διαφορά αποδόσεων	Σφάλμα Διαφοράς
1	7.47E-04	5.73E-06	7.69E-04	5.3E-05	-2.16E-05	5.37E-05
2	6.48E-04	5.33E-06	6.49E-04	4.8E-05	-1.39E-06	4.81E-05
3	6.55E-04	5.37E-06	7.01E-04	5.0E-05	-4.52E-05	5.01E-05
4	6.67E-04	5.41E-06	6.66E-04	5.0E-05	4.87E-07	4.98E-05
5	6.06E-04	5.16E-06	6.43E-04	4.8E-05	-3.72E-05	4.79E-05
6	6.87E-04	5.49E-06	6.71E-04	4.7E-05	1.60E-05	4.75E-05
7	6.00E-04	5.13E-06	6.46E-04	4.8E-05	-4.63E-05	4.82E-05
8	3.45E-02	3.89E-05	2.80E-02	1.5E-03	6.54E-03	1.46E-03
9	4.07E-03	1.34E-05	4.19E-03	2.2E-04	-1.26E-04	2.22E-04
10	4.12E-03	1.35E-05	4.35E-03	2.3E-04	-2.33E-04	2.32E-04
11	3.71E-03	1.28E-05	3.85E-03	2.1E-04	-1.47E-04	2.06E-04
12	3.69E-03	1.27E-05	3.79E-03	2.0E-04	-1.02E-04	2.03E-04
13	4.08E-03	1.34E-05	4.01E-03	2.1E-04	7.16E-05	2.13E-04
14	3.98E-03	1.32E-05	4.17E-03	2.2E-04	-1.87E-04	2.22E-04
15	8.92E-03	1.98E-05	7.32E-03	3.8E-04	1.59E-03	3.84E-04
16	9.08E-03	2.00E-05	7.78E-03	4.1E-04	1.30E-03	4.07E-04

Σύγκριση με t-test ανά ζεύγη των αποδόσεων ανίχνευσης φωτονίων ενέργειας 1.46 MeV των δεκατεσσάρων ανιχνευτών τύπου A1 (#1 ως και #14) δεν ανέδειξε

στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δυο τρόπων εκτίμησης της απόδοσής τους ($p < 0.21$). Αντίθετα, οι πειραματικές τιμές ανιχνευτικής απόδοσης των δυο ανιχνευτών τύπου A2 (#15 και #16) ήταν μικρότερες της θεωρητικής, κατά 16% περίπου.

Η σύγκριση της τιμής της διαφοράς μεταξύ υπολογιστικής και πειραματικής απόδοσης (6^η στήλη) με την αντίστοιχη τιμή σφάλματος (7^η στήλη) φανερώνει στατιστικά σημαντική διαφορά στις περιπτώσεις των ανιχνευτών #8, #10, #15 και #16. Τα αποτελέσματα που αφορούν τον ανιχνευτή #8 δεν είναι αξιόπιστα, δεδομένου ότι για τις ανάγκες διεξαγωγής της μέτρησης, το δοχείο που περιείχε την πηγή τοποθετήθηκε επάνω στον εν λόγω ανιχνευτή, γεγονός που εισάγει σημαντικά σφάλματα. Η διαφορά που καταγράφεται στον ανιχνευτή #10 είναι παρόμοια με στατιστικό σφάλμα και δεν λαμβάνεται υπόψη. Αντίθετα, οι τιμές της απόδοσης που υπολογίζονται για τους ανιχνευτές #15 και #16 είναι κατά 22% και 17 % μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες πειραματικές.

Ο Πίνακας 7.2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για την απόδοση ανίχνευσης φωτονίων ενέργειας 662 keV που εκπέμπονται από την πηγή ¹³⁷Cs. Το σφάλμα της πειραματικής απόδοσης υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη μόνο το σφάλμα της ενεργότητας που αναφέρεται στο πιστοποιητικό της πηγής, δεδομένου ότι το τυχαίο σφάλμα βάση στατιστικής Poisson ήταν μικρότερο του 0.5 %.

Πίνακας 7.2: Υπολογιζόμενη απόδοση ανίχνευσης φωτονίων ενέργειας 662 keV

Αριθμός Ανιχνευτή	Απόδοση MCNP	Σφάλμα	Πειραματική Απόδοση	Σφάλμα (πηγής)	Διαφορά Αποδόσεων	Σφάλμα Διαφοράς
1	2.50E-02	4.63E-05	2.63E-02	1.58E-03	-1.33E-03	1.58E-03
2	2.44E-02	4.55E-05	2.63E-02	1.58E-03	-1.85E-03	1.58E-03
3	2.50E-02	4.56E-05	2.69E-02	1.62E-03	-1.86E-03	1.62E-03
4	2.49E-02	4.55E-05	2.64E-02	1.59E-03	-1.44E-03	1.59E-03
5	2.35E-02	4.40E-05	2.63E-02	1.58E-03	-2.74E-03	1.58E-03
6	2.51E-02	4.57E-05	2.75E-02	1.65E-03	-2.38E-03	1.65E-03
7	2.42E-02	4.47E-05	2.66E-02	1.60E-03	-2.36E-03	1.60E-03
8	2.52E-02	4.61E-05	2.65E-02	1.59E-03	-1.33E-03	1.59E-03
9	2.51E-02	4.53E-05	2.69E-02	1.62E-03	-1.77E-03	1.62E-03
10	2.52E-02	4.52E-05	2.65E-02	1.60E-03	-1.39E-03	1.60E-03
11	2.48E-02	4.50E-05	2.64E-02	1.59E-03	-1.54E-03	1.59E-03
12	2.47E-02	4.46E-05	2.59E-02	1.56E-03	-1.16E-03	1.56E-03
13	2.50E-02	4.48E-05	2.63E-02	1.58E-03	-1.27E-03	1.58E-03
14	2.51E-02	4.50E-05	2.69E-02	1.62E-03	-1.81E-03	1.62E-03
15	9.18E-02	8.69E-05	8.10E-02	4.86E-03	1.08E-02	4.86E-03
16	9.25E-02	8.70E-05	8.42E-02	5.05E-03	8.30E-03	5.05E-03

Στην περίπτωση της πηγής ^{137}Cs , η σύγκριση της τιμής της διαφοράς μεταξύ υπολογιστικής και πειραματικής απόδοσης (6^η στήλη) με την αντίστοιχη τιμή σφάλματος (7^η στήλη) φανερώνει διαφορά ίση τουλάχιστον με 1.5 φορά το μέγεθος του σφάλματος μόνο στους δυο ανιχνευτές τύπου A2 (#15 και #16). Η μέση τιμή πειραματική απόδοση ανίχνευσης φωτονίων ενέργειας 662 keV των δεκατεσσάρων ανιχνευτών τύπου A1 (#1 ως κι #14) με συνθήκες ίδιας γεωμετρίας βρέθηκε ίση με 2.655%, με συντελεστή μεταβλητότητας 1.5%. Επιπλέον σύγκριση με t-test ανά ζεύγη των αποδόσεων των ανιχνευτών τύπου A1 (#1 ως κι #14) ανίχνευσης φωτονίων ενέργειας 662 keV έδειξε στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δυο τρόπων εκτίμησης της απόδοσης ($p < 0.001$) και μάλιστα η πειραματική απόδοση ήταν κατά μέσο όρο μεγαλύτερη από την θεωρητικά προβλεπόμενη κατά $7.1\% \pm 2.1\%$. σημειώνεται όμως ότι το σφάλμα βαθμονόμησης της σημειακής πηγής είναι $\pm 6.0\%$. Αντίθετα, στην περίπτωση των δυο ανιχνευτών τύπου A2 οι πειραματικές τιμές ανιχνευτικής απόδοσης ήταν μικρότερες των θεωρητικών κατά $\sim 10\%$.

Ο Πίνακας 7.3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για την απόδοση ανίχνευσης των φωτονίων ενέργειας 122 keV, που εκπέμπονται από την πηγή ^{152}Eu . Στον προσδιορισμό της απόδοσης με τη χρήση του μοντέλου και από τις πειραματικές μετρήσεις λήφθηκε υπόψη η συνεισφορά των φωτονίων από τις υψηλότερες ενέργειες εκπομπής του ^{152}Eu .

Πίνακας 7.3: Υπολογιζόμενη απόδοση ανίχνευσης φωτονίων ενέργειας 122 keV

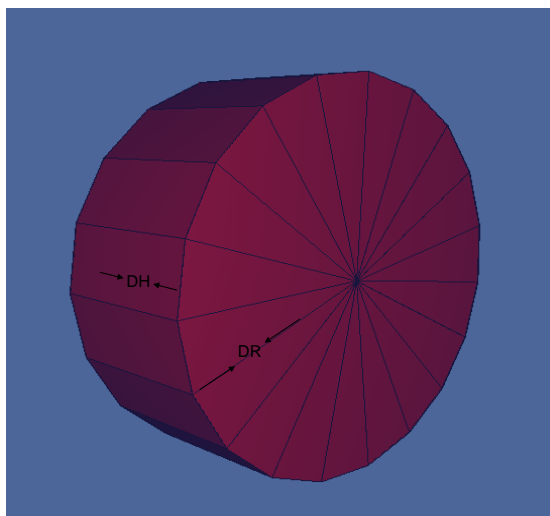
Αριθμός Ανιχνευτή	Απόδοση MCNP	Στατιστικό Σφάλμα	Πειραματική Απόδοση	Ολικό Σφάλμα	Διαφορά Αποδόσεων	Σφάλμα Διαφοράς
1	5.29E-02	2.17E-04	5.53E-02	4.82E-03	-2.40E-03	4.83E-03
2	5.01E-02	2.11E-04	5.35E-02	4.66E-03	-3.35E-03	4.67E-03
3	5.23E-02	2.13E-04	5.61E-02	4.89E-03	-3.75E-03	4.89E-03
4	5.00E-02	2.08E-04	5.34E-02	4.66E-03	-3.37E-03	4.66E-03
5	4.94E-02	2.07E-04	5.21E-02	4.54E-03	-2.65E-03	4.55E-03
6	5.44E-02	2.16E-04	5.67E-02	4.94E-03	-2.25E-03	4.95E-03
7	5.14E-02	2.10E-04	5.41E-02	4.72E-03	-2.71E-03	4.73E-03
8	5.48E-02	2.18E-04	5.62E-02	4.90E-03	-1.32E-03	4.90E-03
9	5.48E-02	2.13E-04	5.76E-02	5.02E-03	-2.83E-03	5.02E-03
10	5.59E-02	2.15E-04	5.69E-02	4.96E-03	-1.07E-03	4.97E-03
11	5.23E-02	2.09E-04	5.51E-02	4.81E-03	-2.88E-03	4.81E-03
12	5.09E-02	2.07E-04	5.31E-02	4.63E-03	-2.18E-03	4.63E-03
13	5.25E-02	2.09E-04	5.54E-02	4.83E-03	-2.90E-03	4.84E-03
<u>14</u>	<u>5.36E-02</u>	<u>2.11E-04</u>	<u>5.58E-02</u>	<u>4.86E-03</u>	<u>-2.18E-03</u>	<u>4.87E-03</u>
15	1.18E-01	3.10E-04	9.97E-02	8.68E-03	1.80E-02	8.69E-03
16	1.26E-01	3.19E-04	1.05E-01	9.11E-03	2.16E-02	9.12E-03

Για την πηγή ^{152}Eu , η σύγκριση της τιμής της διαφοράς μεταξύ υπολογιστικής και πειραματικής απόδοσης (6^η στήλη) με την αντίστοιχη τιμή σφάλματος (7^η στήλη) φανερώνει στατιστικά σημαντική διαφορά για τους, #15 και #16. Οι τιμές της απόδοσης που υπολογίζονται για τους ανιχνευτές #15 και #16 είναι κατά 18% και 20% μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες πειραματικές.

Η μέση πειραματική τιμή απόδοσης ανίχνευσης φωτονίων ενέργειας 122 keV των δεκατεσσάρων ανιχνευτών τύπου A1 (#1 ως κι #14) με συνθήκες ίδιας γεωμετρίας βρέθηκε ίση με 5.51% με συντελεστή μεταβλητότητας 2.9%. Ο χαμηλός συντελεστής μεταβλητότητας στην απόδοση σε φωτόνια 122 και 662 keV υποδηλώνει μικρές διαφορές όγκου μεταξύ των ανιχνευτών. Σύγκριση με t-test ανά ζεύγη των αποδόσεων ανίχνευσης φωτονίων ενέργειας 122 keV των ανιχνευτών τύπου A1 έδειξε στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δυο τρόπων εκτίμησης της απόδοσης ($p < 0.001$) και μάλιστα, όπως και στην περίπτωση της πηγής φωτονίων ενέργειας 662 keV, η πειραματική απόδοση ήταν κατά μέσο όρο μικρότερη από την θεωρητικά προβλεπόμενη κατά $4.9\% \pm 1.5\%$, σημειώνεται όμως ότι το σφάλμα βαθμονόμησης της σημειακής πηγής ήταν σύμφωνα με τον κατασκευαστή $\pm 8.7\%$. Αντίθετα, στην περίπτωση των δυο ανιχνευτών τύπου A2, οι πειραματικές τιμές ανιχνευτικής απόδοσης ήταν κατά $\sim 16\%$ μεγαλύτερες των θεωρητικών. Ως εκ τούτου και στις ενέργειες φωτονίων μελετήθηκαν βρέθηκε πειραματικά ότι η απόδοση και των δυο ανιχνευτών τύπου A2 είναι μικρότερη της υπολογιζόμενης κατά 9% ως 18%, εύρημα που πιθανώς να σχετίζεται με ενεργό όγκο του σπινθηριστή μικρότερο του ονομαστικού.

7.3.2 Επανεκτίμηση του ενεργού όγκου ανιχνευτών

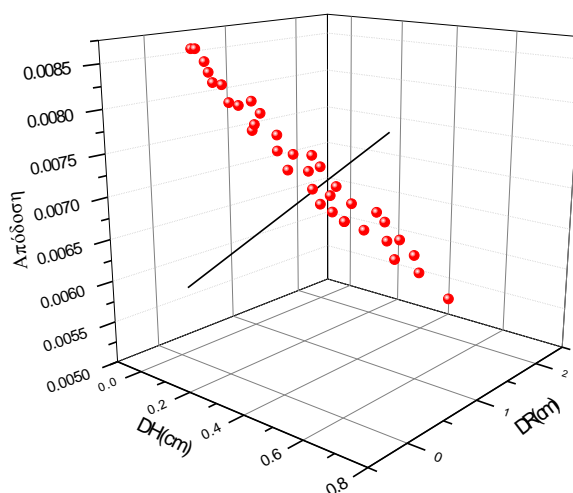
Με σκοπό τη βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων των υπολογισμών του μοντέλου του MOA, διερευνήθηκε η απόδοση του ανιχνευτή τύπου A2 #15 με μεταβολή των γεωμετρικών διαστάσεων του κρυστάλλου ιωδιούχου νατρίου. Θεωρήθηκαν μεταβολές στον ενεργό ανιχνευτικό όγκο του ανιχνευτή με μεταβολή της ακτίνας και του ύψους του ενεργού όγκου του κρυστάλλου σύμφωνα με το Σχήμα 7.4.



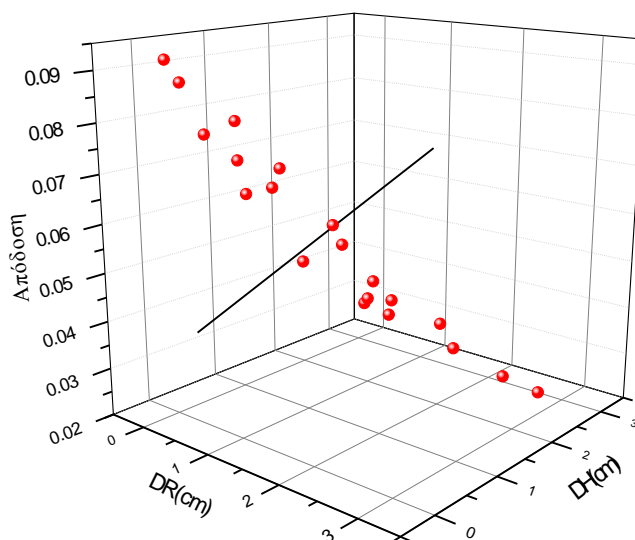
Σχήμα 7.4: Απεικόνιση του ανιχνευτή A2 και των θεωρούμενων μεταβολών στον ενεργό ανιχνευτικό όγκο του.

Στο Σχήμα 7.5 παρουσιάζεται γράφημα σε τρεις άξονες που απεικονίζει τη σχέση μεταξύ της υπολογιζόμενης από τον κώδικα απόδοσης ανίχνευσης φωτονίων ενέργειας 1.46 MeV με μεταβολή του ύψους του κυλίνδρου, DH, και της ακτίνας, DR. Προσομοιώθηκαν συνδυασμοί μεταβολών στις γεωμετρικές παραμέτρους του κρυστάλλου που κυμαίνονταν για το DH μεταξύ 0.0 cm και 0.7 cm και για το DR μεταξύ 0.0 cm και 1.5 cm. Στα σημεία του γραφήματος 7.5 προσαρμόστηκε συνάρτηση επιπέδου με συντελεστή συσχέτισης $R^2 = 0.99$ που περιγράφεται από τη σχέση:

$$eff = 8.78 \times 10^{-3} (\pm 1.78 \times 10^{-5}) - 2.06 \times 10^{-3} (\pm 3.70 \times 10^{-5}) \times DH - 1.21 \times 10^{-3} (\pm 1.22 \times 10^{-5}) \times DR \quad (7.2)$$



Σχήμα 7.5: Γραφική απεικόνιση απόδοσης ανίχνευσης φωτονίων 1.46 MeV με τη μεταβολή του μήκους και της ακτίνας του ενεργού τμήματος του κρυστάλλου



Σχήμα 7.6: Γραφική απεικόνιση απόδοσης ανίχνευσης φωτονίων 662 keV με τη μεταβολή του μήκους και της ακτίνας του ενεργού τμήματος του κρυστάλλου

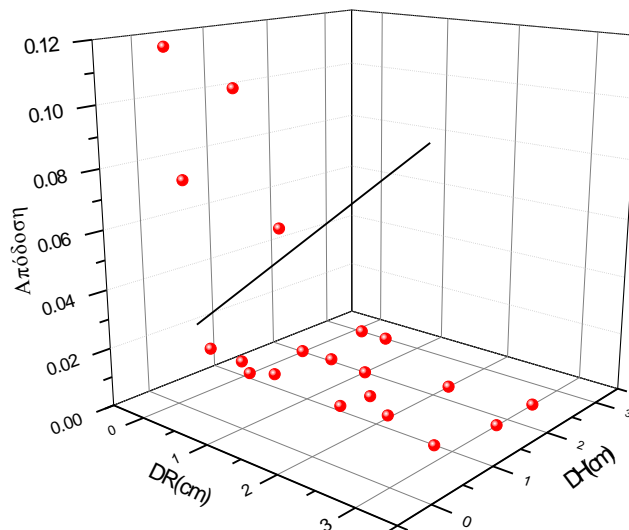
Στο Σχήμα 7.6 παρουσιάζεται Γράφημα σε τρεις άξονες που απεικονίζει τη σχέση μεταξύ της υπολογιζόμενης από τον κώδικα απόδοσης ανίχνευσης φωτονίων ενέργειας 662 keV με την μεταβολή του ύψους του κυλίνδρου DH και της ακτίνας DR. Προσομοιώθηκαν συνδυασμοί μεταβολών στις γεωμετρικές παραμέτρους του κρυστάλλου που κυμαίνονταν για το DH και DR μεταξύ 0.0 cm και 3 cm. Στα σημεία του γραφήματος 7.6 προσαρμόστηκε συνάρτηση επιπέδου με συντελεστή συσχέτισης $R^2 = 0.99$ που περιγράφεται από τη σχέση:

$$eff = -8.46 \times 10^{-3} (\pm 5.46 \times 10^{-3}) + 0.10008 (\pm 5.1 \times 10^{-1}) \times e^{-\left(\frac{DR}{9.84(\pm 0.86)} + \frac{DH}{3.11(\pm 0.29)}\right)} \quad (7.3)$$

Στο Σχήμα 7.7 παρουσιάζεται Γράφημα σε τρεις άξονες που απεικονίζει τη σχέση μεταξύ της υπολογιζόμενης από τον κώδικα απόδοσης ανίχνευσης φωτονίων ενέργειας 122 keV με τη μεταβολή του ύψους του κυλίνδρου και της ακτίνας. Προσομοιώθηκαν συνδυασμοί μεταβολών στις γεωμετρικές παραμέτρους του κρυστάλλου που κυμαίνονταν για το DH και DR μεταξύ 0 cm και 3.0 cm. Στα σημεία του γραφήματος 7.6 προσαρμόστηκε συνάρτηση επιπέδου με συντελεστή συσχέτισης $R^2 = 0.99$ που περιγράφεται από τη σχέση:

$$eff = 1.58 \times 10^{-4} (\pm 8.89 \times 10^{-5}) + 0.11717 (\pm 2.56 \times 10^{-4}) \times e^{-\left(\frac{DR}{12.18(\pm 0.38)} + \frac{DH}{0.238(\pm 1.21 \times 10^{-3})}\right)} \quad (7.4)$$

Για τον προσδιορισμό των βέλτιστων διαστάσεων του ενεργού τμήματος του ανιχνευτή #15 ζητήθηκε η απόδοση που υπολογίζεται από το μοντέλο σε κάθε μια από τις τρεις θεωρούμενες ενέργειες να είναι ίση με την αντίστοιχη πειραματική τιμή που ήταν για φωτόνια ενέργειας τα 1.46 keV είναι ίση με 0.732%, για φωτόνια ενέργειας 662 keV είναι 0.810% και 0.997% για φωτόνια ενέργειας για τα 122 keV στη γεωμετρία που μελετήθηκε. Με αντικατάσταση των τιμών στις αντίστοιχες θεωρητικές εξισώσεις της απόδοσης (7.2-7.4) δημιουργήθηκαν τρεις εξισώσεις με δύο



Σχήμα 7.7: Γραφική απεικόνιση απόδοσης ανίχνευσης φωτονίων 122 keV με τη μεταβολή του μήκους και της ακτίνας του ενεργού τμήματος του κρυστάλλου

δου αγνώστους κάθε μια, τα μεγέθη DH και DR. Λύθηκαν τα τρία ζεύγη εξισώσεων 2×2 που προέκυψαν από τον συνδυασμό των εξισώσεων. Ο Πίνακας 7.5 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων DH και DR που προέκυψαν από τη λύση των συστημάτων εξισώσεων. Ως εκ τούτου θεωρήθηκε ότι η ενεργή διάμετρος είναι ~4% μικρότερη της ονομαστικής (11'') και ότι το ύψος να μη διαφέρει αξιολογικά από το ονομαστικό.

Πίνακας 7.5: Αποτελέσματα επίλυσης συστημάτων εξισώσεων

Σύστημα εξισώσεων απόδοσης	DH (cm)	DR (cm)
7.2-7.3	0.00	1.33
7.2-7.4	0.02	1.20
7.3-7.4	0.02	1.04

7.3.3 Πειραματικές και υπολογιστικές μετρήσεις με φυσικά ομοιώματα

Έγινε προσομοίωση των μετρήσεων που διενεργήθηκαν στα ομοιώματα #1 με πηγή ^{40}K ενεργότητας 4365 Bq και #2 με πηγή ^{137}Cs 1133 Bq που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4 (Πίνακας 4.1) Bq και του ομοιώματος με πηγή $^{99\text{m}}\text{Tc}$ αρχικής ενεργότητας 5.29 MBq που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5. Η προσομοίωση για κάθε ομοίωμα επαναλήφθηκε για κάθε ζεύγος τιμών DH, DR του Πίνακα 7.5. Η διόρθωση των διαστάσεων του κρυστάλλου έγινε και στους δύο ανιχνευτές A2.

Ο Πίνακας 7.6 παρουσιάζει τα στοιχεία για το ομοίωμα με ^{40}K , ο Πίνακας 7.7 για το ομοίωμα με ^{137}Cs και ο 7.8 για το ομοίωμα με $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

Πίνακας 7.6: Συγκριτικά αποτελέσματα αποδόσεων για το ομοίωμα ^{40}K

Σύστημα εξισώσεων	Μέση απόδοση	Απόδοση από ολοκλή- ρωμα	Πειραμα- τική απόδοση	Λόγος μέσης προς πειραματι- κή απόδοση	Λόγος απόδοσης από ολοκλή- ρωμα προς πειραματι- κή απόδοση
<i>Αρχικές διαστάσεις</i>	0.01108	0.01132	0.01000	1.108	1.132
7.2-7.3	0.00970	0.01004	0.01000	0.970	1.004
7.2-7.4	0.00978	0.01012	0.01000	0.978	1.012
7.3-7.4	0.00990	0.01025	0.01000	0.990	1.025

Πίνακας 7.7: Συγκριτικά αποτελέσματα αποδόσεων για το ομοίωμα ^{137}Cs

Σύστημα εξισώσεων	Μέση απόδοση	Απόδοση από ολοκλήρωμα	Πειραματική απόδοση	Λόγος μέσης προς πειραματική απόδοση	Λόγος απόδοσης από ολοκλήρωμα προς πειραματική απόδοση
<i>Αρχικές διαστάσεις</i>	0.014993	0.015532	0.013634	1.100	1.139
7.2-7.3	0.013645	0.014135	0.013634	1.001	1.037
7.2-7.4	0.013738	0.014234	0.013634	1.008	1.044
7.3-7.4	0.013888	0.014387	0.013634	1.019	1.055

Πίνακας 7.8: Συγκριτικά αποτελέσματα αποδόσεων για το ομοίωμα ^{99m}Tc

Σύστημα εξισώσεων	Μέση απόδοση	Απόδοση από ολοκλήρωμα	Πειραματική απόδοση	Λόγος μέσης προς πειραματική απόδοση	Λόγος απόδοσης από ολοκλήρωμα προς πειραματική απόδοση
<i>Αρχικές διαστάσεις</i>	0.03292	0.03385	0.03096	0.940	0.914
7.2-7.3	0.02880	0.02953	0.03096	1.075	1.048
7.2-7.4	0.02965	0.03051	0.03096	1.044	1.015
7.3-7.4	0.02985	0.03071	0.03096	1.037	1.008

7.4 Συζήτηση-Ανάλυση

Ο έλεγχος της απόδοσης του συστήματος σε τρεις ενεργειακές περιοχές του φάσματος με τη χρήση σημειακών πηγών έδειξε πειραματικές τιμές αποδόσεις μικρότερες από τις αντίστοιχες υπολογιζόμενες. Σύμφωνα με τα δεδομένα που παρουσιάζονται στους Πίνακες 7.1 και 7.3, οι αποδόσεις των ανιχνευτών τύπου A1 που υπολογίζονται με τη χρήση του υπολογιστικού μοντέλου δεν παρουσιάζουν αξιόλογες αποκλίσεις από τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές και για τις ενέργειες φωτονίων που μελετήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τα σφάλματα στην ενεργότητα των πηγών.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για την εύρεση των βέλτιστων διαστάσεων των ανιχνευτών σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα οδήγησε σε τρία ζεύγη τιμών για τα μεγέθη DH και DR. Η αντικατάσταση των τιμών στο αρχείο εισόδου και η προσομοίωση της μέτρησης για τρία ομοιώματα με διαφορετική ενέργεια φωτονίων έδειξε πως το ζευγάρι τιμών για το οποίο προκύπτει η καλύτερη συμφωνία με τα

πειραματικά δεδομένα διαφοροποιείται ανάλογα με την ενέργεια της πηγής. Με βάση τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στους Πίνακες 7.6, 7.7 και 7.8 ως βέλτιστες διαστάσεις των ενεργών ανιχνευτικών όγκων των ανιχνευτών A2 επιλέχθηκαν αυτές που ορίζονται από τη λύση του συστήματος εξισώσεων ^{40}K και ^{152}Eu και οδηγούν σε διαστάσεις των ενεργών όγκων των κρυστάλλων A2 ίσες με $25.54 \text{ cm} \times 10.14 \text{ cm}$. Είναι χαρακτηριστικό πως οι συγκεκριμένες τιμές δίνουν σε κάθε ομοίωμα τη δεύτερη καλύτερη συμφωνία σε σχέση με την πειραματική ανιχνευτική απόδοση.

Η σύγκριση της υπολογιστικής με την πειραματική τιμή απόδοσης για τους δύο ανιχνευτές τύπου A2 φανερώνει πως σε κάθε περίπτωση η υπολογισμένη απόδοση ανίχνευσης είναι μεγαλύτερη από την πειραματική τιμή και στους δύο ανιχνευτές. Οι μέση τιμή της διαφοράς στις περιπτώσεις των πηγών ^{40}K και ^{152}Eu είναι τις τάξης του 19%, ενώ για το ^{137}Cs είναι ίση με 11.5%. Οι διαφορές στην ανιχνευτική ικανότητα των δύο ανιχνευτών τύπου A2 προσδιορίστηκαν με σύγκριση των διαφορών των λόγων της υπολογισμένης προς την πειραματική απόδοση με το αντίστοιχο σφάλμα για τις τρεις πηγές. Ο Πίνακας 7.4 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της σύγκρισης των αποδόσεων μεταξύ των ανιχνευτών A2. Η σύγκριση της διαφοράς λόγων με αντίστοιχο σφάλμα υποδεικνύει ότι μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι δυο ανιχνευτές τύπου A2 έχουν ενεργούς ανιχνευτικούς όγκους με παρόμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Πίνακας 7.9: Συγκριτικά αποτελέσματα

Αριθμός Ανιχνευτή	Λόγος #15	Σφάλμα	Λόγος #16	Σφάλμα	Διαφορά λόγων #15-#16	Σφάλμα διαφοράς
^{40}K	1.22E+00	6.33E-02	1.17E+00	6.16E-02	5.15E-02	8.83E-02
^{137}Cs	1.13E+00	6.80E-02	1.10E+00	6.59E-02	3.48E-02	9.47E-02
^{152}Eu	1.18E+00	1.03E-01	1.20E+00	1.04E-01	-1.64E-02	1.47E-01

7.5 Συμπεράσματα

Αναπτύχθηκε μαθηματικό μοντέλο του MOA με τη χρήση του κώδικα Monte Carlo MCNP5. Στο μοντέλο προσομοιώθηκαν στοιχεία όπως είναι η θωράκιση, η εξεταστική κλίση ενώ δόθηκε ιδιαίτερο βάρος στην περιγραφή των ανιχνευτών του συστήματος. Μετά την ολοκλήρωση ανάπτυξης του υπολογιστικού μοντέλου, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ακρίβειας των αποτελεσμάτων των υπολογισμών σε σχέση με πειραματικά δεδομένα. Για τον έλεγχο χρησιμοποιήθηκαν σημειακές πηγές βαθμονόμησης καθώς και μια εμπορική συσκευασία ξηρού άλατος KCl.

Με σκοπό την ελάττωση των διαφορών που εντοπίστηκαν μεταξύ των υπολογισμών και των πειραματικών αποτελεσμάτων, αναπτύχθηκε εμπειρική μέθοδος προσδιορισμού των διαστάσεων των ανιχνευτών. Το μοντέλο του ανιχνευτή που προέκυψε ελέγχθηκε έναντι πειραματικών μετρήσεων σε ανθρωπόμορφα ομοιώματα γνωστής συγκέντρωσης ραδιονουκλιδίων.

Κεφάλαιο 8

Βαθμονόμηση ΜΟΑ

8.1 Εισαγωγή

Η βαθμονόμηση της απόδοσης συστημάτων φασματοσκοπίας γ αποσκοπεί στην αντιστοίχιση των καταγραφόμενων παλμών σε μια ενεργειακή περιοχή σε ενεργότητα του ισοτόπου. Στην περίπτωση των συστημάτων ΜΟΑ, τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης και κατά συνέπεια η ακρίβεια των μετρήσεων, εξαρτώνται από γεωμετρικούς παράγοντες, όπως τα χαρακτηριστικά του σωματότυπου του εξεταζόμενου, τη θέση του ως προς τους ανιχνευτές και από τη σύσταση του σώματος που αφορά φαινόμενα αλληλεπίδρασης φωτονίων με ανθρώπινο σώμα.

Βασική απαίτηση για την επίτευξη αποτελεσμάτων με ακρίβεια είναι η βαθμονόμηση των συστημάτων να πραγματοποιείται με τη χρήση ομοιωμάτων που προσεγγίζουν την ανθρώπινη γεωμετρία. Η τυπική μεθοδολογία βαθμονόμησης συστημάτων ΜΟΑ περιλαμβάνει τη χρήση φυσικών ανθρωπόμορφων ομοιωμάτων το εσωτερικό των οποίων πληρώνεται με κατάλληλο διάλυμα ραδιενεργού ισοτόπου. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί το ομοίωμα βαθμονόμησης Bottle Mannikin Absorber (BOMAB) [Kramer και συν 1991, 1999, 2001, Kramer και Limson Zamora 1994]. Το συγκεκριμένο ομοίωμα αποτελείται από δέκα ελλειπτικά δοχεία που ομοιάζουν με δομές της ανθρώπινης γεωμετρίας. Με σκοπό τον προσδιορισμό της απόδοσης για σωματότυπους διαφορετικών ηλικιών έχει δημιουργηθεί ομάδα ομοιωμάτων η οποία περιλαμβάνει τα ομοιώματα παιδιών 4 και 10 ετών, τα ομοιώματα αναφοράς γυναίκας και άνδρα και δύο ακόμα ομοιώματα ανδρικού σωματότυπου.

Εκτός από το ομοίωμα BOMAB στη βιβλιογραφία αναφέρεται η χρήση εκτός των άλλων ομοιωμάτων τα οποία δομούνται από πλαστικά δοχεία με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3. Οι Hansen και Allen [1996] και ο Schlagbauer [2007] αναφέρουν τη χρήση ομοιώματος πλαστικών δοχείων τύπου «κουτιού» για τη βαθμονόμηση ΜΟΑ. Προβλήματα που αφορούν τη χρήση ομοιωμάτων αυτού του τύπου είναι η μη ικανοποιητική προσέγγιση της ανθρώπινης γεωμετρίας εξαιτίας του σχήματος των δοχείων, τα κενά που δημιουργούνται μεταξύ των δοχείων κατά τη σύνθεση του ομοιώματος και η σχετική θέση των δοχείων ως προς τους ανιχνευτές λόγω μη σχηματισμού της καμπυλότητας του κορμού.

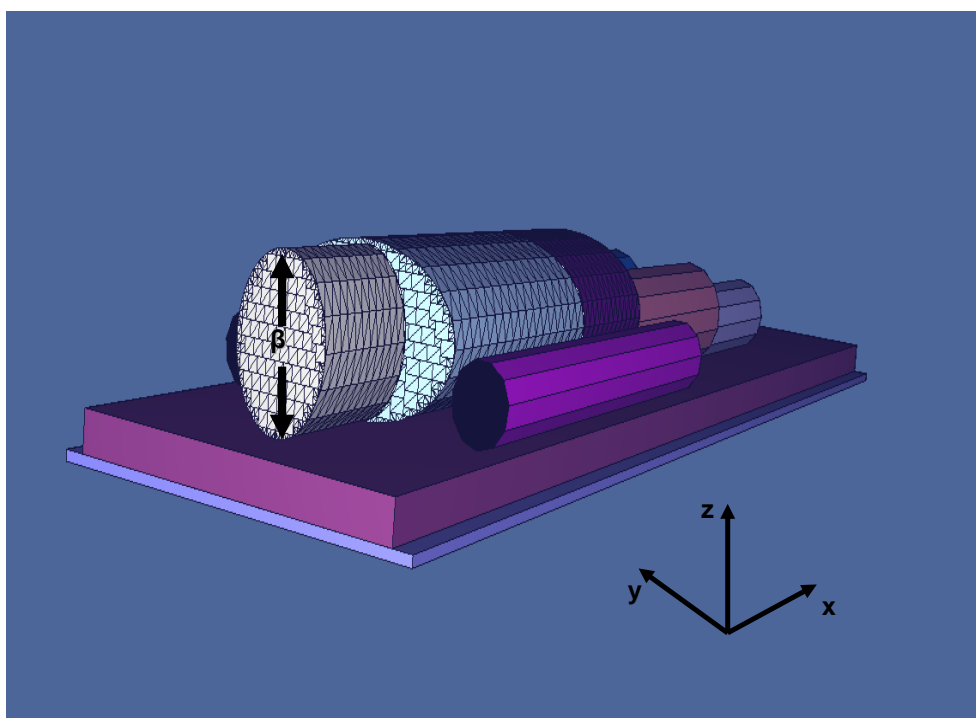
Η κτήση ανθρωπόμορφων ομοιωμάτων διαφόρων μεγεθών αναφέρεται ως μια χρονοβόρα διαδικασία υψηλού κόστους χρήματος (Kramer και συν 2002). Στη σύγχρονη πρακτική το συγκεκριμένο πρόβλημα αντιμετωπίζεται συχνά με τη χρήση βαθμονομήσεων που βασίζονται σε μαθηματικά μοντέλα των διατάξεων με τη χρήση της τεχνικής Monte Carlo [Shypailo και Ellis 2011, O' Hehir και συν. 2006, Venturini και συν 2001]. Η προσομοίωση Monte-Carlo περιλαμβάνει τη δημιουργία μαθηματικών μοντέλων του ΜΟΑ, όπως αυτό που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7 καθώς και των ανθρωπόμορφων ομοιωμάτων βαθμονόμησης. Η χρήση της εν λόγω τεχνικής βαθμονόμησης παρέχει ευελιξία και τη δυνατότητα της κατά περίπτωση μελέτης της γεωμετρίας του εξεταζόμενου.

Στο παρόν τμήμα της εργασίας πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση της απόδοσης του μετρητή με τη χρήση μαθηματικού ομοιώματος και του μαθηματικού μοντέλου του ΜΟΑ που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7.

8.2 Υλικά και μέθοδος

Πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση της απόδοσης μέτρησης του ΜΟΑ με τη χρήση του μαθηματικού μοντέλου που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 7 και μαθηματικών μοντέλων ομοιωμάτων διαφορετικών γεωμετρικών διαστάσεων. Οι δομές που προσομοιώθηκαν στα ομοιώματα είναι το κεφάλι, ο θώρακας και η λεκάνη σε σχήμα ελλειπτικού κυλίνδρου, τα άνω άκρα, οι μηροί και οι κνήμες σε σχήμα κυλίνδρου. Στο Σχήμα 8.1 απεικονίζεται το ομοίωμα σε σχέση με το σύστημα αναφοράς. Στον Πίνακα 8.1 παρουσιάζονται οι διαστάσεις των δομών σε κάθε ομοίωμα, όπου α συμβολίζει τη διάμετρο παράλληλη στον άξονα y , β είναι η διάμετρος παράλληλη στον άξονα z , H συμβολίζει το μήκος και r τη διάμετρο των κυλινδρικών δομών.

Τα ομοιώματα που μοντελοποιήθηκαν αποτελούν παραλλαγές των ομοιωμάτων που παρουσιάστηκαν από την Τζίμα [2003] με μόνη αξιόλογη διαφορά ότι στην παρούσα εργασία η δομή του λαιμού έχει ενσωματωθεί στον κεφάλι και δεν αποτελεί ξεχωριστό σχηματισμό. Η σχεδίαση των ομοιωμάτων βασίστηκε στον κανόνα των εννέα που παρουσιάζεται στο ICRP 23 [1979], σύμφωνα με τον οποίο η αναλογία εμβαδού επιφανείας για τα ενήλικα άτομα είναι κεφάλι και λαιμός 9 %, άνω άκρα 2×9 %, κάτω άκρα 2×18 %, κορμός 36 %.



Σχήμα 8.1: Τοποθέτηση του ομοιώματος στο χώρο

Πίνακας 8.1: Οι διαστάσεις των ανατομικών δομών των ομοιωμάτων

Αριθμός ομοιώματος	Κεφάλι-λαιμός (cm)	Θώρακας (cm)	Λεκάνη (cm)	Μηροί (cm)	Κνήμες (cm)	Χέρια (cm)
1	$\alpha = 14.5$	$\alpha = 23.0$	$\alpha = 23.0$	$r = 9.5$	$r = 7.3$	$r = 5.6$
	$\beta = 18.34$	$\beta = 16.8$	$\beta = 16.8$	$H = 36.42$	$H = 30.0$	$H = 54.0$
	$H = 19.378$	$H = 30.8$	$H = 21.0$			
2	$\alpha = 14.5$	$\alpha = 24.5$	$\alpha = 24.5$	$r = 10.5$	$r = 8.2$	$r = 6.5$
	$\beta = 18.34$	$\beta = 17.86$	$\beta = 17.89$	$H = 36.42$	$H = 30.0$	$H = 54.0$
	$H = 20.05$	$H = 30.8$	$H = 21.0$			
3	$\alpha = 15$	$\alpha = 26.0$	$\alpha = 26.0$	$r = 11.5$	$r = 9.0$	$r = 7.0$
	$\beta = 18.975$	$\beta = 18.98$	$\beta = 18.98$	$H = 36.42$	$H = 30.0$	$H = 54.0$
	$H = 19.728$	$H = 30.8$	$H = 21.0$			
4	$\alpha = 14.68$	$\alpha = 26.43$	$\alpha = 26.43$	$r = 13.0$	$r = 10.0$	$r = 6.7$
	$\beta = 18.5$	$\beta = 18.5$	$\beta = 18.5$	$H = 42.0$	$H = 36.0$	$H = 66.0$
	$H = 20.70$	$H = 40.0$	$H = 23.0$			
5	$\alpha = 15.24$	$\alpha = 28.86$	$\alpha = 28.86$	$r = 13.95$	$r = 11.5$	$r = 7.705$
	$\beta = 19.2$	$\beta = 19.5$	$\beta = 19.5$	$H = 42.0$	$H = 36.0$	$H = 66.0$
	$H = 20.82$	$H = 40$	$H = 23$			
6	$\alpha = 15.24$	$\alpha = 31.0$	$\alpha = 31.0$	$r = 15.5$	$r = 12.99$	$r = 8.7$
	$\beta = 19.2$	$\beta = 20.3$	$\beta = 20.3$	$H = 42.0$	$H = 36.0$	$H = 66.0$
	$H = 20.82$	$H = 40.0$	$H = 23$			
7	$\alpha = 16$	$\alpha = 34.0$	$\alpha = 34.0$	$r = 17.0$	$r = 14.0$	$r = 9.38$
	$\beta = 20.17$	$\beta = 21.46$	$\beta = 21.46$	$H = 42.0$	$H = 36.0$	$H = 66.0$
	$H = 21.32$	$H = 40.0$	$H = 23.0$			
8	$\alpha = 16$	$\alpha = 36.0$	$\alpha = 36.0$	$r = 18.85$	$r = 14.5$	$r = 10.52$
	$\beta = 20.17$	$\beta = 23.13$	$\beta = 23.13$	$H = 42.0$	$H = 36.0$	$H = 66.0$
	$H = 21.32$	$H = 40.0$	$H = 23.0$			
9	$\alpha = 14$	$\alpha = 28.8$	$\alpha = 28.8$	$r = 14.0$	$r = 10.5$	$r = 8.0$
	$\beta = 17.5$	$\beta = 17.5$	$\beta = 17.5$	$H = 45.0$	$H = 35.0$	$H = 8.0$
	$H = 20.38$	$H = 46.0$	$H = 25.0$			
10	$\alpha = 14.8$	$\alpha = 31.35$	$\alpha = 31.35$	$r = 14.5$	$r = 10.87$	$r = 9.3$
	$\beta = 18.5$	$\beta = 19.0$	$\beta = 19.0$	$H = 45.0$	$H = 35.0$	$H = 80.0$
	$H = 21.26$	$H = 46.0$	$H = 25.0$			

Πίνακας 8.1: (συνέχεια)

Αριθμός ομοιώματος	Κεφάλι-λαιμος (cm)	Θώρακας (cm)	Λεκάνη (cm)	Μηροί (cm)	Κνήμες (cm)	Χέρια (cm)
11	$\alpha=15.56$	$\alpha=33.0$	$\alpha=33.0$	$r=16.0$	$r=12.0$	$r=10.0$
	$\beta=19.45$	$\beta=19.8$	$\beta=19.8$	$H=45.0$	$H=35.0$	$H=80.0$
	$H=21.48$	$H=46.0$	$H=25.0$			
12	$\alpha=15.56$	$\alpha=34.65$	$\alpha=34.65$	$r=16.8$	$r=12.6$	$r=11.3$
	$\beta=19.45$	$\beta=20.79$	$\beta=20.79$	$H=45.0$	$H=35.0$	$H=80.0$
	$H=21.48$	$H=46.0$	$H=25.0$			
13	$\alpha=16.0$	$\alpha=37.95$	$\alpha=37.95$	$r=18.0$	$r=14.5$	$r=10.0$
	$\beta=20.0$	$\beta=22.77$	$\beta=22.77$	$H=45.0$	$H=35.0$	$H=80.0$
	$H=21.55$	$H=46.0$	$H=25.0$			
14	$\alpha=18.0$	$\alpha=37.5$	$\alpha=37.5$	$r=18.45$	$r=14.5$	$r=10.5$
	$\beta=20.16$	$\beta=33.0$	$\beta=33.0$	$H=42.0$	$H=36.0$	$H=66.0$
	$H=20.73$	$H=40.0$	$H=23.0$			
15	$\alpha=20.9$	$\alpha=34.0$	$\alpha=38.6$	$r=15.5$	$r=12.9$	$r=9.0$
	$\beta=15.6$	$\beta=21.5$	$\beta=21.5$	$H=45.0$	$H=42.8$	$H=60.0$
	$H=23.44$	$H=52.0$	$H=30.0$			

Ο Πίνακας 8.2 παρουσιάζει το μήκος και τον όγκο των ομοιωμάτων που προσομοιώθηκαν για τις ανάγκες της βαθμονόμησης του συστήματος.

Πίνακας 8.2: Οι διαστάσεις των ομοιωμάτων που μελετήθηκαν

Αριθμός ομοιώματος	Ύψος (cm)	Όγκος (cm ³)
1	137.60	30087
2	138.27	35056
3	138.28	40080
4	161.70	50041
5	161.82	59074
6	161.82	69128

Πίνακας 8.2: (συνέχεια)

Αριθμός ομοιώματος	Ύψος (cm)	Όγκος (cm ³)
7	162.32	80737
8	162.32	91297
9	171.38	59955
10	172.26	69979
11	172.48	80080
12	172.48	89956
13	172.55	100151
14	161.73	112860
15	193.24	88839

Στο αρχείο εισόδου δηλώθηκε πυκνότητα ομοιώματος ίση με 1.00 g/cm³ έναντι 0.994 g/cm³ των πειραματικών ομοιωμάτων (Κεφάλαιο 3). Επιπλέον υπολογίστηκε η απόδοση του συστήματος στις ενέργειες φωτονίων 662 keV και 1.46 MeV για τις δεκαπέντε ομοιώματα (Πίνακες 8.1 και 8.2). Η προσομοίωση της μέτρησης κάθε ομοιώματος πραγματοποιήθηκε με υπολογισμό της απόδοσης σε δεκαπέντε θέσεις σάρωσης μεταξύ των θέσεων -100 cm και 100 cm. Κάθε θέση αντιστοιχεί στην απόσταση κατά τον άξονα σάρωσης του ομοιώματος (Άξονας-χ) μεταξύ του κέντρου των ανιχνευτών και ενός σημείου της εξεταστικής κλίνης το οποίο απέχει απόσταση 40 cm από το σημείο τοποθέτησης της κορυφής της κεφαλής του ομοιώματος, το οποίο είναι το ίδιο για όλα τα ομοιώματα. Ειδικότερα, υπολογίστηκαν οι αποδόσεις στις θέσεις 0 cm, 10 cm, 25 cm, 40 cm, 55 cm, 70 cm, 85 cm, 100 cm και στις συμμετρικές τους ως προς το κέντρο της διάταξης των ανιχνευτών που αντιστοιχεί στη θέση 0 cm. Η απόδοση κάθε ανιχνευτή σε κάθε θέση καθώς και η συνολική απόδοση του συστήματος υπολογίστηκε για τα βέλτιστα ενεργειακά παράθυρα που προτείνονται στο Κεφάλαιο 4. Τα σφάλματα της απόδοσης για το σύνολο των ανιχνευτών σε κάθε θέση σάρωσης ήταν μικρότερα του 2 %.

Λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορές πυκνότητας μεταξύ των διαφόρων ανθρώπων, μελετήθηκε η επίδραση της πυκνότητας στην απόδοση του συστήματος με σύγκριση των αποδόσεων του ομοιώματος #10 που υπολογίστηκαν για φωτόνια ενέργειας 1.46 MeV και τιμές πυκνότητας 0.97 g/cm³, 1.00 g/cm³ 1.03 g/cm³ σε όλο το σώμα.

Υπολογίστηκε η εξάρτηση της απόδοσης, για το ομοίωμα # 11 με πυκνότητα 1.00 g/cm³ από την ενέργεια με προσομοίωση πηγών φωτονίων ενέργειας 140.5 keV, 364 keV, 662 keV, 722 keV, 1274 keV, 1.46 MeV ομοιογενώς κατανομημένες στο μαθηματικό ομοίωμα. Η απόδοση υπολογίστηκε για πλάτος ενεργειακού παραθύρου ίσου με 1.25 φορές το FWHM. Η τιμή του FWHM είναι η μέση τιμή που υπολογίστηκε από όλους τους ανιχνευτές σε κάθε ενέργεια.

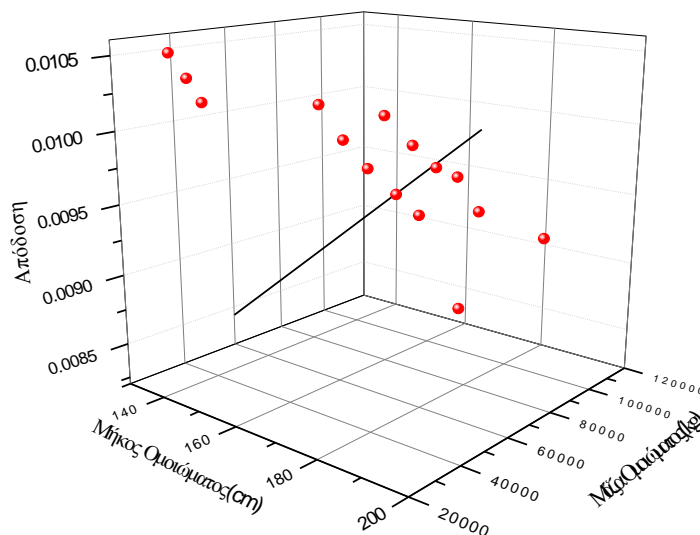
Πίνακας 8.3: Αποτελέσματα υπολογισμών απόδοσης για φωτόνια ενέργειας 1460 keV

Αριθμός ομοιώματος	Ύψος ομοιώματος (cm)	Μάζα ομοιώματος (g)	Απόδοση (μέση τιμή)	Σφάλμα απόδοσης	Απόδοση (ολοκλήρωση)
1	137.6	30087	1.05E-02	4.50E-05	1.08E-02
2	138.3	35056	1.03E-02	3.96E-05	1.06E-02
3	138.3	40080	1.02E-02	4.53E-05	1.04E-02
4	161.7	50041	1.02E-02	4.04E-05	1.05E-02
5	161.8	59074	9.94E-03	4.04E-05	1.02E-02
6	161.8	69128	9.71E-03	3.94E-05	9.99E-03
7	172.5	80080	9.72E-03	3.85E-05	1.00E-02
8	162.3	80738	9.47E-03	3.76E-05	9.76E-03
9	162.3	91297	9.26E-03	4.05E-05	9.55E-03
10	171.4	59955	1.01E-02	4.66E-05	1.04E-02
11	172.3	69979	9.92E-03	4.54E-05	1.02E-02
12	172.5	89956	9.61E-03	4.52E-05	9.90E-03
13	172.6	100579	9.31E-03	4.44E-05	9.59E-03
14	161.7	112860	8.39E-03	3.12E-05	8.66E-03
15	193.2	88839	9.31E-03	1.21E-04	9.58E-03

8.3 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των ομοιωμάτων για κάθε ανιχνευτή χωριστά με πηγή φωτονίων 1.46 MeV παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Β. Ο Πίνακας 8.3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της συνολικής απόδοσης του συστήματος που υπολογίστηκε βάσει τη συνολική απόδοση σε κάθε επιμέρους θέση σάρωσης είτε ως μέση τιμή των αποδόσεων στις δεκαπέντε θέσεις είτε με την τεχνική της ολοκλήρωσης σε μήκος κίνησης της κλίνης 200 cm, που είναι ασύμμετρο ως προς το κέντρο του τούνελ και χρήση ενεργειακού παράθυρου ίσου με 1.25 φορές το FWHM. Το Σχήμα 8.2 παρουσιάζει γραφική αναπαράσταση της σχέσης της απόδοσης με το μήκος και τη μάζα του ομοιώματος. Στα δεδομένα του γραφήματος 8.2 προσαρμόστηκε σχέση της μορφής:

$$\text{αποδοση} = z_0 + a \times \text{μῆκος} + b \times \text{μάζα} + c \times \text{μῆκος}^2 + d \times \text{μάζα}^2 + f \times \text{μῆκος} \times \text{μάζα} \quad (8.1)$$



Σχήμα 8.2: Γραφική παράσταση απόδοσης σε συνάρτηση με το μήκος και μάζα του ομοιώματος

Πίνακας 8.4: Τιμές παραμέτρων εξισώσεων προσαρμογής προσαρμογής της ανιχνευτικής απόδοσης σε φωτόνια ενέργειας 1.46 MeV

Παράμετρος	Απόδοση ομοιώματος (μέση τιμή) $R^2=0.975$		Απόδοση ομοιώματος (ολοκλήρωμα) $R^2=0.974$	
	Τιμή	Σφάλμα	Τιμή	Σφάλμα
z_0	-0.01117	0.00425	-0.01124	0.00432
a	3.33849E-4	6.32652E-5	3.39232E-4	6.43077E-5
b	-1.937E-7	3.54616E-8	-1.95436E-7	3.6046E-8
c	-1.21795E-6	2.27389E-7	-1.23946E-6	2.31136E-7
d	-1.33407E-13	7.22788E-14	-1.44626E-13	7.34699E-14
f	1.15081E-9	2.22705E-10	1.17114E-9	2.26375E-10

Με βάση τον αριθμό των υπολογισμένων αποδόσεων σε κάθε ομοίωμα προέκυψαν δύο εξισώσεις συσχέτισης. Ο Πίνακας 8.4 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των εξισώσεων συσχέτισης

Ο Πίνακας 8.5 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της συνολικής απόδοσης του συστήματος για φωτόνια ενέργειας 662 keV, που υπολογίσθηκε με βάση τη συνολική απόδοση σε κάθε επιμέρους θέση σάρωσης.

Το Σχήμα 8.5 παρουσιάζει γραφική αναπαράσταση της σχέσης της απόδοσης του ΜΟΑ για φωτόνια ενέργειας 662 keV με το μήκος και τη μάζα του ομοιώματος

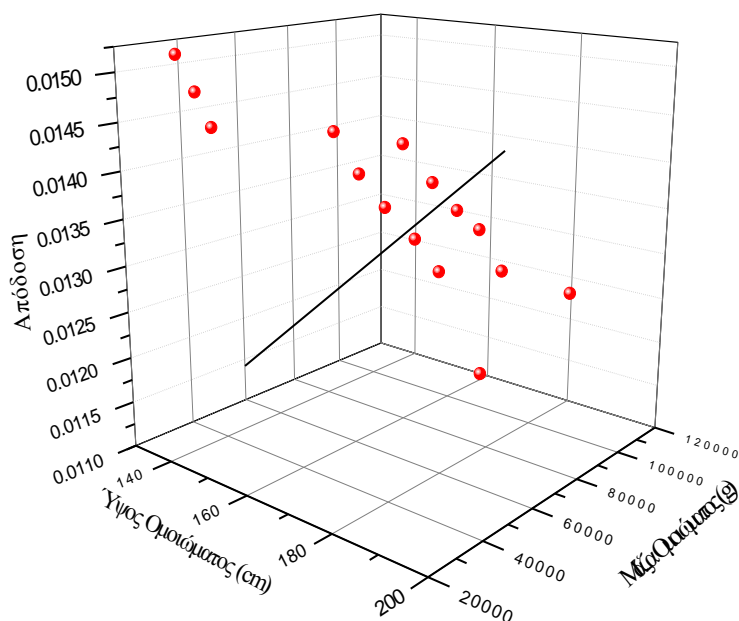
Στα δεδομένα του γραφήματος 8.5 προσαρμόστηκε σχέση της μορφής 8.1. Με βάση τον αριθμό των υπολογισμένων αποδόσεων σε κάθε ομοίωμα προέκυψαν δύο εξισώσεις συσχέτισης. Ο Πίνακας 8.5 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των εξισώσεων συσχέτισης

Πίνακας 8.5: Αποτελέσματα υπολογισμών απόδοσης για φωτόνια ενέργειας 662 keV

Αριθμός ομοιώματος	Ύψος ομοιώματος (cm)	Μάζα ομοιώματος (g)	Απόδοση (Μέση τιμή)	Σφάλμα απόδοσης	Απόδοση (ολοκλήρωση)
1	137.6	30087	1.52E-02	2.13E-04	1.56E-02
2	138.3	35056	1.48E-02	1.75E-04	1.52E-02
3	138.3	40080	1.44E-02	2.01E-04	1.48E-02
4	161.7	50041	1.45E-02	2.10E-04	1.49E-02
5	161.8	59074	1.40E-02	2.07E-04	1.44E-02
6	161.8	69128	1.35E-02	2.05E-04	1.40E-02
7	172.5	80080	1.35E-02	2.06E-04	1.39E-02
8	162.3	80738	1.31E-02	1.62E-04	1.35E-02
9	162.3	91297	1.26E-02	1.57E-04	1.30E-02
10	171.4	59955	1.44E-02	1.73E-04	1.48E-02
11	172.3	69979	1.39E-02	2.10E-04	1.43E-02
12	172.5	89956	1.32E-02	1.62E-04	1.36E-02
13	172.6	100579	1.27E-02	1.58E-04	1.31E-02
14	161.7	112860	1.11E-02	1.43E-04	1.15E-02
15	193.2	88839	1.28E-02	1.24E-04	1.32E-02

Ο Πίνακας 8.7 περιέχει τις τιμές της απόδοσης που υπολογίσθηκαν για το ομοίωμα Νο10 με πηγή φωτονίων 662 keV για διαφορετικές τιμές πυκνότητας ομοιώματος

(αναλυτικά οι υπολογισμοί για τα ομοιώματα με πηγή ενέργειας 662 keV παρουσιάζονται στο παράρτημα Γ).



Σχήμα 8.5: Γραφική παράσταση απόδοσης σε φωτόνια ενέργειας 662 keV σε συνάρτηση με το μήκος και μάζα του ομοιώματος

Πίνακας 8.6: Τιμές παραμέτρων εξισώσεων προσαρμογής της ανιχνευτικής απόδοσης σε φωτόνια ενέργειας 662 keV

Παράμετρος	Απόδοση ομοιώματος (μέση τιμή) $R^2=0.981$		Απόδοση ομοιώματος (ολοκλήρωμα) $R^2=0.981$	
	Τιμή	Σφάλμα	Τιμή	Σφάλμα
z_0	-0.02106	0.00709	-0.02143	0.00714
a	5.56681E-4	1.05449E-4	5.68685E-4	1.06196E-4
b	-3.27451E-7	5.8931E-8	-3.33002E-7	5.93485E-8
c	-2.01163E-6	3.78755E-7	-2.05704E-6	3.81438E-7
d	-1.68701E-13	1.20466E-13	-1.82455E-13	1.2132E-13
f	1.85879E-9	3.69976E-10	1.90099E-9	3.72596E-10

Πίνακας 8.7: Τιμές απόδοσης προσαρμογής της ανιχνευτικής απόδοσης του MOA σε φωτόνια ενέργειας 1.46 MeV για διαφορετικές πυκνότητες του ομοιώματος #11

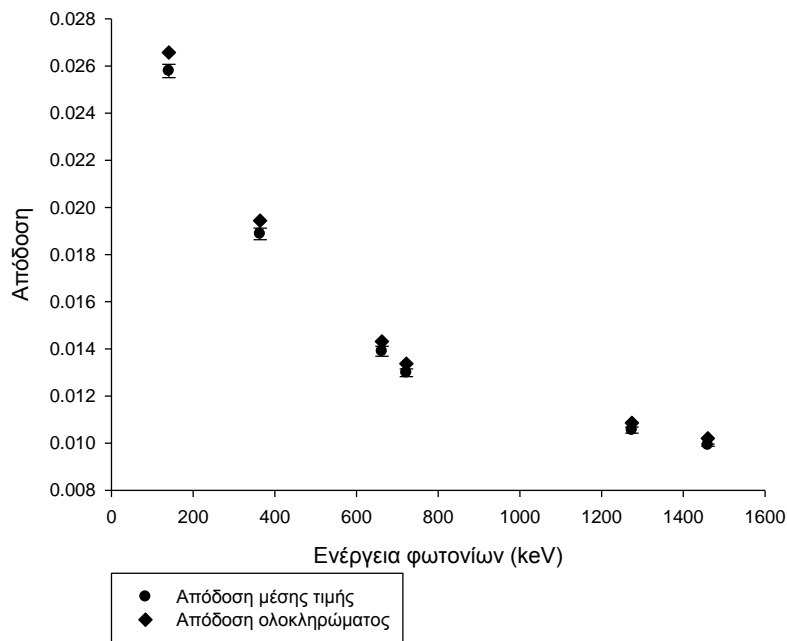
Πυκνότητα ομοιώματος (g/cm ³)	Απόδοση (μέση τιμή)	Σφάλμα απόδοσης	Απόδοση (ολοκλήρωση)
0.97	1.00E-02	1.51E-04	1.03E-02
1.00	9.92E-03	4.70E-05	1.02E-02
1.03	9.78E-03	1.71E-04	1.01E-02

Πίνακας 8.8: Η απόδοση για διάφορες τιμές φωτονίων

Ενέργεια φωτονίων (keV)	Απόδοση (μέση τιμή)	Σφάλμα απόδοσης	Απόδοση (ολοκλήρωση)
140.5	2.58E-02	2.81E-04	2.66E-02
364.0	1.89E-02	2.46E-04	1.94E-02
662.0	1.39E-02	2.10E-04	1.43E-02
722.0	1.30E-02	1.63E-04	1.34E-02
1274.0	1.06E-02	1.28E-04	1.09E-02
1460.0	9.92E-03	4.70E-05	1.02E-02

Ο Πίνακας 8.8 παρουσιάζει τις τιμές αποδόσεις του ομοιώματος #11 όταν γίνεται χρήση ενεργειακού παράθυρου ίσου με 1.25 φορές το FWHM, σε έξι ενέργειες μεταξύ 140 και 1460 keV

Το Σχήμα 8.4 παρουσιάζει σε κοινό διάγραμμα την σχέση της απόδοσης που υπολογίζεται από τη μέση τιμή ή το ολοκλήρωμα της απόδοσης στις δεκαπέντε θέσεις που θεωρούνται μεταξύ των ακραίων θέσεων σάρωσης του ομοιώματος, με την ενέργεια της πηγής φωτονίων.



Σχήμα 8.4: Γραφική παράσταση απόδοσης σε συνάρτηση με την ενέργεια της πηγής

8.4 Ανάλυση-Συζήτηση

Συνολικά για φωτόνια ενέργειας 0.66 και 1.46 MeV μοντελοποιήθηκαν δεκαπέντε ομοιώματα διαφόρων BMI, εκ των οποίων τρία ήταν ομοιώματα εφήβου ύψους ~138 cm, έξι ομοιώματα ενήλικα ύψους ~162 cm, πέντε ομοιώματα ενήλικα ύψους 172 cm και ένα ψηλόλιγνου ενήλικα (88.9 kg / 193 cm). Η χρήση της ολοκλήρωσης έναντι της χρήσης της απλής μέσης τιμών στις δεκαπέντε θέσεις του ομοιώματος είχε ως συνέπεια τον υπολογισμό απόδοσης σε φωτόνια ενέργειας 0.66 και 1.46 MeV αυξημένης κατά ~3%. Η μέση ανιχνευτική απόδοση σε φωτόνια ενέργειας 662 keV βρέθηκε ~40% αυτής σε φωτόνια ενέργειας 2.2 φορές μεγαλύτερης, 1.46 MeV, εύρημα που υποδηλώνει ότι η αυξημένη ενδογενής απόδοση των ανιχνευτών σε φωτόνια ενέργειας 662 keV είναι πιο σημαντική από την αυξημένη εξασθένιση των φωτονίων ενέργειας 662 keV από αυτήν των φωτονίων μεγαλύτερης ενέργειας.

Ο προσδιορισμός του συσχετισμού της ανιχνευτικής απόδοσης του MOA με τα σωματικά χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου (ύψους μεταξύ 138 cm και 193 cm και μάζας από ~30 kg έως 113 kg) έδειξε στην περίπτωση μέτρησης του ^{40}K ότι η απόδοση ανίχνευσης κυμαίνεται μεταξύ 0.87% και 1.08%, με συνέπεια η απόδοση σε παχύσαρκο ενήλικα (#14, 112.9 kg / 161.7 cm) να είναι μικρότερη κατά 20% αυτής ενός εφήβου (#1, 30.1 kg / 137.6 cm). Εξαιρώντας το ομοίωμα με το ακραίο BMI 43 kg/m², οι τιμές απόδοσης κυμαίνονται από 0.955% (#9) ως 1.08% (#1), με ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των ακραίων τιμών ~12 % διαφορά που θεωρείται μικρή και σχετίζεται με τη σχεδίαση του MOA. Από τους αντίστοιχους υπολογισμούς για πηγή φωτονίων ενέργειας 662 keV προκύπτει ότι η ανιχνευτική απόδοση κυμαίνεται μεταξύ 1.15% στο ομοίωμα #14 και 1.56% στο ομοίωμα #, -διαφορά της τάξης του 30% που μειώνεται στο 17% αγνοώντας το ομοίωμα #14 με BMI 43 kg/m².

Η προσαρμογή σχέσης στα πειραματικά δεδομένα έδειξε ότι η σχέση της απόδοσης με το ύψος και τη μάζα περιγράφεται ικανοποιητικά από εξίσωση της μορφής 8.1 και για στις δύο περιπτώσεις ενεργειών.

Η προσομοίωση ομοιωμάτων διαφορετικών πυκνοτήτων στην περίπτωση πηγής φωτονίων ενέργειας 1.46 MeV, έδειξε πως η μεταβολή πυκνότητας του σώματος από 0.97 σε 1.03 g/cm³, συνεπάγεται μεταβολή στην ανιχνευτική απόδοση κατά ~2.7%, άρα στην πράξη μπορούν να αγνοηθούν οι σημαντικές διαφορές στο ποσοστό της μάζας του σώματος που είναι λίπος (τυπικά ~23% σε υγιείς έλληνες ηλικίας και ~40% σε υγιείς ελληνίδες ηλικίας 60 ετών).

Η ισχύς των εξισώσεων 8.1 (Πίνακας 8.4) και 8.2 (Πίνακας 8.6) που προέκυψαν από τη προσομοίωση ομοιωμάτων διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών ελέγχθηκε με μετρήσεις με τα φυσικά ομοιώματα που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4. Η ισχύς των εξισώσεων ελέγχθηκε σε ένα ομοίωμα μικρών και μεσαίων διαστάσεων τα οποία περιείχαν διάλυμα ⁴⁰K ή ¹³⁷Cs. Ο Πίνακας 8.9 παρουσιάζει τα στοιχεία των φυσικών ομοιωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν και ο Πίνακας 8.10 τα αποτελέσματα τις εφαρμογής των υπολογιζόμενων αποδόσεων στα πειραματικά δεδομένα.

Πίνακας 8.9: Στοιχεία ομοιωμάτων

Αριθμός Ομοιώματος	Ισότοπο	Ύψος (cm)	Μάζα (g)	Όγκος διαλύματος (l)	Ένεργότητα (Bq)
1	⁴⁰ K	177.0(3.0)	72969(200)	64	4365(224)
2	¹³⁷ Cs	177.0(3.0)	72969(200)	64	1133(70)
3	⁴⁰ K	136.5(3.0)	47857(200)	42	2864(147)
4	¹³⁷ Cs	136.5(3.0)	47857(200)	42	743(46)

Βρέθηκε ότι η διαφορά μεταξύ της ονομαστικής και της υπολογιζόμενης ενεργότητας για το μικρό και το μεσαίο ομοίωμα ⁴⁰K είναι 2.2 και 0.4 % αντίστοιχα και εντός του σφάλματος του 5 % που υπολογίστηκε για την τιμή της ονομαστικής ενεργότητας. Αντίστοιχα, βρέθηκε ότι η διαφορά μεταξύ της ονομαστικής και της υπολογιζόμενης ενεργότητας για το μικρό και το μεσαίο ομοίωμα ¹³⁷Cs είναι 8.8 και 2.96 % αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι στην περίπτωση του ¹³⁷Cs η διαφορά ονομαστικής και υπολογιζόμενης ενεργότητας βρίσκεται εντός του σφάλματος 5 % μόνο για το μεσαίο ομοίωμα γεγονός που μπορεί να αιτιολογηθεί στην επίδραση που έχει η γεωμετρία του ομοιώματος σε μικρότερες ενέργειες φωτονίων.

Παρατηρείται ότι για μεσαίες και μεγάλες ενέργειες φωτονίων η εφαρμογή των εξισώσεων βαθμονόμησης που υπολογίστηκε με τη χρήση ανθρωπόμορφου ομοιώματος τύπου BOMAB σε κώδικα Monte Carlo παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα για διαστάσεις ομοιωμάτων παρόμοιες με τα χαρακτηριστικά του μέσου ανθρώπου.

Πίνακας 8.10: Στοιχεία ομοιωμάτων

Αριθμός Ομοιώματος	Ισότοπο	Ένεργότητα (Bq)	Υπολογιζόμενη απόδοση	Ρυθμός παλμών	Υπολογιζόμενη ενεργότητα	Πηλίκονομαστικής προς υπολογιζόμενης
1	⁴⁰ K	4365(224)	1.01E-02	4.67	4347	1.0041
2	¹³⁷ Cs	1133(70)	1.41E-02	13.17	1100	1.0296
3	⁴⁰ K	2864(147)	9.94E-03	2.97	2801	1.0225
4	¹³⁷ Cs	743(46)	1.39E-02	9.63	812	0.9148

8.5 Συμπεράσματα

Μελετήθηκε η σχέση της απόδοσης με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ομοιώματος μέσω προσομοίωσης ανθρωπόμορφων ομοιωμάτων για δύο ενέργειες. Στα αποτελέσματα των υπολογισμών προσαρμόστηκε καμπύλη της μορφής:

$$\text{αποδοση} = z_0 + a \times \text{μηκος} + b \times \text{μαζα} + c \times \text{μηκος}^2 + d \times \text{μαζα}^2 + f \times \text{μηκος} \times \text{μαζα}$$

Διερευνήθηκε η επίδραση της πυκνότητας του ομοιώματος στις τιμές της απόδοσης. Οι διαφορές που καταγράφηκαν δεν ξεπέρασαν το 4%.

Η εφαρμογή της εξίσωσης που προσδιορίζει τη σχέση της απόδοσης με το ύψος και τη μάζα του ομοιώματος εφαρμόστηκε στα δεδομένα των φυσικών ομοιωμάτων πλαστικών δοχείων που περιγράφονται στο Κεφ. 3. Βρέθηκε ότι για τα ομοιώματα των συγκεκριμένων διαστάσεων υπάρχει συμφωνία μεταξύ των τιμών της ανιχνευτικών αποδόσεων του MOA σε φωτόνια ενέργειας 0.66 και 1.46 MeV που μετρήθηκε και αυτών που υπολογίσθηκαν.

Κεφάλαιο 9

Εφαρμογές ΜΟΑ

9.1 Εισαγωγή

Οι τεχνικές ολόσωμης μέτρησης ακτινοβολίας που αναπτυχθήκαν στα προηγούμενα κεφάλαια εφαρμόστηκαν σε *in vivo* μετρήσεις εθελοντών. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τον προσδιορισμό της ολόσωμης ποσότητας καλίου (TBK) καθώς και μετρήσεις ακτινοπροστασίας. Οι *in vivo* μετρήσεις TBK έγιναν σε δύο φάσεις, πριν και μετά την εγκατάσταση του συστήματος αερισμού του δωματίου του ΜΟΑ (οι μετρήσεις καλίου μετά την εγκατάσταση του συστήματος εξαναγκασμένου αερισμού έγιναν στο πλαίσιο διπλωματικής εργασίας της Σ. Παλλάδα για λήψη ΜΔΕ Ιατρικής Φυσικής – Ακτινοφυσικής [2012]).

Σκοπός τη παρούσας ενότητας είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των *in vivo* μετρήσεων σε εθελοντές.

9.2 Εφαρμογές ΜΟΑ

Η χρήση των ΜΟΑ περιλαμβάνει γενικά εφαρμογές που αφορούν της εξής περιοχές: 1) μέτρηση της φυσικής ραδιενέργειας, 2) μέτρηση ραδιενέργειας οφειλόμενης σε ιατρικές πράξεις, 3) μέτρηση ραδιενεργών πηγών ανθρωπογενούς προέλευσης που απελευθερώνονται στο περιβάλλον εξαιτίας των δραστηριοτήτων του ανθρώπου συμπεριλαμβανομένων περιπτώσεων πυρηνικών ατυχημάτων και 3) μετρήσεις ακτινοπροστασίας.

Ολόσωμη ποσότητα καλίου (TBK)

Η ποσοτικοποίηση της ολόσωμης ποσότητας καλίου αποτελεί μια από τις βασικές εφαρμογές των ΜΟΑ στην περιοχή μετρήσεων πηγών φυσικής ραδιενέργειας (Andrews και συν., Cohn και συν.). Το κάλιο αποτελεί ένα πολύ σημαντικό στοιχείο για τον ανθρώπινο οργανισμό και εντοπίζεται στο εσωτερικό των κυττάρων των μυών και των σπλάγχων και σε μικρότερο βαθμό στα οστά, στο κολλαγόνο και στον λιπώδη ιστό. Ως εκ τούτου, ο προσδιορισμός της ποσότητας καλίου στο ανθρώπινο σώμα αποτελεί δείκτη της ποσότητας μη λιπώδους ιστού. Η διαδικασία ποσοτικοποίησης του ολόσωμου καλίου με χρήση ΜΟΑ περιλαμβάνει τη μέτρηση του φάσματος του ^{40}K , το οποίο περιέχεται σε αναλογία 0.001167 % στο φυσικό κάλιο. Το ^{40}K έχει χρόνο ημιζωής 1.28×10^9 χρόνια και εκπέμπει φωτόνια ενέργειας 1460 keV με απόδοση εκπομπής 0.107 φωτόνια ανά διάσπαση.

Με σκοπό την *in vivo* χημική ανάλυση του ανθρώπινου σώματος, συσχετίστηκε η μάζα καλίου σε ολόκληρο το ανθρώπινο σώμα ενηλίκων (TBK) με τη μάζα του σώματος που δεν είναι λίπος από χημικής πλευράς (fat free mass, FFM). Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με χρήση των εμπειρικών σχέσεων που βασίστηκαν σε δεδομένα

των Mackie [1989] και των Kehayias και συν. [1997]. Συγκεκριμένα, το μοντέλο του Mackie [1989] προτείνει αναλογία μεταξύ FFM και TBK η οποία εξαρτάται μόνο από το φύλο:

$$\text{άνδρες :} \quad \frac{FFM}{TBK} = 2.533 \pm 0.119 \quad (9.3)$$

$$\text{γυναίκες :} \quad \frac{FFM}{TBK} = 2.253 \pm 0.147 \quad (9.4)$$

όπου η ποσότητα FFM είναι σε kg και η TBK σε g.

Αντίθετα, προσαρμογή στο δεδομένα TBK του Kehayias και συν. έδειξε ότι η ποσότητα μεταβάλλεται και με την ηλικία των ενηλίκων σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\text{άνδρες :} \quad R_{TBK/LEANBODYMASS} = 2.431 - 0.0072 \times (AGE-25) \quad (9.1)$$

$$\text{γυναίκες :} \quad R_{TBK/LEANBODYMASS} = 2.338 - 0.0085 \times (AGE-25) \quad (9.2)$$

όπου $R_{TBK/LEANBODYMASS}$ συμβολίζει την ποσότητα ολόσωμου καλίου ανά μονάδα άλιπης μάζας (FFM) σε g TBK ανά kg μη λιπώδους ιστού και AGE είναι η ηλικία του ανθρώπου σε y.

Εκτός από τα μοντέλα του Kehayias και συν. [1997] και από τον Mackie [1989], στη βιβλιογραφία αναφέρεται συχνά το προγενέστερο μοντέλο του Forbes και συν. [1961], σύμφωνα με το οποίο στους άνδρες αντιστοιχούν 2.66 g K ανά kg άλιπου ιστού, ενώ στις γυναίκες η αντίστοιχη τιμή είναι 2.50 g K ανά kg άλιπου ιστού.

Στην παρούσα μελέτη με σκοπό τη σύγκριση των προβλέψεων του MOA για την ολόσωμη ποσότητα καλίου στον άνθρωπο, έγινε έμμεσος προσδιορισμός του ολόσωμου καλίου με τη χρήση της τεχνικής απορροφησιμετρίας διπλής ενέργειας, DXA (Dual-Energy X-ray Absorptiometry). Η εφαρμογή της τεχνικής στηρίζεται στην μέτρηση της εξασθένισης δεσμών ακτίνων X λίγων και αρκετών δεκάδων keV στο σώμα του εξεταζόμενου σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν οστά. Η αναλογία στην εξασθένιση των δύο ενεργειακών ομάδων φωτονίων επιτρέπει τον προσδιορισμό του ποσοστού του λίπους στις διάφορες περιοχές του ανθρώπινου σώματος. Επίσης μελετήθηκε η επίδραση φωτονίων μεγάλης ενέργειας (>1.65 MeV) στις μετρήσεις ^{40}K και τρόποι μείωσης της εν λόγω επίδρασης.

Ανθρωπογενείς ραδιενεργές πηγές

Ο όρος ανθρωπογενής ραδιενεργές πηγές περιλαμβάνει το σύνολο των πηγών που απελευθερώθηκαν στο περιβάλλον ως αποτέλεσμα δραστηριοτήτων, όπως είναι η δοκιμές πυρηνικών όπλων, η λειτουργία πυρηνικών μονάδων παραγωγής ενέργειας ή ερευνητικών αντιδραστήρων ή εργαστηρίων όπου γίνεται χρήση ανοιχτών ραδιενεργών πηγών για ιατρικούς ή άλλους σκοπούς και συμβάντα όπου γίνεται απελευθέρωση ραδιενεργού υλικού σε συνθήκες ατυχήματος. Τα ισότοπα αυτής της κατηγορίας είναι συνήθως προϊόντα φαινομένων σχάσεως ή προϊόντα νετρονικής ενεργοποίησης. Χαρακτηριστικά ισότοπα ανθρωπογενούς προέλευσης αναφέρονται το ^{137}Cs , ^{131}I , ^{60}Co , ^{90}Y , κ.α. Επιπρόσθετα με τα προηγούμενα ισότοπα, υπάρχουν και

εκείνα που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια ιατρικών εφαρμογών διαγνωστικών ή/και θεραπευτικών, όπως το ^{99m}Tc και το ^{153}Sm .

Μετρήσεις ακτινοπροστασίας επαγγελματικά εκτιθέμενων

Βασική εφαρμογή των ΜΟΑ είναι η ανίχνευση και ποσοτικοποίηση ραδιορυπάνσεων εσωτερικών ή εξωτερικών σε εργαζόμενους των οποίων η εργασία ενέχει χρήση ανοιχτών ραδιενεργών πηγών. Παραδείγματα επαγγελματικά εκτιθέμενων εργαζομένων στους οποίους ενδείκνυται η μέτρηση με ΜΟΑ, είναι άτομα που εργάζονται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, και σε εργαστήρια Πυρηνικής Ιατρικής και παραγωγής ραδιοφαρμάκων ή άλλων ραδιενεργών υλικών.

9.3 Υλικά και μέθοδος

Οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν για την ανίχνευση και ποσοτικοποίηση ραδιονουκλιδίων στο ανθρώπινο σώμα με τη χρήση του αναβαθμισμένου ΜΟΑ εφαρμόστηκαν σε αριθμό εθελοντών. Οι μετρήσεις που έλαβαν χώρα διαχωρίζονται σε μετρήσεις βιοϊατρικού ενδιαφέροντος και σε μετρήσεις ακτινοπροστασίας επαγγελματικά εκτιθέμενων και μελών του γενικού πληθυσμού. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την εκτίμηση της βραχύχρονης επαναληπτικότητας των *in vivo* μετρήσεων έγιναν με επανατοποθέτηση του εξεταζόμενου στην εξεταστική κλίνη και την πάροδο τουλάχιστον μερικών λεπτών μεταξύ των μετρήσεων.

A. Μετρήσεις ολόσωμου ^{40}K και ^{214}Bi

Αριθμός μετρήσεων προσδιορισμού της ποσότητας καλίου στο ανθρώπινο σώμα διενεργήθηκαν πριν και μετά την εγκατάσταση του συστήματος εξαναγκασμένου αερισμού στο δωμάτιο του ΜΟΑ. Η πρώτη ομάδα μετρήσεων ολοκληρώθηκε στο χρονικό διάστημα 2009-2011 και περιλάμβανε μετρήσεις σε δέκα άτομα. Εκτός από τη μέτρηση στο ΜΟΑ, κάθε εθελοντής μετρήθηκε στο εργαστήριο Πυρηνικής Ιατρικής του ΓΠΠΝΙ με τη μέθοδο της απορροφησιμετρίας διπλής ενέργειας ακτίνων-X (DXA). Οι εν λόγω μετρήσεις έγιναν με τη χρήση του διάταξη τύπου Discovery W κατασκευής Hologic και αφορούσαν τον προσδιορισμό παραμέτρων της σύστασης του σώματος, όπως η οστική πυκνότητα και μάζα καθώς και η αναλογία λιπώδους και άλιπης μάζας (FFM) στον εξεταζόμενο. Ο Πίνακας 9.1 αναφέρει πληροφορίες σχετικά με τους εθελοντές που μετρήθηκαν με τις δύο μεθόδους. Στην 6^η και 7^η στήλη του Πίνακα αναφέρονται οι αποδόσεις ανίχνευσης φωτονίων στην περιοχή των 1.46 MeV, οι οποίες υπολογίστηκαν με χρήση της εξίσωσης 8.1 και των δεδομένων του Πίνακα 8.4, που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 8 και εκφράζουν την σχέση της απόδοσης ανίχνευσης της ενέργειας στην περιοχή 1.46 MeV για ενεργειακό παράθυρο 25 καναλιών, ως συνάρτηση του ύψους και της μάζας του ατόμου.

Οι μετρήσεις στο ΜΟΑ έγιναν με σάρωση του εξεταζόμενου για συνολικό μήκος $L=12$ m (3 ορθές και τρεις ανάστροφες σαρώσεις) με ρύθμιση του ρολογιού του MCA σε λειτουργία Preset Live=2100 s. Οι ανιχνευτές τροφοδοτούνταν με υψηλή τάση $HV=950$ V και η ενίσχυση σήματος ρυθμίστηκε ώστε η κορυφή του ^{40}K να καταγράφεται στο κανάλι 200 του φάσματος. Για κάθε κύρια μέτρηση εθελοντή με τον ΜΟΑ έγινε μέτρηση ομοιώματος υποστρώματος παρομοίων γεωμετρικών

χαρακτηριστικών. Η σειρά διεξαγωγής της κύριας μέτρησης και της αντίστοιχης μέτρησης του υποστρώματος ήταν τυχαία.

Πίνακας 9.1: Δεδομένα των εθελοντών που μετρήθηκαν στον ΜΟΑ κατά την περίοδο 2009-2011 (φυσική εναλλαγή αέρα)

Αριθμός εξετα- ζόμενου	Φύλο	Ηλικία (y)	Ύψος (cm)	Μάζα (g)	1 ^η απόδοση	2 ^η απόδοση	Αριθμός μετρή- σεων
1	Θύλη	29.0	171	81000	0.009679	0.009968	2
2	Θύλη	28.5	173.0	69500	0.009864	0.010151	2
3	Θύλη	27.5	154.0	57750	0.009961	0.010253	2
4	Θύλη	22.0	153.0	60400	0.009847	0.010139	2
5	Θύλη	26.2	150.0	54000	0.009976	0.010268	2
6	Άρρεν	30.0	174.0	74700	0.009789	0.010077	2
7	Άρρεν	59.0	167.5	95072	0.009283	0.009569	4
8	Θύλη	26.0	172.0	56273	0.010036	0.010319	1
9	Άρρεν	23.0	176.0	77159	0.009748	0.010035	1
10	Θύλη	53.0	163.0	113150	0.008487	0.008758	1

Από κάθε μέτρηση ανθρώπου ή ομοιώματος προέκυψαν δεκαέξι φάσματα, ένα για κάθε ανιχνευτή. Σε κάθε φάσμα εντοπίστηκε με τη χρήση της ενεργειακής βαθμονόμησης η κορυφή του ^{40}K και έγινε άθροιση των παλμών που κατεγράφησαν ενεργειακό παράθυρο 1372 keV-1547 keV (25 καναλιών). Η μέθοδος ανάλυσης των μετρήσεων περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4. Εκτός από την κορυφή του ^{40}K , έγινε εντοπισμός και καταγραφή των παλμών στην ενεργειακή περιοχή 1691 keV-1832 keV (20 καναλιών), γύρω από την κορυφή των 1764 keV του ^{214}Bi .

Μετά την εγκατάσταση του συστήματος εξαναγκασμένου αερισμού στο δωμάτιο του ΜΟΑ πραγματοποιήθηκε από την Παλλάδα κατά το χρονικό διάστημα Σεπτέμβριος 2011 – Μάιος 2012 σε 38 εθελοντές διαφόρων ηλικιών και σωματότυπων (Πίνακας 9.2) διπλές μετρήσεων με τον ΜΟΑ και ισάριθμες απλές μετρήσεων ΔΧΑ. Από τους εθελοντές, οι 18 ήταν γυναίκες μέσης ηλικίας 37 ± 16 y και μάζας σώματος 67 ± 15 kg και οι 20 άνδρες μέσης ηλικίας (34 ± 17) y και μάζας σώματος (84 ± 19) kg). Οι συγκεκριμένες μετρήσεις διεξήχθησαν σε συνθήκες λειτουργίας του συστήματος εξαναγκασμένου αερισμού στο δωμάτιο του ΜΟΑ για την μείωση των επιπέδων ^{222}Rn στο χώρο του μετρητή (βλέπε Κεφάλαιο 6)

Πίνακας 9.2: Δεδομένα των εθελοντών που μετρήθηκαν στον ΜΟΑ από την Σ. Παλλάδα κατά το χρονικό διάστημα 2001- 2012 (εξαναγκασμένη εναλλαγή αέρα)

Αριθμός εξετα- ζόμενου	Φύλο	Ηλικία (y)	Ύψος (cm)	Μάζα (g)	1 ^η απόδοση (μέση τιμή)	2 ^η απόδοση (ολοκλή- ρωμα)	Αριθμός μετρή- σεων
1	Άρρεν	25	179.0	83823	0.009658	0.009943	2
2	Άρρεν	65	180.0	90223	0.009588	0.009873	2
3	Θύλη	61	163.0	79624	0.009555	0.009845	2
4	Θύλη	20	167.0	67363	0.009908	0.010198	2
5	Άρρεν	25	175.0	102663	0.009337	0.00962	2
6	Θύλη	40	155.0	48318	0.010263	0.010553	2
7	Θύλη	24	176.0	76828	0.009752	0.010039	2
8	Άρρεν	51	181.0	77943	0.009683	0.009966	2
9	Άρρεν	24	178.0	90313	0.009584	0.009869	2
10	Θύλη	26	166.0	50913	0.010206	0.010491	2
11	Θύλη	20	160.0	54086	0.010158	0.010448	2
12	Άρρεν	59	167.5	95073	0.009283	0.009569	2
13	Θύλη	23	158.0	52290	0.010188	0.010478	2
14	Άρρεν	26	183.0	85760	0.009604	0.009887	2
15	Θύλη	40	150.0	61617	0.009698	0.00999	2
16	Άρρεν	74	169.0	79986	0.009674	0.009964	2
17	Άρρεν	24	170.0	63413	0.009972	0.010259	2
18	Άρρεν	23	175.5	98731	0.009423	0.009707	2
19	Άρρεν	24	183.0	59958	0.00967	0.009943	2
20	Θύλη	40	155.0	62684	0.009831	0.010123	2
21	Άρρεν	20	175.0	95597	0.00947	0.009755	2
22	Άρρεν	25	181.0	91982	0.009569	0.009853	2
23	Θύλη	54	160.0	83557	0.009335	0.009624	2
24	Άρρεν	51	176.0	81725	0.009692	0.009979	2

Πίνακας 9.2: (συνέχεια)

Αριθμός εξετα- ζόμενου	Φύλο	Ηλικία (y)	Ύψος (cm)	Μάζα (g)	1 ^η απόδοση (μέση τιμή)	2 ^η απόδοση (ολοκλή- ρωμα)	Αριθμός μετρή- σεων
25	Θύλη	51	169.0	87145	0.00952	0.009808	2
26	Άρρεν	25	189.0	86345	0.009482	0.009759	2
27	Άρρεν	19	177.0	80028	0.009709	0.009996	2
28	Θύλη	22	161.0	54885	0.010145	0.010435	2
29	Άρρεν	26	187.0	92705	0.009516	0.009796	2
30	Άρρεν	27	186.0	81184	0.009563	0.009842	2
31	Θύλη	61	161.5	70476	0.009764	0.010056	2
32	Θύλη	27	164.0	54413	0.010158	0.010446	2
33	Θύλη	21	166.0	94338	0.009248	0.009534	2
34	Άρρεν	35	180.0	118833	0.009175	0.009447	2
35	Άρρεν	56	165.0	76310	0.009688	0.009979	2
36	Θύλη	61	160.0	86720	0.009233	0.009521	2
37	Θύλη	24	161.0	63058	0.009948	0.010239	2
38	Θύλη	54	156.0	63302	0.009839	0.010131	2

B. Μετρήσεις σε ασθενείς με ^{153}Sm - EDTMP

Στο πλαίσιο ελέγχου της απόκρισης του συστήματος σε συνθήκες υψηλών ρυθμών εκπομπής παλμών, μετρήθηκαν δύο ασθενείς με πολλαπλές οστικές μεταστάσεις λόγω καρκίνου στον προστάτη, που είχαν υποβληθεί πριν από τρεις εβδομάδες σε αναλγητική θεραπεία με ενδοφλέβια χορήγηση ~ 2.6 GBq ^{153}Sm -EDTMP (εμπορική ονομασία Quadramet) μέσω της ακτινοβολίας β^- μέσης ενέργειας 0.23 MeV, που εκπέμπει το βραχύβιο ^{153}Sm (IAEA Criteria for palliation therapy of bone metastasis-clinical considerations, IAEA-TECDOC-1549, Vienna, 2007). Σύμφωνα με τον κατασκευαστή (CIS BIO, France) και την λοιπή βιβλιογραφία παρατηρείται μεγάλη διασπορά στην σκελετική πρόσληψη μεταξύ των ασθενών, της τάξης των $(65 \pm 15)\%$ δέκα ώρες μετά τη χορήγηση.

Ασθενείς: Στον πρώτο ασθενή χορηγήθηκαν 2.57 GBq ^{153}Sm στις 22 Μαρτίου 2012. Ο εν λόγω ασθενής είχε οστικές οστεοβλαστικές μεταστάσεις ορατές σπινθηρογραφικά στα πλευρά και στους δυο ώμους, πολλαπλές στη σπονδυλική στήλη, εκτεταμένες στην πύελο, μια υποτροχαντήρια εστία στο αριστερό μηριαίο

και στην αριστερή επιγονατίδα. Κατά το χρόνο της μέτρησης, τρεις εβδομάδες μετά τη χορήγηση, είχε μάζα και ύψος σώματος 68 kg και 175 cm. Στον δεύτερο ασθενή, ηλικίας 81 ετών με μάζα και ύψος σώματος 68 kg και 160 cm, χορηγήθηκαν 2.47 GBq ^{153}Sm στις 25 Μαΐου 2012. Ο εν λόγω ασθενής είχε οστικές οστεοβλαστικές μεταστάσεις στο κρανίο (μικρές), δύο τουλάχιστον στη θωρακική μοίρα της σπονδυλικής στήλης, στα πλευρά, στα οστά του μηρού καθώς και σχεδόν σε όλο το μήκος της κνήμης και στα δυο πόδια και μετρήθηκε τρεις εβδομάδες μετά τη χορήγηση. Οι ασθενείς δεν είχαν υποβληθεί σε ακτινοθεραπεία με ακτίνες-X ενέργειας μεγαλύτερης των 6 MeV, ως εκ τούτου η ενεργότητα που βρέθηκε δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι σχετίζεται με ενεργοποίηση κατά την ακτινοβόληση.

Ραδιοφάρμακο: Για τον έλεγχο της ραδιοισοτοπικής σύστασης του χορηγηθέντος φαρμάκου έγινε μέτρηση υπολειμμάτων του φαρμάκου που χορηγήθηκε στον δεύτερο ασθενή με σύστημα φασματοσκοπίας υψηλής διακριτικής ικανότητας HPGe του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος. Οι πρώτες μετρήσεις των υπολειμμάτων έλαβαν χώρα την ημέρα χορήγησης και επαναλήφθηκαν την ημέρα μέτρησης του ασθενούς με τον ΜΟΑ.

Γ. Μετρήσεις Ακτινοπροστασίας

Στο πλαίσιο ελέγχων ακτινοπροστασίας επαγγελματικά εκτιθέμενων μελών του

πληθυσμού διενεργήθηκαν δειγματοληπτικές μετρήσεις για την ανίχνευση εσωτερικών και εξωτερικών ραδιομολύνσεων σε εργαζόμενους που χρησιμοποιούσαν ανοιχτές ραδιενεργές πηγές. Μετρήθηκαν τρεις ιατροί και ένας φυσικός νοσοκομείου που απασχολούνται σε εργαστήριο Πυρηνικής Ιατρικής και ένας εργαζόμενος στο εργαστήριο του Ερευνητικού Αντιδραστήρα του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν σύμφωνα με τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις του ολόσωμου καλίου.

9.4 Αποτελέσματα

Α. Μετρήσεις ^{40}K και ^{214}Bi

Ο Πίνακας 9.3 περιέχει τον αριθμό των παλμών που καταμετρήθηκαν σε δέκα ενήλικες εθελοντές (Πίνακας 9.1) στα ενεργειακά παράθυρα του ^{40}K (1.37 – 1.55 MeV) και του ^{214}Bi (1.69 – 1.84 MeV) με φυσικό εξαερισμό της αίθουσας κανονικοποιημένο για διάρκεια μέτρησης (live time) στα 2000 s. Η ανάλυση των μετρήσεων έγινε σύμφωνα με την μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4. Η 6^η του Πίνακα περιέχει τον αριθμό παλμών που προέκυψε από την αφαίρεση των παλμών υποστρώματος από τους παλμούς της κύριας μέτρησης, ενώ η 7^η στήλη παρουσιάζει τον διορθωμένο αριθμό παλμών στην ενεργειακή περιοχή 1.69 ως 1.84 MeV, σύμφωνα με την μεθοδολογία που προτείνεται στο Κεφάλαιο 4 και τα συμπεράσματα που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6.

Πίνακας 9.3: Αποτελέσματα μετρήσεων εθελοντών χωρίς εξαναγκασμένο αερισμό της αίθουσας (2009-2011)

Αριθμός εξεταζό- μενου	Αριθμός παλμών ⁴⁰ K κύριας μέτρησης	Αριθμός παλμών ²¹⁴ Bi κύριας μέτρησης	Αριθμός παλμών ⁴⁰ K υποστρώ- ματος	Αριθμός παλμών ²¹⁴ Bi υποστρώ- ματος	Καθαρός αριθμός παλμών ⁴⁰ K	Διορθωμέ- νος καθα- ρός αριθ- μός παλμών
1	25848	6462	19383	6779	6465	6797
	25570	5942	19408	6632	6162	6884
2	25499	6013	19561	6188	5938	6121
	26494	6867	20435	7157	6059	6363
3	24742	6352	19654	6717	5088	5470
	27120	8377	21630	8760	5490	5891
4	24291	6012	19260	6428	5031	5466
	24497	6280	19523	6421	4974	5122
5	23901	5889	20057	6807	3844	4805
	23705	5921	19232	6234	4473	4801
6	27480	6369	18520	6147	8960	8728
	27432	6094	18303	6252	9129	9294
	25130	5537	17290	5495	7840	7796
7	25933	6179	18830	6376	7103	7309
	26927	6414	18692	6134	8235	7942
8	26878	6538	19296	6723	7582	7776
	25786	6434	19549	6766	6237	6585
9	28415	7656	19800	7267	8615	8208
10	26625	7926	19360	7416	7265	6731

Υπολογίστηκαν η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας των παλμών στην περιοχή του ⁴⁰K με χρήση των σχέσεων που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6 και αναφέρονται στην περίπτωση διπλών μετρήσεων (εξεταζόμενοι 1-7). Τα στατιστικά μεγέθη προσδιορίστηκαν τόσο για την περίπτωση των πρωτογενών

δεδομένων, όσο και για την περίπτωση όπου οι παλμοί ^{40}K διορθώθηκαν με βάση τους παλμούς που καταγράφηκαν στην ενεργειακή περιοχή 1.69 ως 1.84 MeV. Με αυτόν τον τρόπο βρέθηκε πειραματική και θεωρητική τυπική απόκλιση στα πρωτογενή δεδομένα 323 και 212 c, που συνεπάγονται συντελεστές μεταβλητότητας 5.04 % και 3.32 %, αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά λαμβάνοντας υπόψη τους εκπομπούς φωτονίων μεγάλης ενέργειας, όπως το ^{214}Bi στο ενεργειακό παράθυρο του καλίου, τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας του αριθμού των παλμών ισούνται με 243 c και 3.65 %, αντίστοιχα. Σύγκριση με t-test ανά ζεύγη των διορθωμένων τιμών με τις αντίστοιχες διορθωμένες, έδειξε ότι οι διορθωμένες διαφέρουν στατιστικά σημαντικά από τις μη διορθωμένες ($p=0.025$) και είναι κατά μέσο όρο ~3% μεγαλύτερες των μη διορθωμένων.

Ο Πίνακας 9.4 παρουσιάζει το μέσο ρυθμό καθαρών ($2^{\text{η}}$ στήλη) και το μέσο ρυθμό διορθωμένων καθαρών παλμών ($3^{\text{η}}$ στήλη) που υπολογίζεται από τις διπλές μετρήσεις. Η $4^{\text{η}}$ και $5^{\text{η}}$ στήλη αναγράφουν την ποσότητα γραμμαρίων καλίου που υπολογίζεται για κάθε εξεταζόμενο με βάση τη σχέση:

$$M_K = \frac{\text{Rate}}{(\text{αποδοση} \times 3.3077)} \quad (9.5)$$

όπου M_K η ποσότητα TBK του εξεταζόμενου, Rate ο μέσος καθαρός ρυθμός παλμών ή ο μέσος διορθωμένος καθαρός ρυθμός παλμών στην περιοχή των 1.46 MeV σε cps και 3.3077 είναι ο ρυθμός εκπομπής φωτονίων 1.46 MeV ανά g K [IAEA 1989], ενώ η ανιχνευτική απόδοση εκφράζεται ως ο αριθμός των καταμετρούμενων φωτονίων στο ενεργειακό παράθυρο του καλίου ανά εκπεμπόμενο φωτόνιο ενέργειας 1.46 MeV. Η ολόσωμη ποσότητα καλίου που αναγράφεται στην $4^{\text{η}}$ και $5^{\text{η}}$ στήλη του Πίνακα υπολογίστηκε βάση των τιμών απόδοσης της $6^{\text{η}}$ στήλης του Πίνακα 9.1, ενώ η $6^{\text{η}}$ και $7^{\text{η}}$ στήλη αναγράφουν την ποσότητα καλίου με βάση τις τιμές απόδοσης της $7^{\text{η}}$ στήλης του Πίνακα 9.1.

Ο Πίνακας 9.5 παρουσιάζει τα αποτελέσματα που αφορούν τη μέτρηση της άλιπης μάζας των εξεταζόμενων με τη μέθοδο DXA, ενώ οι στήλες 3 και 4 την ολόσωμη ποσότητα καλίου με βάση τα μοντέλα του Kehayias και Mackie, αντίστοιχα.

Πίνακας 9.4: Οι μέσοι ρυθμοί παλμών ^{40}K και οι υπολογιζόμενες ποσότητες καλίου στους εθελοντές (μετρήσεις χωρίς εξαναγκασμένο αερισμό)

Αριθμός εξεταζόμενου	Μέσος καθαρός ρυθμός παλμών ^{40}K (cps)	Μέσος διορθωμένος καθαρός ρυθμός παλμών ^{40}K (cps)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 1 (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 2 (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 3 (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 4 (g)
1	3.157	3.421	98.61	95.75	106.84	103.74
2	3.000	3.121	91.93	89.33	95.66	92.95
3	2.645	2.840	80.26	77.97	86.19	83.74
4	2.502	2.647	76.80	74.59	81.27	78.93

Πίνακας 9.4:(συνέχεια)

Αριθμός εξεταζόμε- νου	Μέσος καθαρός ρυθμός παλμών ⁴⁰ K (cps)	Μέσος δι- ορθωμένος καθαρός ρυθμός παλμών ⁴⁰ K (cps)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 1 (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 2 (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 3 (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 4 (g)
5	2.080	2.402	63.02	61.23	72.78	70.71
6	4.523	4.506	139.67	135.69	139.14	135.18
7	3.845	3.853	125.22	121.48	125.48	121.73
8	3.119	3.293	93.94	91.36	99.18	96.46
9	4.308	4.104	133.59	129.78	127.28	123.65
10	3.633	3.366	129.39	125.39	119.88	116.17

Πίνακας 9.5: Η ολόσωμη άλιπη μάζας (FFM) και ολόσωμη ποσότητα καλίου σύμφωνα με τις μετρήσεις με DXA στην πρώτη ομάδα εξετασθέντων

Αριθμός εξεταζόμενου	Ολόσωμη άλι- πη μάζα (g)	Ολόσωμη ποσότητα K μοντέλο <i>Keayias</i> (g)	Ολόσωμη ποσότητα K μοντέλο <i>Mackie</i> (g)
1	48313	111.3	108.8
2	45892	105.9	103.4
3	38396	89.0	86.5
4	37167	87.8	83.7
5	33090	77.0	74.6
6	56934	136.4	144.2
7	54959	120.2	139.2
8	43233	89.4	97.4
9	55752	136.3	141.2
10	61219	128.6	137.9

Πίνακας 9.6: Αποτελέσματα μετρήσεων καλίου με εξαναγκασμένο αερισμό [Παλλάδα, 2012]

Αριθμός εξεταζόμε- νου	Αριθμός παλμών ⁴⁰ K κύριας μέτρησης	Αριθμός παλμών ²¹⁴ Bi κύριας μέτρησης	Αριθμός παλμών ⁴⁰ K υποστρώ- ματος	Αριθμός παλμών ²¹⁴ Bi υποστρώ- ματος	Καθα- ρός αριθμός παλμών ⁴⁰ K	Διορθωμέ- νος καθαρός αριθμός παλμών
1	28709	5915	17995	5328	10714	10100
	28640	5539	18332	5520	10308	10288
2	26137	5500	17941	5184	8195	7865
	26089	5446	17840	5109	8249	7896
3	24068	5459	18101	5374	5967	5878
	24050	5419	18151	5267	5899	5740
4	25442	5480	18027	5175	7415	7096
	25402	5324	18250	5535	7152	7373
5	28551	5518	17018	4860	11534	10844
	28076	5464	17185	4863	10891	10262
6	23904	5838	18656	5319	5248	4705
	24073	5551	18554	5207	5519	5159
7	24556	5463	17647	5095	6909	6524
	24969	5352	17562	5092	7407	7135
8	28462	6987	18003	5387	10459	8784
	27844	6327	18056	5410	9788	8828
9	28038	5700	17539	5383	10499	10167
	28187	5721	17533	5171	10654	10078
10	24996	5396	18255	5176	6741	6511
	24907	5645	18239	5377	6668	6387
11	24914	5699	18425	5386	6489	6161
	25235	5687	18650	5470	6585	6358

Πίνακας 9.6: (συνέχεια)

Αριθμός εξεταζόμε- νου	Αριθμός παλμών ⁴⁰ K κύριας μέτρησης	Αριθμός παλμών ²¹⁴ Bi κύριας μέτρησης	Αριθμός παλμών ⁴⁰ K υποστρώ- ματος	Αριθμός παλμών ²¹⁴ Bi υποστρώ- ματος	Καθα- ρός αριθμός παλμών ⁴⁰ K	Διορθωμέ- νος καθαρός αριθμός παλμών
12	26187	5980	17398	5062	8789	7828
	25899	6107	17583	5238	8316	7406
13	23545	5222	17928	4922	5617	5303
14	23455	5264	18175	5163	5280	5174
	27880	5352	17645	5068	10235	9938
	28187	5508	17668	5202	10519	10199
15	24234	5768	18832	5554	5402	5178
	24257	5723	18401	5366	5856	5482
16	26166	5635	17720	5134	8447	7922
	26322	5454	18127	5079	8195	7802
17	27467	5694	18034	5322	9433	9044
	27316	5540	18372	5386	8944	8783
18	28481	5559	17335	4916	11146	10473
	28782	5370	17451	4984	11331	10927
19	27174	5700	18225	5057	8948	8276
	26939	5562	17876	5146	9062	8628
20	24024	5681	18663	5458	5361	5128
	23654	5648	18517	5532	5137	5016
21	28399	5792	17834	5218	10565	9964
	27907	5617	18171	5233	9736	9334
22	27966	6067	17935	5584	10031	9525
	28139	5822	17882	5575	10257	9998

Πίνακας 9.6: (συνέχεια)

Αριθμός εξεταζόμε- νου	Αριθμός παλμών ⁴⁰ K κύριας μέτρησης	Αριθμός παλμών ²¹⁴ Bi κύριας μέτρησης	Αριθμός παλμών ⁴⁰ K υποστρώ- ματος	Αριθμός παλμών ²¹⁴ Bi υποστρώ- ματος	Καθα- ρός αριθμός παλμών ⁴⁰ K	Διορθωμέ- νος καθαρός αριθμός παλμών
23	25456	5413	17989	5234	7467	7280
	25430	5476	17948	5166	7481	7158
24	28697	5371	17825	5185	10873	10677
	28498	5337	17950	5333	10548	10544
25	24997	5806	17910	5359	7087	6619
	25002	5525	17678	5135	7324	6916
26	30638	6051	17514	5240	13124	12275
	30430	5683	17700	5162	12731	12185
27	27586	5537	17872	5139	9714	9297
	27469	5413	17605	5098	9864	9534
28	24374	5438	18277	5141	6097	5786
	24517	5422	18397	5370	6120	6066
29	29685	5503	17478	5105	12207	11790
30	29898	5964	18014	5186	11884	11070
	30059	6078	18054	5465	12005	11363
31	24748	5625	18435	5350	6314	6025
	24560	5436	18188	5351	6372	6283
32	24867	5621	18289	5350	6577	6294
	24527	5496	18642	5134	5885	5506
33	25413	5283	17548	5134	7865	7709
	25354	5380	17525	5023	7829	7455
34	29259	5457	17402	4865	11857	11237
	29591	5391	17476	5008	12115	11714

Πίνακας 9.6: (συνέχεια)

35	26268	5845	17760	5053	8507	7679
	26422	5489	17875	5122	8546	8163
36	24441	5723	17742	4995	6700	5937
	23960	5392	17809	5022	6151	5764
37	25568	6144	18240	5282	7328	6426
	25431	5720	18516	5293	6915	6468
38	24410	6100	18720	5459	5690	5019
	24268	5900	18823	5496	5445	5022

Ο Πίνακας 9.6 περιέχει τα αποτελέσματα των διπλών μετρήσεων που διενεργήθηκαν σε δείγμα 38 εθελοντών από την Παλλάδα [2012] με συνθήκες εξαναγκασμένου αερισμού του δωματίου του ΜΟΑ. Η πειραματική και η θεωρητική τυπική απόκλιση για τον καθαρό αριθμό παλμών που καταμετρήθηκαν στην περιοχή του ^{40}K (6^η στήλη ήταν 260 c και 211 c, αντίστοιχα, οι δε αντίστοιχοι συντελεστές μεταβλητότητας ήταν 3.07 % και 2.49 %. Λαμβάνοντας υπόψη τη συνεισφορά του ^{214}Bi στην κορυφή του ^{40}K , η επαναληπτικότητα και βελτιώθηκαν λίγο, στους 238 c και 2.96% αντίστοιχα.

Ο Πίνακας 9.7 παρουσιάζει το μέσο ρυθμό καθαρών παλμών (2^η στήλη) και το μέσο ρυθμό διορθωμένων καθαρών παλμών (3^η στήλη) που υπολογίζεται από τις διπλές μετρήσεις. Η 4^η και 5^η στήλη αναγράφουν την ποσότητα γραμμαρίων καλίου που υπολογίζεται για κάθε εξεταζόμενο με βάση την εξίσωση 9.5, χρησιμοποιώντας τις τιμές απόδοσης της 6^{ης} στήλης του Πίνακα 9.2 (μέσες τιμές), ενώ οι 6^η και 7^η με βάση τις τιμές 7^{ης} στήλης του Πίνακα 9.2 (ολοκλήρωμα).

Πίνακας 9.7: Οι μέσοι ρυθμοί παλμών ^{40}K και οι υπολογιζόμενες ποσότητες καλίου στους εθελοντές από τις μετρήσεις σε με εξαναγκασμένο εξαερισμό της αίθουσας.

Αριθμός εξεταζόμενου	Μέσος καθαρός ρυθμός παλμών ^{40}K (cps)	Μέσος διορθωμένος καθαρός ρυθμός παλμών ^{40}K (cps)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 1 (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 2 (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 3 (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 4 (g)
1	5.256	5.097	164.52	159.80	159.55	154.98
2	4.111	3.940	129.63	125.90	124.24	120.66
3	2.967	2.904	93.86	91.10	91.90	89.19

Πίνακας 9.7: (συνέχεια)

Αριθμός εξεταζό- μενου	Μέσος καθαρός ρυθμός παλμών ⁴⁰ K (cps)	Μέσος διορθω- μένος καθαρός ρυθμός παλμών ⁴⁰ K (cps)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 1 (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 2 (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 3 (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 4 (g)
4	3.642	3.617	111.12	107.96	110.37	107.23
5	5.606	5.277	181.51	176.19	170.84	165.83
6	2.692	2.466	79.29	77.11	72.64	70.64
7	3.579	3.415	110.95	107.79	105.86	102.84
8	5.062	4.403	158.04	153.56	137.48	133.58
9	5.288	5.061	166.82	162.00	159.66	155.05
10	3.352	3.225	99.31	96.61	95.52	92.93
11	3.269	3.130	97.27	94.58	93.15	90.56
12	4.276	3.809	139.26	135.11	124.03	120.33
13	2.724	2.619	80.84	78.61	77.73	75.58
14	5.189	5.034	163.32	158.66	158.46	153.94
15	2.815	2.665	87.74	85.17	83.08	80.65
16	4.160	3.931	130.01	126.23	122.85	119.28
17	4.594	4.457	139.29	135.38	135.11	131.33
18	5.619	5.350	180.28	175.01	171.65	166.63
19	4.503	4.226	140.78	136.91	132.12	128.49
20	2.625	2.536	80.71	78.38	77.98	75.73
21	5.075	4.825	162.02	157.29	154.02	149.52
22	5.072	4.881	160.24	155.63	154.21	149.77
23	3.737	3.609	121.03	117.40	116.89	113.38
24	5.355	5.305	167.04	162.24	165.49	160.74

Πίνακας 9.7: (συνέχεια)

Αριθμός εξεταζό- μενου	Μέσος καθαρός ρυθμός παλμών ⁴⁰ K (cps)	Μέσος διορθω- μένος καθαρός ρυθμός παλμών ⁴⁰ K (cps)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 1 (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 2 (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 3 (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου 4 (g)
25	3.603	3.384	114.41	111.05	107.46	104.30
26	6.464	6.115	206.09	200.23	194.97	189.44
27	4.895	4.708	152.40	148.04	146.59	142.40
28	3.054	2.963	91.02	88.49	88.29	85.84
29	6.277	6.006	199.40	193.71	190.83	185.38
30	5.972	5.608	188.81	183.46	177.31	172.28
31	3.171	3.077	98.19	95.34	95.27	92.51
32	3.116	2.950	92.73	90.18	87.80	85.38
33	3.924	3.791	128.26	124.42	123.93	120.22
34	5.993	5.738	197.47	191.78	189.06	183.62
35	4.264	3.960	133.05	129.17	123.59	119.99
36	3.213	2.925	105.19	102.01	95.78	92.89
37	3.561	3.223	108.22	105.14	97.96	95.18
38	2.784	2.510	85.54	83.07	77.14	74.91

Ο Πίνακας 9.8 παρουσιάζει τα αποτελέσματα που αφορούν τη μέτρηση της ολόσωμης άλιπης μάζας (FFM) των εξεταζόμενων με τη μέθοδο DXA. Η 3^η και 4 στήλη του πίνακα περιέχουν την εκτίμηση της ολόσωμης ποσότητας καλίου με βάση τα μοντέλα του Kehayias και Mackie, αντίστοιχα.

Πίνακας 9.8: Η ολόσωμη ποσότητα καλίου βάση των μετρήσεων ολόσωμης άλιπης μάζας (FFM) και καλίου (TBK) DXA, με εξαναγκασμένο αερισμό της αίθουσας

Αριθμός εξεταζόμενου	Ποσότητα άλιπου ιστού (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου- Μοντέλο Kehayias (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου- Μοντέλο Mackie (g)
1	61160	148.68	154.92

Πίνακας 9.8: (συνέχεια)

Αριθμός εξεταζόμενου	Ποσότητα άλιπου ιστού (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου- Μοντέλο Kehayias (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου- Μοντέλο Mackie (g)
2	62499	133.94	158.31
3	44758	90.95	100.84
4	45433	108.15	102.36
5	73609	178.94	186.45
6	33930	75.00	76.44
7	49518	116.19	111.56
8	57860	129.83	146.56
9	63013	153.64	159.61
10	38479	89.64	86.69
11	38915	92.64	87.68
12	54959	120.15	139.21
13	33037	77.80	74.43
14	64180	155.56	162.57
15	38101	84.22	85.84
16	56591	117.61	143.35
17	51402	125.33	130.20
18	70535	172.49	178.67
19	50099	122.15	126.90
20	37111	82.03	83.61
21	66688	164.52	168.92
22	64404	156.57	163.14
23	51987	108.73	117.13
24	62542	140.33	158.42

Πίνακας 9.8: (συνέχεια)

Αριθμός εξεταζόμενου	Ποσότητα άλιπου ιστού (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου- Μοντέλο Kehayias (g)	Ολόσωμη ποσότητα καλίου- Μοντέλο Mackie (g)
25	46063	97.51	103.78
26	75027	182.39	190.04
27	59025	146.04	149.51
28	38877	91.88	87.59
29	75028	181.85	190.05
30	67200	162.39	170.22
31	42736	86.84	96.28
32	38268	88.82	86.22
33	59871	142.01	134.89
34	81954	193.33	207.59
35	53791	118.76	136.25
36	47903	97.34	107.93
37	43287	101.57	97.53
38	36586	76.52	82.43

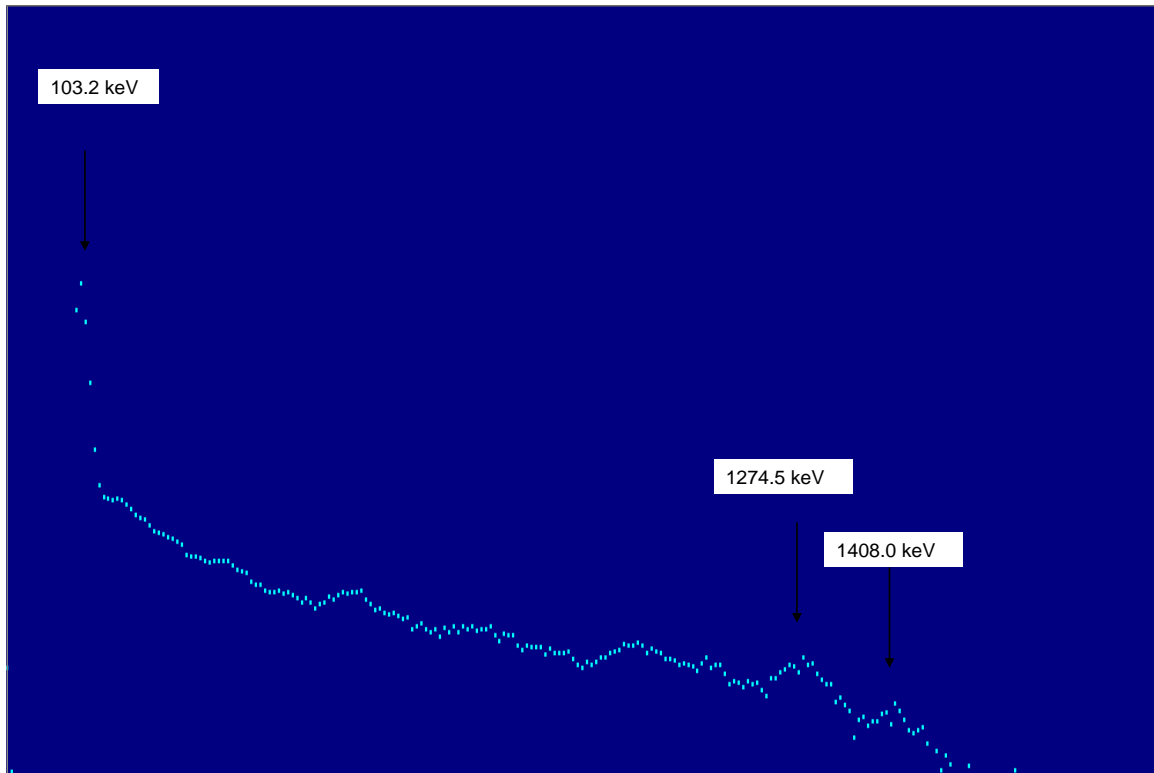
B. Μετρήσεις ασθενών με $^{153}\text{Sm-EDTM}$

Η επεξεργασία των φασμάτων των δυο ασθενών στους οποίους χορηγήθηκε το σύμπλοκο $^{153}\text{Sm-EDTMP}$ (Γαλλίας), ανέδειξε εκτός από την ακτινοβολία πέδησης, την ύπαρξη κορυφών με ενέργειες που δεν σχετίζονται με τη διάσπαση του ^{153}Sm . Ενδεικτικά στο Σχήμα 9.1 παρουσιάζεται το φάσμα του ανιχνευτή #9 του πρώτου εξεταζόμενου, ενώ στο 9.2 του δεύτερου. Στα φάσματα και των δύο εξεταζομένων παρατηρήθηκαν εκτός της κύριας κορυφής του ^{153}Sm (103 keV), επιπλέον φασματικές κορυφές, όπως αυτές ενέργειας ~1274.5 keV και 1408 keV. Η ταυτοποίηση των φωτοκορυφών που εντοπίστηκαν, ελέγχθηκε και με φασματοσκοπική ανάλυση υψηλής διακριτικής ικανότητας υπολείμματος του ραδιοφαρμάκου που χορηγήθηκε στο δεύτερο ασθενή. Στο φάσμα του υπολείμματος ραδιοφαρμάκου, Σχήμα 9.3, διακρίνονται κορυφές ίδιας ενέργειας με εκείνες που εντοπίστηκαν στο φάσμα των δύο ασθενών, θεωρήθηκε δε ότι οι κορυφές με ενέργεια

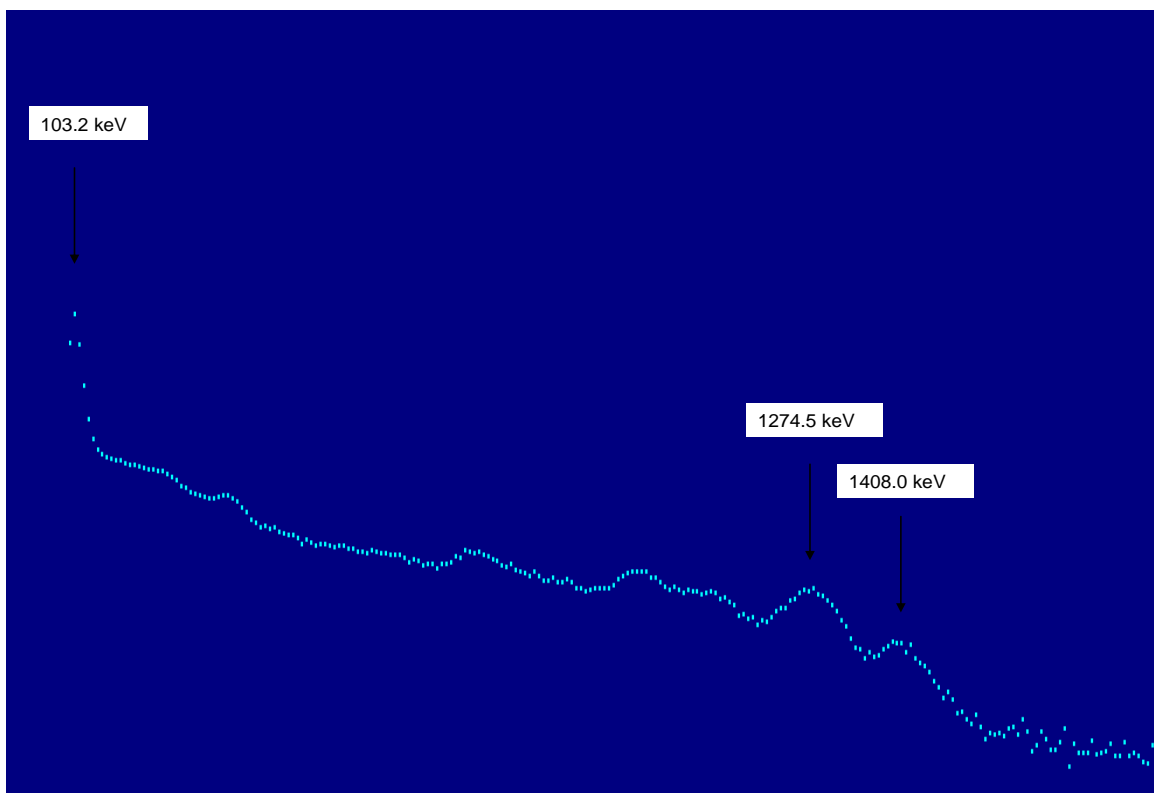
1274 keV και 1408 keV σχετίζονται με τα μακρόβια ισότοπα ^{152}Eu και ^{154}Eu , που έχουν χρόνο ημιζωής 13.3 και 8.5 y, αντίστοιχα. Σε κοντινή ενέργεια στην κορυφή 1274 keV του ^{154}Eu , εντοπίστηκαν στο φάσμα υπολείμματος κορυφές 1230 keV και 1242 keV του σχετικά βραχύβιου ^{156}Eu .

Πίνακας 9.9: Ενέργειες κορυφών που αναγνωρίστηκαν στο φάσμα υψηλής διακριτικής ικανότητας του ραδιοφαρμάκου

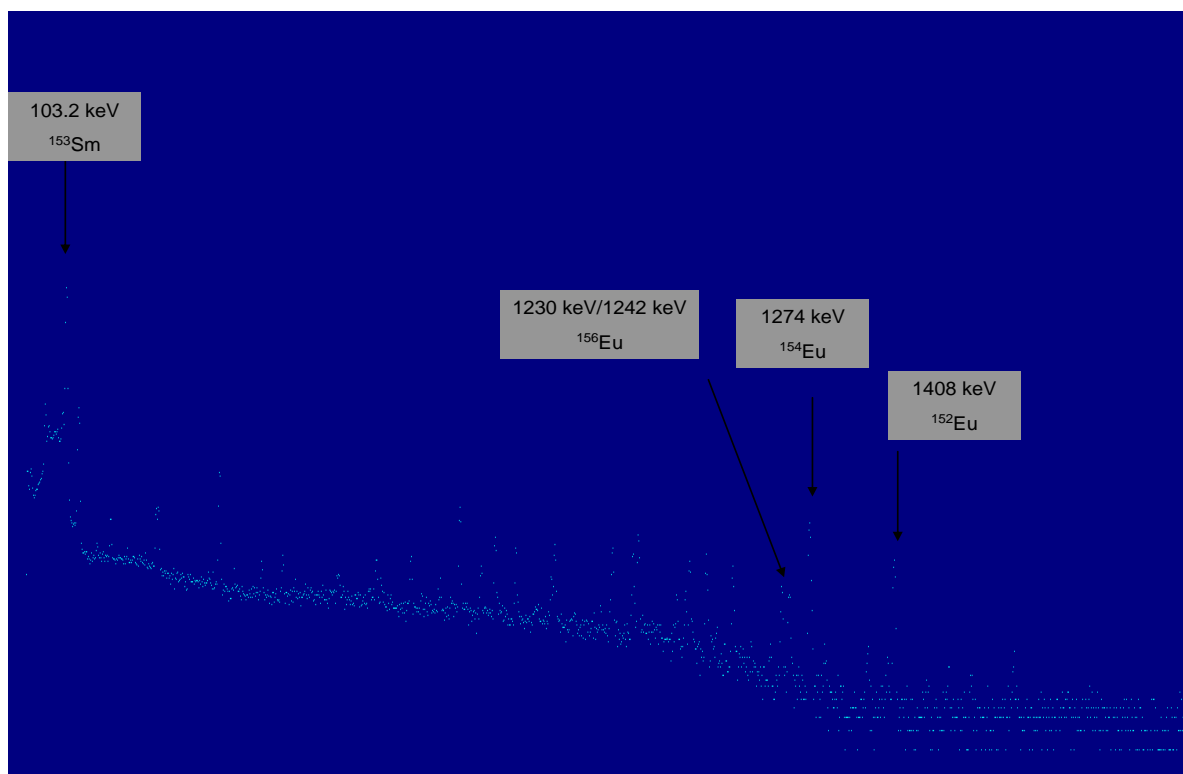
# Κορυφής	Ενέργεια κορυφής (keV)	Ραδιονουκλίδιο
1	47.54	^{153}Sm
2	69.7	^{153}Sm
3	102.94	^{153}Sm
4	122.79	^{152}Eu
5	172.65	^{153}Sm
6	244.66	^{152}Eu
7	247.89	^{154}Eu
8	344.37	^{152}Eu
9	646.28	^{156}Eu
10	723.37	$^{154}\text{Eu} / ^{156}\text{Eu}$
11	756.61	^{154}Eu
12	778.77	^{152}Eu
13	811.54	^{156}Eu
14	872.94	^{154}Eu
15	964.34	^{152}Eu
16	996.19	^{154}Eu
17	1004.5	^{154}Eu
18	1085.75	^{152}Eu
19	1112.06	^{152}Eu
20	1153.61	^{156}Eu
21	1230.7	^{156}Eu
22	1242.24	^{156}Eu
23	1274.56	^{154}Eu
24	1407.97	^{152}Eu



Σχήμα 9.1: Το φάσμα του πρώτου εξεταζόμενου από τον ανιχνευτή #9



Σχήμα 9.2: Το φάσμα του δεύτερου εξεταζόμενου από τον ανιχνευτή #9



Σχήμα 9.3: Φάσμα υψηλής διακριτικής ικανότητας υπολείμματος ραδιοφαρμάκου που χορηγήθηκε στον δεύτερο ασθενή 20 μέρες μετά τη χορήγηση

Ο Πίνακας 9.9 παρουσιάζει τις κυριότερες ενέργειες φωτοκορυφών που αναγνωρίστηκαν στο υπόλειμμα του ραδιοφαρμάκου καθώς και το ισότοπο στο οποίο αντιστοιχίστηκαν. Βρέθηκε ότι η ενεργότητα του ^{152}Eu είναι ίση 674 Bq, του ^{154}Eu 742 Bq και του ^{156}Eu 785 Bq ~20 ημέρες μετά τη χορήγηση. Άρα στο υπόλειμμα κατά το χρόνο της μέτρησης βρέθηκαν παρόμοιες ενεργότητες των τριών ισωτόπων που ευρωπίου. Λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο ημισείας ζωής κάθε ισωτόπου η αρχική ενεργότητα του ^{152}Eu και ^{154}Eu παρέμεινε πρακτικά αμετάβλητη, ενώ η αρχική ενεργότητα του ^{156}Eu προσδιορίστηκε περίπου στα 1980 Bq.

Στην περίπτωση μετρήσεων με MOA, για την ποσοτικοποίηση της ενεργότητας των μακρόβιων ραδιονουκλιδίων ^{154}Eu και ^{152}Eu , πραγματοποιήθηκε άθροιση των παλμών στις πολύ στενότερες του συνήθους 1222 ως 1325 keV (σχετίζεται κυρίως με τα φωτόνια ενέργειας 1246 και 1274 keV του ^{154}Eu που εκπέμπονται με συχνότητα ~1% και 35.5%, αντίστοιχα) και 1357 ως 1459 keV (σχετίζεται κυρίως με τα φωτόνια ενέργειας 1480 keV που εκπέμπονται με συχνότητα ~21% από το ^{152}Eu).

Εξαιτίας της προφανούς επικάλυψης των φωτοκορυφών τους πραγματοποιήθηκαν δύο χωριστές προσομοιώσεις με το ομοίωμα No 11 του Πίνακα 8.1 με ομοιόμορφα κατανομημένες πηγές ^{152}Eu και ^{154}Eu , με σκοπό τον προσδιορισμό της απόδοσης ανίχνευσης στα θεωρούμενα ενεργειακά παράθυρα και της συνεισφοράς της παρουσίας κάθε κορυφής στο ενεργειακό παράθυρο της γειτονικής. Οι διορθωμένες τιμές του ρυθμού παλμών δίνονται με τη χρήση των σχέσεων:

$$R_{152\text{Eu}}^{\text{cor}} = R_{152\text{Eu}} - a \cdot R_{154\text{Eu}}^{\text{cor}} \quad (9.6)$$

$$R_{154Eu}^{cor} = R_{154Eu} - b \cdot R_{152Eu}^{cor} \quad (9.7)$$

όπου

- R^{cor} ο διορθωμένος ρυθμός στο εκάστοτε ενεργειακό παράθυρο λόγω παρουσίας της διπλανής κορυφής,

- a ο αριθμός των καταγραφόμενων παλμών στο παράθυρο του ^{152}Eu ανά παλμό που καταγράφεται στο παράθυρο του ^{154}Eu και οφείλεται μόνο στο ^{154}Eu ,

- b ο αριθμός των καταγραφόμενων παλμών στο παράθυρο του ^{154}Eu ανά παλμό που καταγράφεται στο παράθυρο του ^{152}Eu και οφείλεται μόνο στο ^{152}Eu .

Οι τιμές R^{cor} για τα δύο ραδιονουκλιδίων προκύπτουν από την επίλυση του συστήματος εξισώσεων, 9.6 και 9.7.

Πίνακας 9.10: Δεδομένα των ενεργειών που χρησιμοποιήθηκαν για την Monte Carlo προσομοίωση των ασθενών με ομοιόμορφη κατανομή ^{152}Eu και ^{154}Eu (Reus U. και συν. [1983])

Ενέργεια εκπεμπόμενου φωτονίου ^{152}Eu (MeV)	Πιθανότητα εκπομπής %	Ενέργεια εκπεμπόμενου φωτονίου ^{154}Eu (MeV)	Πιθανότητα εκπομπής %
0.0395	21	0.0423	7.36
0.0401	38.1	0.043	13.2
0.0423	0.24	0.048	4.08
0.043	0.44	0.050	1.19
0.0454	10.7	0.1231	40.5
0.0466	4.2	0.1882	0.23
0.0487	0.12	0.2479	6.6
0.1218	28.4	0.4013	0.21
0.2447	7.51	0.4444	0.5
0.2959	0.44	0.4783	0.22
0.3294	0.12	0.5576	0.25
0.3443	26.6	0.582	0.84
0.3678	0.86	0.5918	4.83
0.4111	2.23	0.6252	0.31
0.4161	0.11	0.6766	0.14
0.444	3.12	0.6924	1.69
0.4887	0.41	0.7158	0.17
0.5034	0.15	0.7233	19.7
0.564	0.49	0.7569	4.33

Πίνακας 9.10: (συνέχεια)

Ενέργεια εκπεμπόμενου φωτονίου ¹⁵² Eu (MeV)	Πιθανότητα εκπομπής %	Ενέργεια εκπεμπόμενου φωτονίου ¹⁵⁴ Eu (MeV)	Πιθανότητα εκπομπής %
0.5664	0.13	0.8156	0.46
0.5863	0.46	0.8454	0.55
0.6565	0.14	0.8506	0.23
0.6747	0.17	0.8732	11.5
0.6786	0.47	0.8927	0.46
0.6887	0.85	0.904	0.82
0.7194	0.33	0.9963	10.3
0.7649	0.18	1.0048	17.9
0.7789	13	1.1185	0.1
0.8105	0.32	1.1284	0.27
0.8416	0.16	1.1409	0.22
0.8674	4.21	1.2416	0.13
0.9194	0.44	1.2462	0.9
0.9263	0.26	1.2745	35.5
0.9641	14.6	1.4944	0.65
1.0053	0.65	1.5965	1.83
1.0859	9.92	-	-
1.0897	1.71	-	-
1.1092	0.18	-	-
1.1121	13.6	-	-
1.2129	1.4	-	-
1.2499	0.18	-	-
1.2928	0.1	-	-
1.2991	1.63	-	-
1.408	20.8	-	-
1.4576	0.49	-	-
1.5281	0.26	-	-

Ο Πίνακας 9.11 παρουσιάζει τα δεδομένα που προέκυψαν από την ανάλυση των φασμάτων των δύο ασθενών. Η 3^η και 4^η στήλη παρουσιάζει τους καθαρούς ρυθμούς παλμών στα δυο «στενά» ενεργειακά παράθυρα που χρησιμοποιήθηκαν (~0.75

FWHM) χωρίς τη διόρθωση για τη συνεισφορά της διπλής κορυφής. Δεδομένου ότι η μέτρηση του πρώτου ασθενή παρουσίασε νεκρό χρόνο εκτός των ορίων σταθερής λειτουργίας του συστήματος, ~50% κατά μέσο όρο (75% στην περιοχή της μέσης, 72% στον θώρακα, 60% στην περιοχή της κεφαλής, 64% στην κοιλιά, 55% στο κεφάλι και 25% στα κάτω άκρα με μικρή αύξηση στα γόνατα όπου υπήρχε μετάσταση με έντονη οστεοβλαστική δραστηριότητα) έναντι 24% στον δεύτερο, έγινε διόρθωση του ρυθμού με βάση την καμπύλη σταθερής λειτουργίας 5.11 του Κεφαλαίου 5 (τιμές για τον 1ο ασθενή που παρουσιάζονται σε παρένθεση στις στήλες 3 και 4 είναι οι αδιόρθωτες και χωρίς παρένθεση οι διορθωμένες). Οι στήλες 5^η και 6^η του πίνακα παρουσιάζουν τις διορθωμένες τιμές ρυθμού για την συνεισφορά της

Πίνακας 9.11: Πειραματικά δεδομένα φασμάτων ασθενών

Αριθμός εξεταζόμε- νου	Νεκρός χρόνος μέτρησης (%)	Ρυθμός καθαρών παλμών στην περιοχή 1223-1325 keV (cps)	Ρυθμός καθαρών παλμών στην περιοχή 1357-1459 keV (cps)	Διορθωμένος ρυθμός καθαρών παλμών ¹⁵⁴ Eu από κορυφή 1274 keV (cps)	Διορθωμένος ρυθμός καθαρών παλμών ¹⁵² Eu από κορυφή 1408 keV (cps)
1	65	165.0 (98.8)	80.6 (48.3)	136.4 (81.7)	56.5 (33.8)
2	24.4	151.5	75.5	124.4	53.4

Πίνακας 9.12: Αποτελέσματα αποδόσεων και ενεργότητα ¹⁵²Eu και ¹⁵⁴Eu στους δυο ασθενείς

Αριθμός Εξεταζόμενου	Απόδοση ανίχνευσης ¹⁵² Eu (%)	Απόδοση ανίχνευσης ¹⁵⁴ Eu (%)	Ενεργότητα ¹⁵² Eu (kBq)	Ενεργότητα ¹⁵⁴ Eu (kBq)
1	0.1605	0.2995	35.20 (21.06)	45.54 (27.28)
2	0.1605	0.2995	33.27	41.54

μιας κορυφής στην άλλη. Αγνοώντας τις διαφορές στο ύψος σώματος των δυο ασθενών (και οι δυο είχαν μάζα σώματος 68 kg) στην εκτίμηση της ανιχνευτικής απόδοσης, βρέθηκαν α) παρόμοιες αναλογίες ¹⁵²Eu και ¹⁵⁴Eu στους δυο ασθενείς, 0.77 και 0.80 αντίστοιχα, έναντι 0.91 στο δείγμα και β) κατά χρόνο της μέτρησης η συνολική ενεργότητα από τις δυο προσμίξεις ήταν 54 και 74 kBq, αντίστοιχα.

Γ. Μετρήσεις Ακτινοπροστασίας

Ανιχνεύθηκε ραδιορύπανση με ^{99m}Tc σε δύο από τους τρεις ειδικευόμενους ιατρούς στην Πυρηνική Ιατρική που μετρήθηκαν, και οι οποίοι νωρίτερα την ίδια ημέρα έκαναν χορηγήσεις ραδιοφαρμάκων επισημασμένων με ^{99m}Tc. Με σκοπό τον

εντοπισμό του σημείου της ρύπανσης έγινε συμπληρωματικός έλεγχος των εξεταζομένων με τη χρήση φορητού οργάνου ακτινοπροστασίας του Εργαστηρίου Ιατρικής Φυσικής Target Identifier. Η ρύπανση και στις δυο περιπτώσεις εντοπίστηκε σε περιοχή των κάτω άκρων και δεν είχε γίνει αντιληπτή από τους εργαζόμενους με το συνήθη τρόπο μέτρησης τους στο χώρο εργασίας τους.

Για την ποσοτικοποίηση του ^{99m}Tc , υπολογίστηκε η ανιχνευτική απόδοση φωτονίων ενέργειας 140 keV με χρήση του κώδικα MCNP5 σε δύο περιπτώσεις 1) ομοιόμορφη ολόσωμη βιοκατανομή και 2) σημειακή πηγή στην περιοχή του γόνατος, προσομοιάζοντας τους εργαζόμενους με το ομοίωμα #11 του κεφαλαίου 8 με πυκνότητα 1.0 g/cm^3 (Πίνακας 9.13). Οι συνολικές αποδόσεις υπολογίστηκαν με τη μέθοδο της ολοκλήρωσης των αποδόσεων στις επιμέρους θέσεις σάρωσης του ομοιώματος (βλέπε Κεφάλαιο 7), ο δε καθαρός ρυθμός παλμών στον ενεργειακό παράθυρο πλάτους επτά καναλιών 124 - 168 keV διορθώθηκε ως προς την συνεισφορά φωτονίων από το ^{40}K και ^{214}Bi το που ανιχνευθήκαν στους εξεταζόμενους, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4.

Πίνακας 9.13: Το αποτέλεσμα των μετρήσεων ακτινοπροστασίας σε εργαζόμενους

Εργαζόμενος	Καθαρός ρυθμός	Απόδοση ^{99m}Tc ολόσωμο μοντέλο	Απόδοση ^{99m}Tc σημειακό μοντέλο	Ποσότητα ολόσωμης ρύπανσης (Bq)	Ποσότητα σημειακής ρύπανσης (Bq)
1	20.6	2.330%	3.065%	884	672
2	49.0	2.330%	3.065%	2103	1599

9.5 Συζήτηση-Ανάλυση

A.1 Μετρήσεις ^{214}Bi

Οι μετρήσεις ^{40}K επηρεάζονται από την παρουσία ραδιονουκλιδίων που εκπέμπουν ακτινοβολία-γ και συμβάλλουν στο σήμα που αντιστοιχεί στο ενεργειακό παράθυρο που χρησιμοποιήθηκε, ~1.38 ως 1.55 MeV, όπως π.χ. η ακτινοβολία-γ ενέργειας 1.38, 1.385, 1.41, και 1.51 MeV του ^{214}Bi (παράγωγο της σειράς του ^{238}U μετά το ^{222}Rn) που υπάρχει σε χρονικά μεταβαλλόμενες ποσότητες στο φυσικό περιβάλλον, με συχνότητα ~4.0%, 0.8%, 2.5%, και 2.2%, αντίστοιχα, καθώς και εκπομπή ακτινοβολία-γ μεγαλύτερης ενέργειας που κατά τις αλληλεπιδράσεις με την ύλη μεταφέρουν ένα μόνο ποσοστό της ενέργειας τους στον ενεργό όγκο των ανιχνευτών, όπως η ακτινοβολία-γ ενέργειας 1.66, 1.73, 1.76, 1.85, 2.12, 2.20 και 2.45 MeV του ^{214}Bi που εκπέμπονται με συχνότητα ~1.2%, 3.1%, 15.9%, 2.1%, 1.2%, 5.0% και 1.5%, αντίστοιχα, 1.62, 2.61 και 6.78 MeV των παραγώγων του ^{238}Th μετά το βραχύβιο ραδόνιο-210 ^{212}Bi , ^{208}Tl και ^{216}Po , αντίστοιχα καθώς και η ακτινοβολία-γ ενέργειας 1.68 MeV του ^{41}Ar , που παράγεται με νετρονική ενεργοποίηση του αργού του αέρα (η αίθουσα του MOA συνορεύει με αίθουσα όπου φυλάσσονται

πηγές νετρονίων). Για τη μείωση της ποσότητας των εν λόγω εκπομπών ακτινοβολίας-γ μεγάλης ενέργειας μέσα στην αίθουσα, έγινε χρήση εξαναγκασμένης εναλλαγής του αέρα της αίθουσας με εισαγωγή αέρα από το φυσικό περιβάλλον. Για την εκτίμηση της συγκέντρωσης ραδονίου στο χώρο έγιναν τόσο βραχύχρονες όσο και μακρόχρονες μετρήσεις με ανιχνευτές που, που χορηγήθηκαν από την Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας [Παλλάδα, 2012].

Μακρόχρονες μετρήσεις ραδονίου στην αίθουσα με ανιχνευτές ιχνών CR-39 σε ημισφαιρικά πλαστικά κουτιά σχεδίασης SSI Σουηδίας από το Νοέμβριο του 2011 ως τα τέλη Φεβρουαρίου 2012 σε ύψη από το πάτωμα μεταξύ 0.9 και 1.2 m έδειξαν σε επτά σημεία της αίθουσας του MOA συγκεντρώσεις ^{222}Rn μέση τιμή 62 Bq/m^3 (εύρος $45 \text{ } 0 \text{ } 78 \text{ Bq/m}^3$) και κορυφαίες τιμές 77 και 78 Bq/m^3 και μέσα στο τούνελ κοντά στους παλιούς ανιχνευτές, όπου η κίνηση του αέρα είναι περιορισμένη (σημειώνεται ότι λόγω του μεγάλου χρονικού διαστήματος ήταν αδύνατη η συνεχής λειτουργία των ανεμιστήρων). Στο γειτνιάζον θωρακισμένο δωμάτιο βρέθηκε $\sim 120 \text{ Bq/m}^3$, και σε γραφείο του ίδιου ορόφου (ισόγειο) μετρήθηκε συγκέντρωση 62 Bq/m^3 . Δυο μετρήσεις στις αντίστοιχες αίθουσες του 1^ο ορόφου έδειξαν συγκέντρωση 103 και 122 Bq/m^3 , τιμές που δεν είναι σε σύγκρουση με την τιμή των 131 Bq/m^3 που βρέθηκε στον ίδιο χώρο ανιχνευτές electret σε διαφορετικό χρονικό διάστημα στις εν λόγω αίθουσες και στις οποίες δεν υπήρχε εξαναγκασμένη εναλλαγή αέρα. Επιπλέον με την ίδια μέθοδο έγιναν παράλληλα μετρήσεις σε πέντε τυπικές κατοικίες στην πόλη των Ιωαννίνων και βρέθηκε γεωμετρικός μέσος όρο συγκέντρωσης 95 Bq/m^3 . Οι τιμές που βρέθηκαν στο Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, δεν είναι σε σύγκρουση με το γεωμετρικό μέσο και τυπική απόκλιση 84 και 56 Bq/m^3 αντίστοιχα, που μετρήθηκαν στην Πανεπιστημιούπολη Ιωαννίνων από άλλους ερευνητές [Parachristodoulou, 2010] σε χρονικό διάστημα Νοέμβριο - Ιανουάριο).

Βραχύχρονες μετρήσεις με οκτώ ανιχνευτές electret τύπου E-PERM με ανιχνευτές πάχους 1.54 m, έδειξαν την πρώτη εβδομάδα του Ιανουαρίου του 2012 επί $\sim 150 \text{ h}$ συγκέντρωση ^{222}Rn στην αίθουσα του MOA 37.5 Bq/m^3 κατά μέσο όρο (εύρος 35.5 ως 41.5 Bq/m^3), που ήταν ομοιόμορφη μέσα στην αίθουσα του MOA όπου γίνονταν εξαναγκασμένη εισαγωγή αέρα και οι κλιματιστικές μονάδες ήταν λειτουργία. Παρόμοια μέτρηση επί $\sim 71 \text{ h}$ την πρώτη εβδομάδα του Νοεμβρίου 2011 χωρίς εξαναγκασμένο εξαερισμό αλλά με τις κλιματιστικές μονάδες σε λειτουργία, έδειξε συγκέντρωση ^{222}Rn 343 Bq/m^3 (σε αντίστοιχο χώρο στον 1^ον όροφο του κτιρίου που επίσης επικοινωνεί με τις δεξαμενές καθυστέρησης και συνορεύει επίσης με δυο παρόμοια κατασκευής θωρακισμένες αίθουσες ακτινοβολήσεων, μετρήθηκε συγκέντρωση 131 Bq/m^3). Ως εκ τούτου, η εξαναγκασμένη εισαγωγή αέρα μείωσε τη συγκέντρωση ραδονίου στη αίθουσα σχεδόν στο 1/10. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι Parachristodoulou και συν. [2010] μέτρησαν σε κτίρια της Πανεπιστημιούπολης Ιωαννίνων με ανιχνευτές electret τύπου E-PERM γεωμετρικό μέσο όρο και τυπική απόκλιση $84 \pm 56 \text{ Bq/m}^3$ αντίστοιχα τους μήνες Νοέμβριο ως Ιανουάριο, και $79 \pm 46 \text{ Bq/m}^3$ τους μήνες Μάιος-Ιούλιος

Σε συμφωνία με τις μετρήσεις ραδονίου με παθητικούς ανιχνευτές, βρέθηκε ότι ο εξαναγκασμένος αερισμός της αίθουσας του MOA με δημιουργία υποπίεσης στο εσωτερικό της αίθουσας και είσοδο αέρα από το υπαίθρο σε ύψος $\sim 3.4 \text{ m}$ από το έδαφος με τη βοήθεια ανεμιστήρων (βλέπε Κεφάλαιο 2) σε συνδυασμό με το σφράγισμα της διόδου του αέρα μεταξύ της αίθουσας και των υπόγειων δεξαμενών καθυστέρησης του Εργαστηρίου είχε σαν συνέπεια την μείωση των καταγραφόμενων παλμών στην εν λόγω περιοχή υψηλής ενέργειας στις μετρήσεις υποστρώματος κατά

~22% (από 6741 ± 1318 σε 52444 ± 201 c) στην οποία κυρίαρχο ρόλο θεωρείται ότι παίζει το ^{214}Bi καθώς και του συντελεστή μεταβλητότητας από 20% σε ~4% μόνο.

Πραγματοποιήθηκε απαραμετρικός στατιστικός έλεγχος Mann-Whitney του αριθμών παλμών μεταξύ των μετρήσεων των εθελοντών και των αντίστοιχών μετρήσεων των ομοιωμάτων υποστρώματος και για τις δύο ομάδες μετρήσεων (Πίνακες 9.3 και 9.6). Ο έλεγχος δεν έδειξε στατιστικά σημαντική διαφορά των παλμών των εξεταζομένων και υποστρώματος που καταγράφηκαν στην περίπτωση μη εξαναγκασμένης εναλλαγή αέρα ($p=0.15$), πιθανώς λόγω του μικρού μεγέθους του στατιστικού δείγματος και στο γεγονός ότι τα επίπεδα ^{214}Bi κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων ήταν ιδιαίτερα υψηλά και ασταθή με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται διαφοροποίηση στο ^{214}Bi στον άνθρωπο και στο περιβάλλον. Αντίθετα, στην περίπτωση των μετρήσεων με εξαναγκασμένη είσοδο αέρα από το περιβάλλον, η διαφορά ήταν στατιστικά σημαντική ($p<0.001$) και μάλιστα το μέσο πηλίκο του αριθμού των παλμών στο εν λόγω ενεργειακό παράθυρο στις μετρήσεις ανθρώπων και ομοιωμάτων ήταν 1.05 (5517 ± 842 c στους ανθρώπους και 5244 ± 201 c στο υπόστρωμα) με ιδιαίτερα μεγάλη τυπική απόκλιση, 0.161 , που σχετίζεται κυρίως από διαφορές σωματότυπου, πιθανώς δε φύλου μεταξύ των εξεταζομένων και η μη παραμονή του εξεταζομένου επί αρκετό χρόνο στην αίθουσα του MOA πριν από τη μέτρηση. Η στατιστικά σημαντική διαφορά που προέκυψε στην περίπτωση μετρήσεων με εξαναγκασμένη εναλλαγή αέρα και οι αυξημένες τιμές στις μετρήσεις ανθρώπων από αυτές του υποστρώματος υποδηλώνουν ότι ο εξεταζόμενος είναι και ο ίδιος φορέας ποσότητας ^{214}Bi , η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό της ολόσωμης ποσότητας καλίου. Αντίθετα, η έλλειψη στατιστικής διαφοράς που καταγράφεται στον έλεγχο των δεδομένων χωρίς εξαναγκασμένη εναλλαγή αέρα αποδίδεται στα υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας υποστρώματος που επικρατούσαν.

Η ύπαρξη θυγατρικών του ραδονίου μέσα στο ανθρώπινο σώμα και η επίδρασης της συγκέντρωσης τους στις μετρήσεις καλίου αναφέρεται και άλλους ερευνητές όπως τους Parthasarathy [1976] και Lykken και συν. [1990], οι οποίοι έκαναν χρήση MOA με 32 ανιχνευτές NaI(Tl) $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ σε θωρακισμένο δωμάτιο μετά το 1985. Για παράδειγμα, οι Parthasarathy [1974] καθώς και Momcilovic και Lykken [2007] παρατήρησαν εποχιακές μεταβολές του ^{214}Bi στους ανθρώπους παρόμοιες με τις μεταβολές του ^{222}Rn στο περιβάλλον, και μάλιστα οι τελευταίοι βρήκαν μέση συγκέντρωση μεγαλύτερη τη νύχτα από ότι την ημέρα κατά ~11%, και ότι η ποσότητα ^{14}Bi στις σχετίζεται με την ποσότητα λίπους στις γυναίκες αλλά όχι στους άνδρες. Οι Lykken και συν. [1983, 1989, 2000, 2007] βρήκαν η ενεργότητα σε ^{214}Bi σχετίζεται με τη συγκέντρωση ραδονίου στα υπνοδωμάτια, αύξηση της ποσότητας ^{214}Bi μετά από έντονη σωματική άσκηση. Επιπλέον βρήκαν το ^{214}Bi συγκεντρώνεται και σε περιοχές του σώματος με μεγάλη συγκέντρωση λίπους, όπως το κάτω μέρος της κοιλίας διότι το ραδόνιο διαλύεται εύκολα στο λίπος κυρίως ιδιαίτερα στον ανθρώπινο εγκέφαλο, διότι διαπερνά τον εγκεφαλονωτιαίο φραγμό και συνδέεται κυρίως με τις πρωτεΐνες των οποίων επηρεάζει τη δράση, και συσχέτισαν την εμφάνιση νευρολογικών παθήσεων με αυξημένη συγκέντρωση ραδονίου στις κατοικίες. Επιπλέον οι Lykken και συν. βρήκαν ότι κατά μέσο όρο αντιστοιχεί ειδική ραδιενέργεια ^{214}Bi 21 Bq/kg στο ανθρώπινο σώμα για κάθε 1 kBq/m^3 ^{222}Rn στον αέρα. Ως εκ τούτου, σε ένα άτομο μάζας σώματος 70 kg , η αναμενόμενη ολόσωμη ποσότητα ^{214}Bi να είναι της τάξης των 55 Bq σε εξεταζόμενο σε ισορροπία με το περιβάλλον του MOA του ΕΙΦΠ, και περίπου 140 Bq κατά μέσο όρο όταν είναι σε άλλους κτίρια της Πανεπιστημιούπολης Ιωαννίνων καθώς και σε κατοικίες στην περιοχή των Ιωαννίνων, όπου οι Ioannides και συν. μέτρησαν σε 87 κατοικίες μέση

τιμή ραδονίου στον αέρα 92 Bq/m^3 . Το εύρημα της αυξημένης κατά όγκο συγκέντρωσης του σώματος σε σχέση με τον αέρα κατά παράγοντα του είκοσι, υποδηλώνει ότι η μέτρηση σήματος υποστρώματος με ομοίωμα που δεν περιέχει ραδόνιο και τα θυγατρικά του, επιδρά λίγο στις μετρήσεις καλίου.

Δεδομένης της ύπαρξης ^{214}Bi και στον άνθρωπο, έγινε έλεγχος της επαναληψιμότητας των *in vivo* μετρήσεων της παρούσας μελέτης με διπλές μετρήσεις της δεύτερης ομάδας και βρέθηκε 44 % έναντι θεωρητικής τιμής 26%. Αποκλείοντας από την ανάλυση τα δεδομένα ενός άνδρα (No 8) και μια γυναίκας (No 25) που βρέθηκαν να έχουν στο σώμα τους υψηλά επίπεδα ^{226}Ra λόγω προηγούμενης πόσης «ιαματικού» νερού με υψηλή συγκέντρωση ραδίου, βρέθηκε μέσος ρυθμός παλμών στο ενεργειακό παράθυρο 1.69 – 1.84 MeV κατά την πρώτη μέτρηση διέφερε από αυτό κατά τη δεύτερη ($p < 0.001$) και ήταν κατά μέσο όρο $0.220 \pm 0.114 \text{ cps}$ κατά την πρώτη και $0.150 \pm 0.104 \text{ cps}$ κατά τη δεύτερη (στατιστικά σημαντική διαφορά βρέθηκε χωριστά τόσο στους άνδρες και όσο και στις γυναίκες) Ως εκ τούτου, βρέθηκε ότι η δεύτερη μέτρηση ήταν ~30% μικρότερη της πρώτης.

Η διαφορά μεταξύ των δυο διαδοχικών μετρήσεων αποδίδεται στο γεγονός ότι ο εξεταζόμενος μετακινήθηκε πριν από τη μέτρηση από μια περιοχή υψηλότερης συγκέντρωσης ραδονίου στον αέρα στην αίθουσα του MOA όπου η συγκέντρωση είναι περίπου 40% της μέσης τιμής σε άλλους χώρους της Πανεπιστημιούπολης ή κατοικιών στην πόλη των Ιωαννίνων και δεν παρέμεινε ο εξεταζόμενος επί αρκετό χρόνο στην αίθουσα του MOA πριν από τις μετρήσεις που συνήθως απείχαν χρονικά 35 ή 80 min, χρόνοι συγκρίσιμοι που τους βιολογικούς χρόνους ημιζωής που μετρήθηκαν από άλλους ερευνητές. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι Lykken και συν. [1989] βρήκαν σε ένα εθελοντή βιολογικό χρόνο ημιζωής ~60 min, όταν μετακινήθηκε σε περιοχή πρακτικά μηδενικής συγκέντρωσης ραδονίου και η διαδικασία της πέψης μειώνει το βιολογικό χρόνο ημιζωής. Από την άλλη πλευρά, οι Suomela και συν. [1972] βρήκαν στην περίπτωση κατανάλωσης νερού με υψηλή περιεκτικότητα σε ραδόνιο από εθελοντές άνδρες μέσω μετρήσεων ^{214}Bi , ότι η ενεργότητά του στο ανθρώπινο σώμα μειώνεται με βιολογικό χρόνο ημιζωής με μέση τιμή 37.5 min. (εύρος 30 - 50 min), Ως εκ τούτου, οι εν λόγω διπλές μετρήσεις δεν μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της επαναληψιμότητας των μετρούμενων ^{214}Bi . Μετρήσεις αυτού του είδους θα απαιτούσαν παραμονή στο χώρο πριν από τη μέτρηση επί τουλάχιστο 150 min, ώστε να επέλθει ισορροπία στο σώμα του με το περιβάλλον, ο εξεταζόμενος να φορά ρούχα καθαρά που θα του δίνονται στο εργαστήριο (ορισμένα ρούχα όπως αυτά από συνθετικές ίνες που παρουσιάζουν έντονη ηλεκτροστατική εναπόθεση ραδονίου κ.λ.π. [Balcazar και συν. 1999] και να πλένεται στο εργαστήριο για τη μείωση πιθανών εναποθέσεων στο δέρμα και στα μαλλιά του, πρακτικές που δεν εφαρμόστηκαν στην παρούσα μελέτη.

Υποθέτοντας ότι η ανιχνευτική απόδοση ^{214}Bi στο εν λόγω ενεργειακό παράθυρο που βρέθηκε με την τεχνική Monte Carlo για άνθρωπο μάζας και ύψους σώματος 78 kg και 181 cm, 0.186%, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλους τους εξετασθέντες και ότι το ^{214}Bi είναι η μόνη πηγή που συμβάλλει στις καταγραφόμενες κρούσεις στο ενεργειακό παράθυρο 1.69 - 1.84 MeV, το όριο ανιχνευσιμότητας με τις παρούσες συνθήκες είναι 90 Bq. Με αυτόν τον τρόπο βρέθηκε ότι κατά την πρώτη μέτρηση η μέση ραδιενέργεια ^{214}Bi στο σώμα των ανδρών ($143 \pm 56 \text{ Bq}$) ήταν μικρότερη ($p = 0.003$) της μέσης ραδιενέργειας στο σώμα των γυναικών ($90 \pm 56 \text{ Bq}$), που δεν διέφερα από τους άνδρες στατιστικά από πλευράς μέσης ηλικίας. Το εύρημα είναι ίδιο με αυτό από τις δεύτερες μετρήσεις ($98 \pm 85 \text{ Bq}$ και $62 \pm 48 \text{ Bq}$ αντίστοιχα, $p = 0.05$). Η κατά ~22% μέση διαφορά στη μάζα σώματος στις ομάδες εξετασθέντων

των δυο φύλων 84 ± 19 kg έναντι 66 ± 14 kg, εξηγεί εν μέρει την κατά $\sim 37\%$ διαφορά ενεργότητας και στις δυο σειρές μετρήσεων. Συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι η εδική ραδιενέργεια στους άνδρες (1.78 ± 0.73 Bq/kg) δεν διέφερε στατιστικά ($p=0.21$), από αυτήν στις γυναίκες (1.44 ± 0.90 Bq/kg) κατά την πρώτη μέτρηση, όπως και στη δεύτερη μέτρηση (1.14 ± 0.63 Bq/kg στους άνδρες έναντι 0.97 ± 0.735 Bq/kg στις γυναίκες $p=0.44$), παρά τις μεγάλες διαφορές στη συγκέντρωση λίπους στο σώμα τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι με βάση το συσχετισμό που πρότεινε ο Lyken και συν. [2007] μεταξύ της συγκέντρωσης ραδονίου στο ανθρώπινο σώμα και στον αέρα, 21 Bq/kg ανά Bq/m^3 , η αναμενόμενη συγκέντρωση ραδονίου και κατ'έκταση ^{214}Bi στο ανθρώπινο σώμα στην πόλη των Ιωαννίνων όπου στις κατοικίες και τους εργασιακούς χώρους μετρήθηκε από τους Ioannides και συν. [2009] μέσες συγκεντρώσεις στον αέρα 92 και 95 Bq/m^3 , αναμένονται συγκεντρώσεις στο σώμα των ενηλίκων 1.95 Bq/kg, ενώ στο χώρο του ΜΟΑ, όπου μετρήθηκε συγκέντρωση ~ 37.5 Bq/m^3 , αν είχε επιτευχθεί ισορροπία, η συγκέντρωση στο ανθρώπινο σώμα θα ήταν 0.79 Bq/kg. Οι τιμές που βρέθηκαν στις δυο συνεχόμενες μετρήσεις είναι μεταξύ των δυο τιμών που υπολογίσθηκαν και δείχνουν καθαρά την έλλειψη ισορροπίας μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του αέρα που το περιβάλλει από πλευράς συγκεντρώσεων ραδονίου.

Αξίζει να αναφερθεί ότι μετρήσεις με ανιχνευτές ιχών στα υπνοδωμάτια τριών από τους εξετασθέντες στους οποίους κατά την πρώτη μέτρηση βρέθηκε συγκέντρωση 1.7 , 2.25 και 2.6 Bq/kg έδειξαν συγκέντρωση ραδονίου στο αέρα 135 , 135 και 95 Bq/m^3 , αντίστοιχα. Από αυτούς οι δυο πρώτοι είναι συνταξιούχοι (ο πρώτος όμως ασχολείται αρκετές ώρες ημερησίως σε αγροτικές εργασίες και μετρήθηκε βραδινή ώρα) ο δε τρίτος εργάζεται σε χώρο που μετρήθηκε συγκέντρωση ραδονίου στον αέρα 110 Bq/m^3 .

Οι Lyken και συν. [2007] μελετώντας 57 άνδρες και 40 γυναίκες βρήκαν ότι ενεργότητα τους ^{214}Bi σχετίζεται με τη συγκέντρωση ραδονίου στο υπνοδωμάτιό τους και την ολόσωμη ποσότητα λίπους βασιζόμενος στην μέτρηση ^{40}K και ανθρωπομετρικά δεδομένα. Στην παρούσα μελέτη μετρήθηκε και η ολόσωμη ποσότητα λίπους (FM) με την τεχνική DXA. Μόνο στη δεύτερη σειρά μετρήσεων βρέθηκε μια τάση ($r=+0.23$, $p=0.12$) για ύπαρξη γραμμικού συσχετισμού μεταξύ της ενεργότητας και της ολόσωμης ποσότητας λίπους. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι σχεδόν οι μισές τιμές αντιστοιχούσαν σε ενεργότητες μικρότερες της τιμής του ορίου ανιχνευσιμότητας των 90 Bq, και ότι υπήρχε επίδραση στην ενεργότητα από τη συγκέντρωση ραδονίου στο χώρο που ήταν οι εξετασθέντες πριν από τη μέτρηση. Συμπερασματικά, στην πράξη μετρήσεις ^{214}Bi είναι δυνατές με τον ΜΟΑ μόνο σε άτομα με τουλάχιστον 100 Bq ^{214}Bi με κατάλληλη προετοιμασία του εξεταζόμενου.

A.2 Μετρήσεις ^{40}K

A. Επαναληψιμότητα: Μελετήθηκε η βραχύχρονη *in vivo* επαναληψιμότητα (CV) μετρήσεων TBK με τη μέθοδο των διπλών μετρήσεων σε δύο ομάδες εθελοντές με εξαναγκασμένη εισαγωγή αέρα ή χωρίς εξαναγκασμένη εναλλαγή του αέρα της αίθουσας όπου είναι εγκατεστημένος ο ΜΟΑ. Βρέθηκε επαναληψιμότητα των μετρήσεων χωρίς εξαναγκασμένο αερισμό (συνολικά 16 μετρήσεις σε επτά εθελοντές- Πίνακας 9.3) πολύ μεγαλύτερη της θεωρητικής (5.0% , έναντι 3.3%). Εφαρμόζοντας στα δεδομένα των εν λόγω μετρήσεων διόρθωση για την επίδραση εκπομπών ακτινοβολίας-γ ενέργειας μεγαλύτερης των 1.65 MeV, όπως του θυγατρικού του ραδονίου ^{214}Bi , η πειραματική επαναληψιμότητα βελτιώθηκε από

35.0% στο 3.65%, που είναι μόλις ~10% μεγαλύτερη της θεωρητικής τιμής. Άρα, όπως και στην περίπτωση των ομοιωμάτων (βλέπε 6.4 και 6.5), η εφαρμογή της εν λόγω μεθοδολογίας βελτιώνει σημαντικά τη επαναληπτικότητα. Σύγκριση των τιμών των διακυμάνσεων που προέκυψαν από την στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων, έδειξε ότι η διακύμανση των διορθωμένων αριθμών παλμών είναι κατά 44 % μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή των μη διορθωμένων αριθμών και 30 % μεγαλύτερη από την θεωρητική τιμή.

Παρόμοια ανάλυση για τα δεδομένα μετρήσεων με εξαναγκασμένη εισαγωγή αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον στην αίθουσα (διπλές μετρήσεις την ίδια ημέρα σε 38 εθελοντές- Πίνακας 9.6) έδειξε βραχύχρονη *in vivo* επαναληψιμότητα με επανατοποθέτηση του εξεταζόμενου 3.1%, έναντι θεωρητικής τιμής 2.5%. Εφαρμόζοντας επιπλέον διόρθωση με βάση τους παλμούς που καταγράφονται στην ενεργειακή περιοχή 1.69 – 1.84 MeV, η πειραματική επαναληψιμότητα των *in vivo* μετρήσεων TBK βελτιώθηκε από 3.1% στο 2.96 % και ήταν ~18% μεγαλύτερη της θεωρητικής. Επιπλέον, σύγκριση των τιμών των διακυμάνσεων έδειξε ότι η διακύμανση των διορθωμένων αριθμών παλμών είναι κατά 16 % μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή των μη διορθωμένων αριθμών και 27% μεγαλύτερη από την θεωρητική τιμή. Συμπερασματικά, η επαναληψιμότητα των *in vivo* μετρήσεων TBK που πραγματοποιήθηκαν με τη λειτουργία του συστήματος εξαναγκασμένου αερισμού του χώρου με εισαγωγή αέρα από τον περιβάλλοντα χώρο υπερτερεί αυτής των μετρήσεων χωρίς εξαναγκασμένο εξαερισμό (3.1% χωρίς διόρθωση και 2.96% με διόρθωση, έναντι 5.0%). Η εφαρμογή της διόρθωσης που προτείνεται στο Κεφάλαιο 4, και αποδεικνύεται πειραματικά και στο Κεφάλαιο 6, για την αφαίρεση της συνεισφοράς στην κορυφή του ^{40}K ραδιονουκλιδίων που εκπέμπουν ακτινοβολία- γ ενέργειας μεγαλύτερης των 1.6 MeV, κυρίως όμως λόγω της παρουσίας ^{214}Bi , μέθοδος που βελτιώνει την επαναληπτικότητα των μετρήσεων.

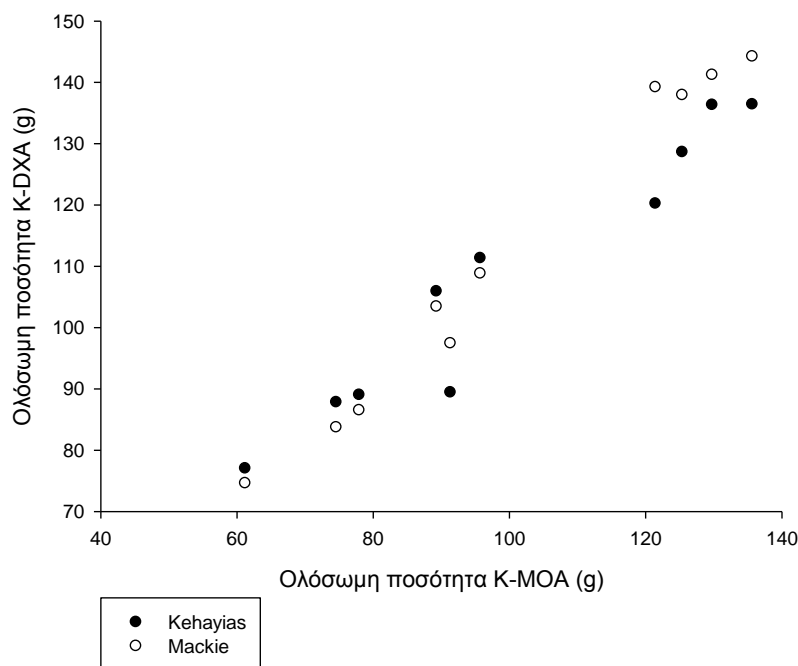
B. Ποσότητα καλίου σε ενήλικες: Ο προσδιορισμός της ολόσωμης ποσότητας καλίου με τη χρήση MOA υπήρξε αντικείμενο που απασχόλησε πλήθος ερευνητών στη βιβλιογραφία τόσο σε υγιή άτομα, όσο και σε ασθενείς. [Boddy και συν. 1971, Delwalde 1974, Cohn και συν. 1974, 1981, Pearson και συν. 1974 και 1984, Barkishaw και συν. 1978, Morgam 1983, Sjostrom συν. 1988, Lahham και συν. 1998, Ellis 2000, Larsson και συν 2003, Raguso και συν. 2006, Wang και συν. 2007]

Η ολόσωμη ποσότητα καλίου συσχετίζεται με την ολόσωμη άλιπη μάζα (FFM), καθώς και με την κυτταρική μάζα σώματος (BCM) [Forbes και συν. 1956, Mackie και συν. 1989, Kehayias και συν. 1997, Ellis 2000]. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο τμήμα, η ποσότητα μη λιπώδους ιστού μπορεί να προσδιοριστεί εναλλακτικά και με DXA, οι δε σχετικές μετρήσεις είναι συνήθως ιδιαίτερα επαναλήψιμες, ταχύτερες, και χαμηλότερου κόστους απαιτούν όμως μικρή ακτινική επιβάρυνση του εξεταζόμενου [Toombs και συν. 2012]. Παρόλο που η τεχνική DXA θεωρείται αξιόπιστη για την μελέτη της σύστασης του σώματος, ενίοτε δεν παρέχει ακριβή αποτελέσματα αναφορικά με την ποσότητας BCM, εξαιτίας παραγόντων όπως της μεταβολής του λόγου BCM προς FFM με την μεταβολή της ηλικίας [Shypailo και συν. 2011, St-Onge και συν. 2004] και του γεγονότος ότι η τεχνική δεν παρέχει στοιχεία σε ανατομικές περιοχές όπου οι δέσμες ακτίνων -X διέρχονται από οστίτη ιστό.

Έγινε σύγκριση των τεχνικών MOA και DXA ως προς τη μέτρηση του ολόσωμου καλίου στο ανθρώπινο σώμα με τη μέθοδο των Bland και Altman [1995] θεωρώντας τη μέθοδο MOA ως τεχνική αναφοράς. Σκοπός της σύγκρισης είναι η διαπίστωση

του βαθμού συμφωνίας των δύο μεθόδων και η δυνατότητα χρήσης σε εναλλακτική βάση. Ο έλεγχος συμφωνίας των τεχνικών έγινε για κάθε ομάδα μετρήσεων ξεχωριστά. Συγκεκριμένα έγινε έλεγχος συμφωνίας μεταξύ των ακόλουθων ζευγών δεδομένων:

α. Η ποσότητα TBK που μετρήθηκε άμεσα με το MOA και παρουσιάζεται στην 5^η στήλη του Πίνακα 9.4 με την αντίστοιχη ποσότητα που προσδιορίζεται από τη μέτρηση από το DXA και παρουσιάζεται στην 3^η στήλη (*Μοντέλο Kehayias*) και 4^η



Σχήμα 9.4: Κοινό διάγραμμα συσχέτισης ολόσωμης ποσότητας καλίου από μετρήσεις MOA και DXA (χρησιμοποιήθηκαν διορθωμένοι ως προς το ^{214}Bi παλμοί στήλη (*Μοντέλο Mackie*) του Πίνακα 9.5.

Το Σχήμα 9.4 παρουσιάζει σε κοινό γράφημα την σχέση μεταξύ της ποσότητας ολόσωμου καλίου που προσδιορίζεται από τις μετρήσεις άλιπου ιστού με το DXA βάση των δύο μοντέλων με την ολόσωμη ποσότητα καλίου που βρέθηκε από τις μετρήσεις με τον MOA και χρήση των στοιχείων μετρητικής απόδοσης που προέκυψε από την μέση τιμή των αποδόσεων στις επιμέρους θέσεις που προσομοιώθηκαν. Στα δεδομένα του γραφήματος εφαρμόστηκε συσχέτιση γραμμικής μορφής. Στον Πίνακα 9.14 παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης της ποσότητας TBK που βρέθηκε άμεσα με το MOA με την αντίστοιχη τιμή που βρέθηκε έμμεσα από τις μετρήσεις DXA μέσω εφαρμογής των μοντέλων συσχέτισης καλίου με την άλιπη μάζα. Η συσχέτιση έγινε για τις περιπτώσεις ύπαρξης σταθερού όρου και για εξαναγκασμένη διάβαση της καμπύλης από την αρχή των αξόνων. Τα Σχήματα 9.5 και 9.6 παρουσιάζουν την σχέση μεταξύ της μέσης τιμής των μετρήσεων με τις δύο μεθόδων στο ίδιο άτομο με τη διαφορά των μετρήσεων για το μοντέλο του Kehayias και του Mackie αντίστοιχα. Για την εφαρμογή της ανάλυσης Bland-Altman υπολογίστηκε η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της διαφοράς των δύο τεχνικών. Με τη χρήση των δύο τιμών υπολογίστηκαν τα όρια εμπιστοσύνης της διαφοράς των δύο μεθόδων σε όριο εμπιστοσύνης 95%.

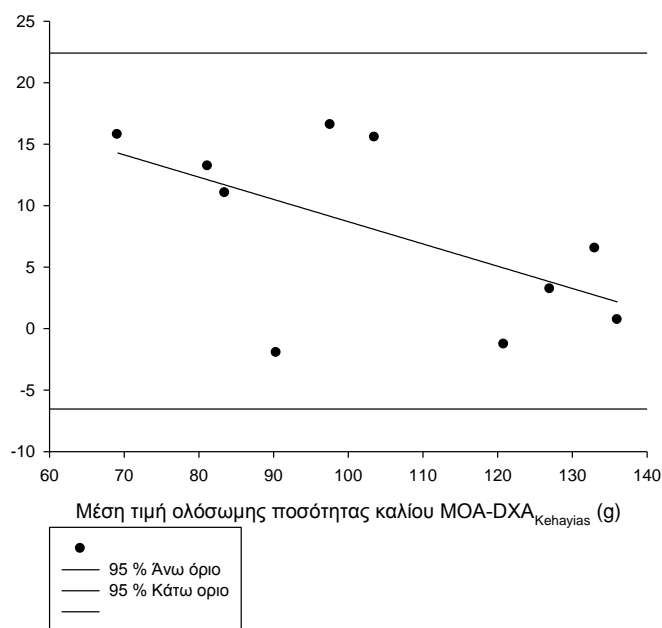
Πίνακας 9.14: Δεδομένα συσχέτισης ολόσωμης ποσότητας καλίου από μετρήσεις MOA και DXA, Σχήματος 9.4 (χρησιμοποιήθηκαν διορθωμένοι ως προς το ^{214}Bi παλμοί και απόδοση που προέκυψε από τη μέση τιμή των αποδόσεων στις επιμέρους θέσεις που προσομοιώθηκαν)

Μοντέλο DXA	Σταθερός όρος	Κλίση καμπύλης με σταθερό όρο / κλίση καμπύλης που διέρχεται από το σημείο (0,0)	Συντελεστής συσχέτισης R^2 με / χωρίς σταθερό όρο
Kehayias	2.70 (7.67)/ -	0.810 (0.074)/ 1.063(0.026)	0.936 / 0.993
Mackie	9.51 (4.75)/ -	1.019 (0.046)/ 1.108(0.012)	0.983 / 0.998

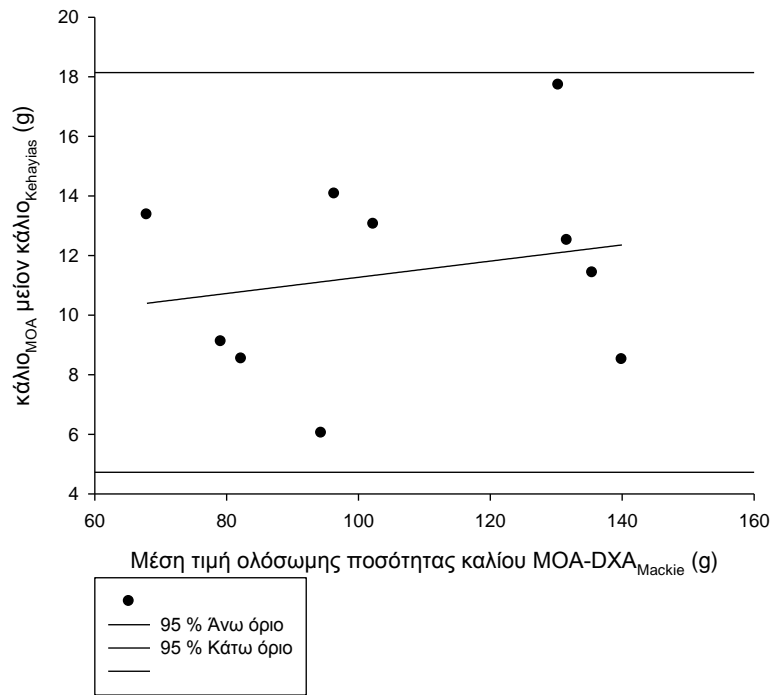
Πίνακας 9.15: Δεδομένα διαγράμματος Bland-Altman

Μοντέλο DXA	Κάτω όριο (g)	Άνω όριο (g)	Πλάτος ορίου (g)
Kehayias	-6.5	22.4	28.9
Mackie	4.7	18.1	13.4

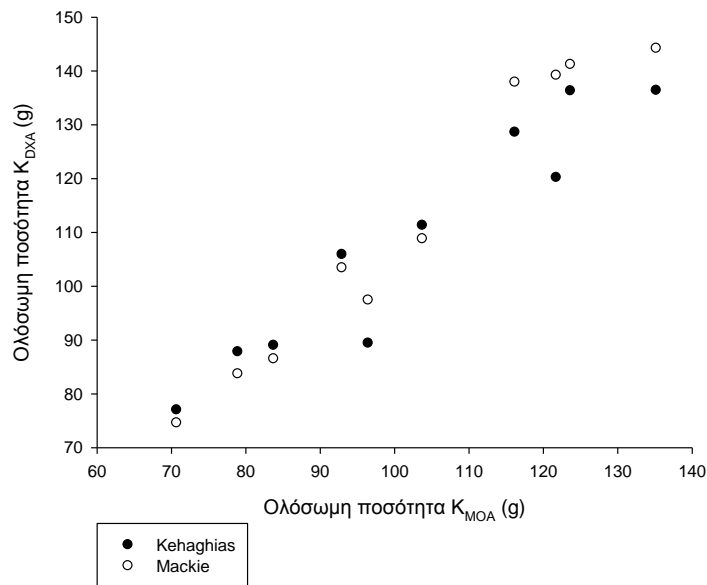
β. Η ποσότητα καλίου που προσδιορίζεται από το MOA και παρουσιάζεται στην 7^η στήλη του Πίνακα 9.4 με την αντίστοιχη ποσότητα που προσδιορίζεται από τη μέτρηση από το DXA και παρουσιάζεται στην 3^η στήλη (*Μοντέλο Kehayias*) και 4^η στήλη (*Μοντέλο Mackie*) του Πίνακα 9.5. Το Σχήμα 9.7 παρουσιάζει σε κοινό γράφημα την σχέση μεταξύ της ποσότητας ολόσωμου καλίου που προσδιορίζεται από τις μετρήσεις άλιπου ιστού με το DXA βάση των δύο μοντέλων με την ολόσωμη ποσότητα καλίου που βρέθηκε από τις μετρήσεις με τον MOA.



Σχήμα 9.5: Διάγραμμα Bland-Altman μετρήσεων MOA με DXA-μοντέλο Kehayias



Σχήμα 9.6: Διάγραμμα Bland-Altman μετρήσεων ΜΟΑ με DXA-μοντέλο Mackie



Σχήμα 9.7: Κοινό διάγραμμα συσχέτισης ολόσωμης ποσότητας καλίου από μετρήσεις ΜΟΑ και DXA (χρησιμοποιήθηκαν διορθωμένοι ως προς το ^{214}Bi παλμοί και απόδοση που προέκυψε από τη ολοκλήρωση των αποδόσεων στις επιμέρους θέσεις που προσομοιώθηκαν).

Στα δεδομένα του γραφήματος εφαρμόστηκε συσχέτιση γραμμικής μορφής. Στον Πίνακα 9.16 παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης της ποσότητας καλίου που βρέθηκε με το MOA με την αντίστοιχη τιμή που βρέθηκε από τις μετρήσεις DXA και την εφαρμογή των μοντέλων συσχέτισης καλίου με την άλιπη μάζα.

Πίνακας 9.16: : Δεδομένα συσχέτισης ολόσωμης ποσότητας καλίου από μετρήσεις MOA και DXA, Σχήματος 9.7 (χρησιμοποιήθηκαν διορθωμένοι ως προς το ^{214}Bi παλμοί και απόδοση που προέκυψε από το ολοκλήρωμα των αποδόσεων στις επιμέρους θέσεις που προσομοιώθηκαν)

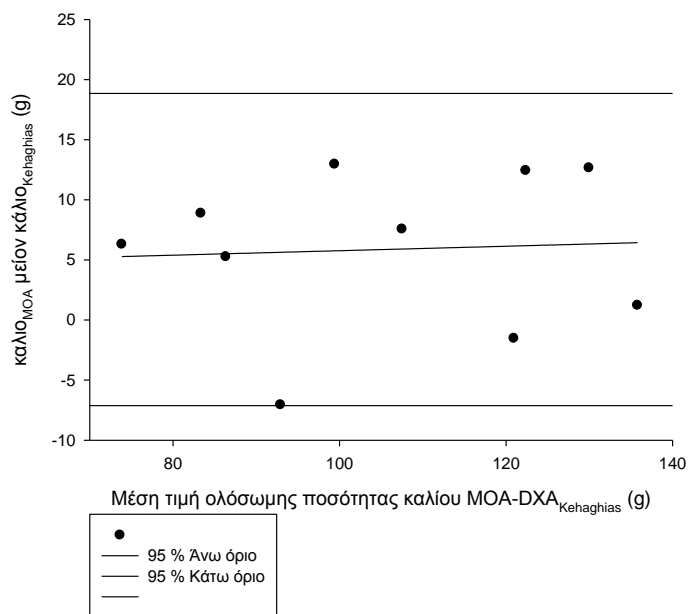
Μοντέλο DXA	Σταθερός όρος	Κλίση καμπύλης με σταθερό όρο/κλίση καμπύλης που διέρχεται από το σημείο (0,0)	Συντελεστής συσχέτισης R^2 με / χωρίς σταθερό όρο
Kehayias	8.88(11.37) / -	0.971 (0109)/ 1.054(0.020)	0.99
Mackie	-13.7×(9.3) / -	1.225(0.089)/ 1.096(0.018)	0.96

Για την εφαρμογή της ανάλυσης Bland-Altman υπολογίστηκε η μέση τιμή της και η τυπική απόκλιση της διαφοράς των δύο τεχνικών. Με τη χρήση των δύο τιμών υπολογίζονται τα όρια εμπιστοσύνης της διαφοράς των δύο μεθόδων σε όριο εμπιστοσύνης 95%.

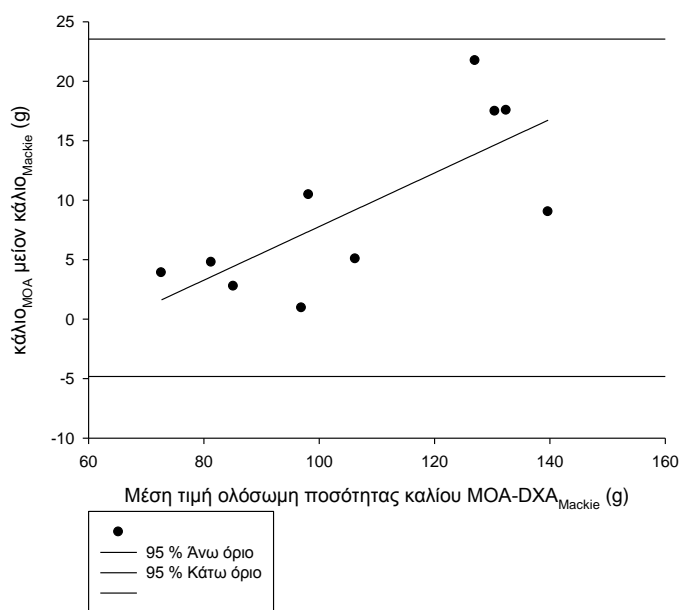
Πίνακας 9.17: Δεδομένα διαγράμματος Bland-Altman

Μοντέλο DXA	Κάτω όριο (g)	Άνω όριο (g)	Πλάτος ορίου (g)
Kehayias	-7.1	18.9	26.0
Mackie	-4.8	23.5	28.4

Τα Σχήματα 9.8 και 9.9 παρουσιάζουν την σχέση μεταξύ της μέσης τιμής των μετρήσεων με τις δύο μεθόδων στο ίδιο άτομο με τη διαφορά των μετρήσεων για το μοντέλο του Kehayias και του Mackie, αντίστοιχα.

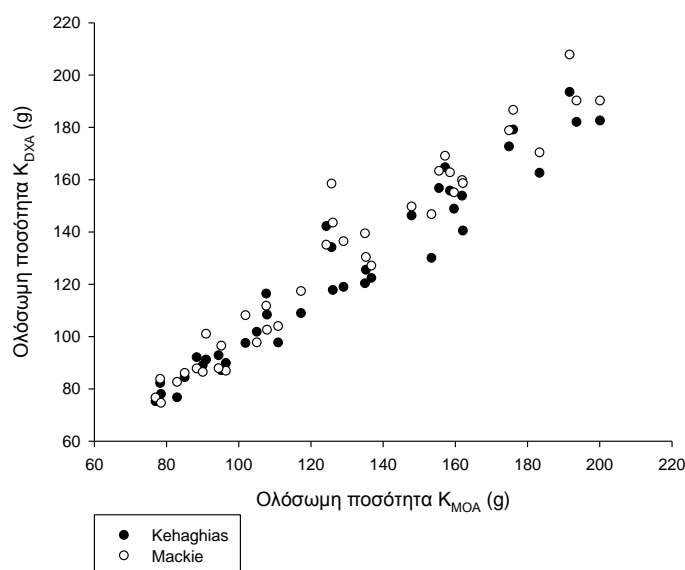


Σχήμα 9.8: Διάγραμμα Bland-Altman μετρήσεων MOA με DXA-μοντέλο *Kehayias*



Σχήμα 9.9: Διάγραμμα Bland-Altman μετρήσεων MOA με DXA-μοντέλο *Mackie*

γ. Η ποσότητα καλίου που μετρήθηκε με τον MOA και παρουσιάζεται στην 5^η στήλη του Πίνακα 9.7 με την αντίστοιχη ποσότητα που προσδιορίζεται από τη μέτρηση από το DXA και παρουσιάζεται στην 3^η στήλη (*Μοντέλο Kehayias*) και 4^η στήλη (*Μοντέλο Mackie*) του Πίνακα 9.8. Το Σχήμα 9.10 παρουσιάζει σε κοινό γράφημα την σχέση μεταξύ της ποσότητας ολόσωμου καλίου που προσδιορίζεται από τις μετρήσεις άλιπης μάζας (FFM) με το DXA βάση των δύο μοντέλων με την ολόσωμη ποσότητα καλίου που βρέθηκε από τις μετρήσεις με τον MOA.



Σχήμα 9.10: Κοινό διάγραμμα συσχέτισης ολόσωμης ποσότητας καλίου από μετρήσεις MOA και DXA (χρησιμοποιήθηκαν διορθωμένοι ως προς το ^{214}Bi παλμοί και απόδοση που προέκυψε από τη μέση τιμή των αποδόσεων στις επιμέρους θέσεις που προσομοιώθηκαν)

Πίνακας 9.18: Δεδομένα συσχέτισης ολόσωμης ποσότητας καλίου από μετρήσεις MOA και DXA, Σχήματος 9.10 (χρησιμοποιήθηκαν διορθωμένοι ως προς το ^{214}Bi παλμοί και απόδοση που προέκυψε από τη μέση τιμή των αποδόσεων στις επιμέρους θέσεις που προσομοιώθηκαν)

Μοντέλο DXA	Σταθερός όρος	Κλίση καμπύλης με σταθερό όρο / κλίση καμπύλης που διέρχεται από το σημείο (0,0)	Συντελεστής συσχέτισης R^2 με /χωρίς σταθερό όρο
Kehayias	5.67 (5.12)	0.972 (0.038)/0.958(0.010)	0.94/0.99
Mackie	0.23 (5.54)	1.007(0.041)/1.008(0.011)	0.94/0.99

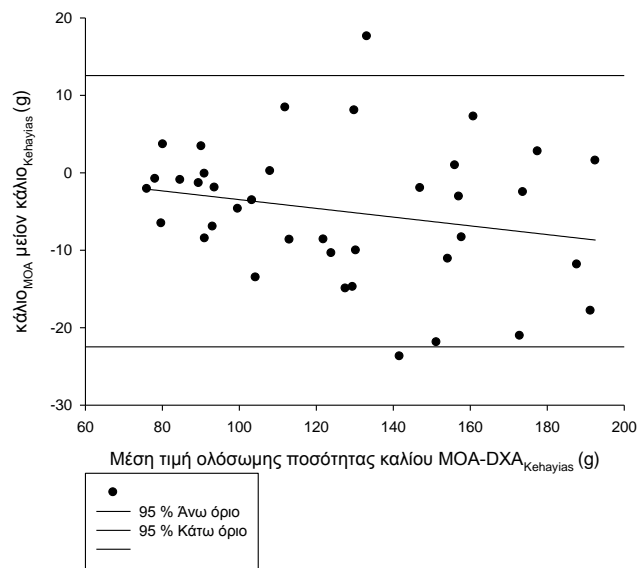
Στα δεδομένα του Σχήματος 9.10 εφαρμόστηκε συσχέτιση γραμμικής μορφής. Στον Πίνακα 9.15 παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης της ποσότητας καλίου που βρέθηκε με το MOA με την αντίστοιχη τιμή που βρέθηκε από τις μετρήσεις DXA και την εφαρμογή των μοντέλων συσχέτισης καλίου με FFM.

Για την εφαρμογή της ανάλυσης Bland-Altman υπολογίζεται η μέση τιμή της και η τυπική απόκλιση της διαφοράς των δύο τεχνικών. Με τη χρήση των δύο τιμών

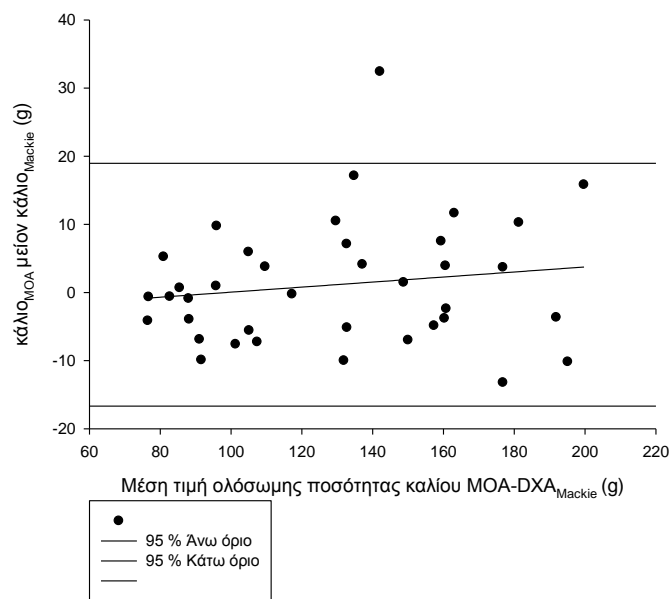
Πίνακας 9.19: Δεδομένα διαγράμματος Bland-Altman

Μοντέλο DXA	Κάτω όριο (g)	Άνω όριο (g)	Πλάτος ορίου (g)
Kehayias	-24.7	14.9	39.6
Mackie	-16.1	18.3	34.5

υπολογίζονται τα όρια εμπιστοσύνης της διαφοράς των δύο μεθόδων σε όριο εμπιστοσύνης 95 %. Τα Σχήματα 9.11 και 9.12 παρουσιάζουν την σχέση μεταξύ της μέσης τιμής των μετρήσεων με τις δύο μεθόδων στο ίδιο άτομο με τη διαφορά των μετρήσεων για το μοντέλο του Kehayias και του Mackie αντίστοιχα.



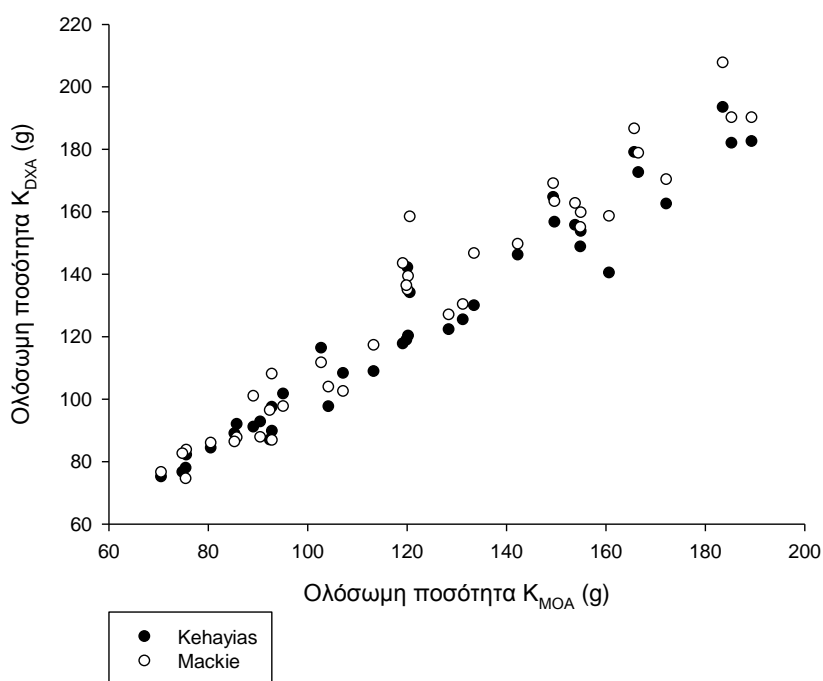
Σχήμα 9.11: Διάγραμμα Bland-Altman μετρήσεων MOA με DXA-μοντέλο Kehayias



Σχήμα 9.12: Διάγραμμα Bland-Altman μετρήσεων MOA με DXA-μοντέλο Mackie

δ. Η ποσότητα καλίου που προσδιορίζεται από το MOA και παρουσιάζεται στην 7^η στήλη του Πίνακα 9.7 με την αντίστοιχη ποσότητα που προσδιορίζεται από τη μέτρηση από το DXA και παρουσιάζεται στην 3^η στήλη (Μοντέλο *Kehayias*) και 4^η στήλη (Μοντέλο *Mackie*) του Πίνακα 9.8. Το Σχήμα 9.13 παρουσιάζει σε κοινό γράφημα την σχέση μεταξύ της ποσότητας ολόσωμου καλίου που προσδιορίζεται από τις μετρήσεις μη λιπώδους ιστού με το DXA βάση των δύο μοντέλων με την ολόσωμη ποσότητα καλίου που βρέθηκε από τις μετρήσεις με τον MOA.

Στα δεδομένα του Γραφήματος εφαρμόστηκε συσχέτιση γραμμικής μορφής. Στον Πίνακα 9.17 παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών συσχέτισης της ποσότητας



Σχήμα 9.13: Κοινό διάγραμμα συσχέτισης ολόσωμης ποσότητας καλίου από μετρήσεις MOA και DXA (χρησιμοποιήθηκαν διορθωμένοι ως προς το ^{214}Bi παλμοί και απόδοση που προέκυψε από τη ολοκλήρωση των αποδόσεων στις επιμέρους θέσεις που προσομοιώθηκαν)

Πίνακας 9.20: Δεδομένα συσχέτισης ολόσωμης ποσότητας καλίου από μετρήσεις MOA και DXA, Σχήματος 9.13 (χρησιμοποιήθηκαν διορθωμένοι ως προς το ^{214}Bi παλμοί και απόδοση που προέκυψε από το ολοκλήρωμα των αποδόσεων στις επιμέρους θέσεις που προσομοιώθηκαν)

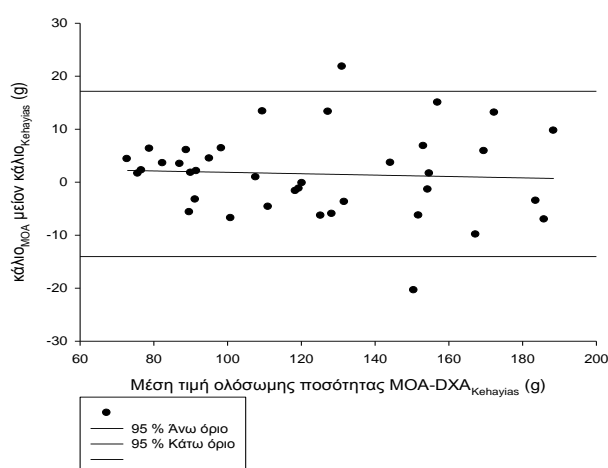
Μοντέλο DXA	Σταθερός όρος	Κλίση καμπύλης με σταθερό όρο/ κλίση καμπύλης που διέρχεται από το σημείο (0,0)	Συντελεστής συσχέτισης R^2 με / χωρίς σταθερό όρο/
Kehayias	6.268(4.742) / -	0.961(0.037) / 1.008(0.001)	0.948/0.99
Mackie	1.702(5.687) / -	1.049(0.044) / 1.061(0.012)	0.938/0.99

καλίου που βρέθηκε με το ΜΟΑ με την αντίστοιχη τιμή που βρέθηκε με DXA και την εφαρμογή των μοντέλων συσχέτισης καλίου με μη λιπώδη ιστό. Για την εφαρμογή της ανάλυσης Bland-Altman υπολογίζεται η μέση τιμή της και η τυπική απόκλιση της διαφοράς των δύο τεχνικών. Με τη χρήση των δύο τιμών υπολογίζονται τα όρια εμπιστοσύνης της διαφοράς των δύο μεθόδων σε όριο εμπιστοσύνης 95%.

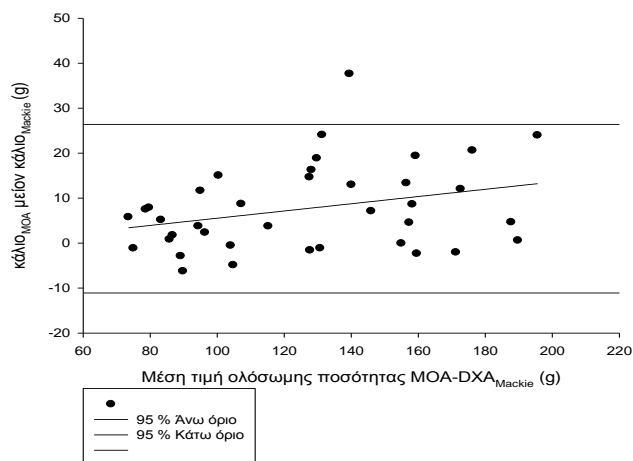
Πίνακας 9.21: Δεδομένα διαγράμματος Bland-Altman

Μοντέλο DXA	Κάτω όριο (g)	Άνω όριο (g)	Πλάτος ορίου (g)
Kehayias	-14.8	20.2	34.9
Mackie	-7.6	25.0	32.7

Τα Σχήματα 9.14 και 9.15 παρουσιάζουν την σχέση μεταξύ της μέσης τιμής των μετρήσεων με τις δύο μεθόδων στο ίδιο άτομο με τη διαφορά των μετρήσεων για το μοντέλο του Kehayias και του Mackie αντίστοιχα.



Σχήμα 9.14: Διάγραμμα Bland-Altman μετρήσεων MOA με DXA-μοντέλο



Σχήμα 9.15: Διάγραμμα Bland-Altman μετρήσεων MOA με DXA-μοντέλο Mackie

Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων συσχέτισης και Bland-Altman μεταξύ των ποσοτήτων της ολόσωμης ποσότητας καλίου που προσδιορίζεται από το MOA σε συνθήκες λειτουργίας του πρόσθετου συστήματος αερισμού στο δωμάτιο και των αντίστοιχων εκτιμήσεων από τις μετρήσεις με το DXA, βρέθηκαν τα εξής:

1. Στην περίπτωση χρήσης της μάζας K (σε g), που προκύπτει από τον ρυθμό παλμών καλίου με εφαρμογή της διόρθωσης για την συνεισφορά του ^{214}Bi που περιέχεται στον εξεταζόμενο και της απόδοσης που προκύπτει από την μέση τιμή των επιμέρους αποδόσεων της προσομοίωσης, η καλύτερη συσχέτιση παρουσιάζεται μεταξύ εκτίμησης MOA και του μοντέλου του Mackie. Ο σταθερός όρος και η κλίση της καμπύλης συσχέτισης (για καμπύλη με σταθερό και χωρίς σταθερό όρο) δεν διαφέρουν στατιστικά από το μηδέν και τη μονάδα, αντίστοιχα, ενώ το πλάτος των ορίων διαφοράς σε 95 % επίπεδο εμπιστοσύνης μεταξύ των δύο μεθόδων είναι της τάξης των 34.5 g.
2. Στην περίπτωση χρήσης της μάζας K (σε g), που προκύπτει από τον ρυθμό παλμών καλίου με εφαρμογή της διόρθωσης για την συνεισφορά του ^{214}Bi που περιέχεται στον εξεταζόμενο και της απόδοσης που προκύπτει από το ολοκλήρωμα των επιμέρους αποδόσεων της προσομοίωσης, η καλύτερη συσχέτιση παρουσιάζεται μεταξύ εκτίμησης MOA και του μοντέλου του Kehayias. Ο σταθερός όρος διαφέρει στατιστικά από το μηδέν, ενώ η κλίση δεν διαφέρει από την μονάδα (για καμπύλη με σταθερό και χωρίς σταθερό όρο) και το πλάτος των ορίων διαφοράς σε 95% επίπεδο εμπιστοσύνης μεταξύ των δύο μεθόδων είναι της τάξης των 34.9 g. Στο μοντέλο του Mackie ο συντελεστής συσχέτισης είναι μικρότερος (0.969 έναντι 0.974), ο σταθερός όρος και η κλίση της καμπύλης συσχέτισης δεν διαφέρουν στατιστικά από το μηδέν και τη μονάδα αντίστοιχα, ενώ το πλάτος των ορίων διαφοράς σε 95% επίπεδο εμπιστοσύνης μεταξύ των δύο μεθόδων είναι της τάξης των 32.7 g.

Η ανάλυση που προηγήθηκε δεν δίνει σαφή εικόνα για την αναγκαιότητα χρήσης της διόρθωσης που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 6 και αφορά την απομάκρυνση της συνεισφοράς του των παλμών του ^{214}Bi από την ενεργειακή περιοχή του ^{40}K , όταν γίνεται εξαναγκασμένη εισαγωγή αέρα. Μελετώντας τα δεδομένα του Πίνακα 9.6, παρατηρούνται περιπτώσεις όπου οι παλμοί ^{214}Bi στον εξεταζόμενο είναι σημαντικά περισσότεροι σε σχέση με το υπόστρωμα. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση των εξεταζόμενων #8 και # 25, στους οποίους οι παλμοί του ^{214}Bi της 1^{ης} μέτρησης παρουσιάζονται αυξημένοι σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του υποστρώματος κατά 23% και 10% αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται σε προηγούμενη ραδιομόλυνσή τους με ^{226}Ra , η οποία φαινόταν και από την ύπαρξη φωτοκορυφής ενέργειας περίπου 609 keV [Παλλάδα, 2012]. Στα συγκεκριμένα άτομα ο ρυθμός παλμών ^{40}K παρουσιάζεται αυξημένος σε σχέση με τη διορθωμένη τιμή κατά 15 % και 6 % αντίστοιχα. Η παρατήρηση αυτή υποδεικνύει πως η εφαρμογή της διόρθωσης για το ^{214}Bi πρέπει να εφαρμόζεται σε κάθε περίπτωση.

Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τις στήλες 6 και 7 του Πίνακα 9.7, τα φωτόνια ενέργειας μεγαλύτερης ενέργειας από το κάλιο και αυτά του ^{214}Bi στο ενεργειακό παράθυρο αυξάνουν τους παλμούς παράθυρο του ^{214}Bi κατά 3.0%, όταν γίνεται εξαναγκασμένη εναλλαγή αέρα στην αίθουσα.

Γ. Συγκέντρωση καλίου σε νέους ενήλικες: Ανάμεσα στους εθελοντές, δώδεκα ήταν φοιτητές και οκτώ φοιτήτριες ηλικίας 20 ως 27 ετών ($p=0.32$), που σύμφωνα με το ιστορικό ήταν υγιείς. Η μέση ποσότητα καλίου που υπολογίστηκε με αφαίρεση της συμβολής του ^{214}Bi στο σήμα και χρήση ολοκλήρωσης για τον υπολογισμό της

ανιχνευτικής απόδοσης (Πίνακας 9.7, στήλη 7) ήταν κατά μέσο όρο 72% μεγαλύτερος στους φοιτητές από ότι στις φοιτήτριες (158 ± 19 g έναντι 92 ± 10 g, $p < 0.001$), η μάζα όμως του σώματός τους είναι μεγαλύτερη (84.7 ± 12.7 kg έναντι 52 ± 9 g, $p < 0.001$).

Σύγκριση των συγκεντρώσεων καλίου έδειξε ότι στο μικρό δείγμα που μελετήθηκε η συγκέντρωση καλίου είναι μεγαλύτερη στους φοιτητές από ότι στις φοιτήτριες (1.88 ± 0.21 g/kg έναντι 1.56 ± 0.14 g/kg $p = 0.002$). Οι τιμές αυτές είναι ~7% μεγαλύτερες του μέσου όρου των βιβλιογραφικών τιμών που δίνονται στον Πίνακα 9.22 και αναφέρονται σε υγιείς εθελοντές ηλικίας 20 ως 29 ετών, στις εν λόγω μελέτες δεν γίνεται καθαρά αναφορά για διόρθωση για τη συμβολή του ^{214}Bi στην περιοχή του ^{40}K . Αν θεωρήσουμε ότι στα εν λόγω εργαστήρια η συγκέντρωση ραδονίου είναι διπλάσια από ότι στο Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, έπεται ότι υπερεκτιμούν τη συγκέντρωση καλίου κατά ~6%, απόκλιση που καλύπτει την πιθανή διαφορά μέσων τιμών και θεωρώντας ότι δεν υπάρχουν εθνικές διαφορές, η διαφορά στη φυσική δραστηριότητα και στη διατροφή των ατόμων που μελετήθηκαν

Πίνακας 9.22: Βιβλιογραφικά δεδομένα συγκέντρωσης καλίου σε άνδρες και γυναίκες

Συγγραφέας	Ποσότητα καλίου ανά μονάδα μάζας σώματος-άνδρες (g/kg)	Ποσότητα καλίου ανά μονάδα μάζας σώματος-γυναίκες (g/kg)	Τόπος
Pierson, 1980	2.16	1.66	Νέα Υόρκη
Cohn, 1980	1.95	1.58	Νέα Υόρκη
Kehayias, 1997	2.06	1.67	Βοστώνη
Lahham, 1988	1.85	1.78	Μπρατισλάβα

Η ποσοτικοποίηση της ποσότητας ^{214}Bi στο σώμα των εξεταζόμενων #8 και #25 πραγματοποιήθηκε με προσομοίωση του ισοτόπου στο εσωτερικό ομοιόμορφο μεσαίας γεωμετρίας. Βρέθηκε ότι η ποσότητα ^{214}Bi στον #8 ήταν ίση με 429 Bq και του #25 ίση με 168 Bq (ο υπολογισμός των ενεργοτήτων έγινε με χρήση της ενέργειας 609 keV του ^{214}Bi)

B. Μετρήσεις ασθενών με ^{153}Sm -EDTM

Σύμφωνα με τους Ma και συν. [1996], ο τρόπος παραγωγής του ^{153}Sm από ενεργοποίηση του σταθερού ^{152}Sm σε ερευνητικό αντιδραστήρα στο Μιζούρι των ΗΠΑ συνεπάγεται στο σχηματισμό αμέσως μετά τον τερματισμό της ενεργοποίησης των μακρόβιων ισοτόπων ^{145}Sm (<10 Bq/GBq ^{153}Sm), ^{151}Sm (<4 kBq ανά GBq ^{153}Sm), ^{152}Eu (<60 Bq ανά GBq ^{153}Sm), ^{154}Eu (<10 kBq ανά GBq ^{153}Sm), ^{155}Eu (<2 kBq ανά GBq ^{153}Sm) σε σχέση με το ^{153}Sm ($T_{1/2}$: 1.93 d) και λιγότερο των 40 Bq ^{156}Eu ανά GBq ^{153}Sm (το ^{156}Eu έχει χρόνο ημιζωής 15 ημέρες. Από την άλλη

πλευρά, οι Bahrani-Samani και συν. [2009], βρήκαν προσμίξεις στο υλικό που παρασκεύασαν στο Ιράν πολύ μεγαλύτερες προσμίξεις, <230 kBq ^{154}Eu , 100 kBq ^{155}Eu και <490 kBq ^{156}Eu ανά GBq ^{153}Sm , ενώ ο Ramammorthy και συν. [2002] στις Ινδίες βρήκαν προσμίξεις 5 kBq ^{154}Eu και 75 kBq ^{155}Eu ανά GBq ^{153}Sm ακτινοβολώντας μη εμπλουτισμένο σαμάριο. Ως εκ τούτου, και οι τρεις ερευνητικές ομάδες αναφέρουν την ύπαρξη προσμίξεων ευρωπαϊού κατά την παρασκευή ^{153}Sm . Η παραγωγή του ^{154}Eu και του ^{156}Eu , αποδίδεται κυρίως στις πολλαπλές συλλήψεις νετρονίων κατά τη διάρκεια της ακτινοβόλησης για την παρασκευής του ^{153}Sm του προϊόντος β- διάσπασής του ^{153}Eu και τις πιθανές μολύνσεις του προς ακτινοβόληση ^{152}Sm με ευρώπιο (το ^{153}Eu στη φύση βρίσκεται σε ποσοστό 52%). Η παραγωγή ^{153}Eu πιθανώς να σχετίζεται με σύλληψη νετρονίου σε πιθανές μολύνσεις του προς ακτινοβόληση ^{152}Sm με ευρώπιο (το ^{151}Eu στη φύση βρίσκεται σε ποσοστό 58%).

Λόγω τη χημικής ομοιότητας των λανθανίδων σαμάριο και ευρώπιο, τα εν λόγω στοιχεία, τόσο ελεύθερα όσο και ως σύμπλοκα με το EDTM, μπορεί να θεωρηθεί ότι έχουν παρόμοια φαρμακοκινητική. Η μέτρηση του υπολείμματος ραδιοφαρμάκου που χορηγήθηκε στον δεύτερο ασθενή 20 ημέρες μετά τη χορήγηση του έδειξε την ύπαρξη επιμολύνσεων από τα ισότοπα ^{152}Eu , ^{154}Eu και ^{156}Eu παρόμοιας ενεργότητας (674 Bq, 742 Bq και 785 Bq αντίστοιχα). Για παράδειγμα στο δείγμα βρέθηκε λόγος ενεργότητας των μακρόβιων ραδιονουκλιδίων ^{152}Eu και ^{154}Eu 0.91, έναντι 0.77 και 0.80 στο σώμα των δυο ασθενών. Η διαφορά αυτή πιθανώς να σχετίζεται με το γεγονός ότι τμήμα των κορυφών του ^{154}Eu περιλαμβάνεται στη κορυφή του σχετικά βραχύβιου ^{156}Eu , λόγω χαμηλής διακριτικής ικανότητας των ανιχνευτών του MOA.

Από τη σύγκριση των ενεργοτήτων των ισωτόπων του Eu στους δύο ασθενείς προκύπτει ότι ο πρώτος ασθενής έχει κατά περίπου 5% περισσότερο ^{154}Eu και ^{152}Eu σε σχέση με τον δεύτερο. Η παρατηρούμενη διαφορά μπορεί να οφείλεται στους εξής λόγους:

- μικρότερη καθήλωση του ραδιοφαρμάκου στο σώμα του δεύτερου ασθενούς, λόγω μικρότερης έκτασης της νόσου (αριθμός μεταστατικών εστιών, μέγεθος και ενεργότητα) ή μεγαλύτερη ενυδάτωση
- μεγαλύτερη περιεκτικότητα επιμολύνσεων από άλλα ισότοπα στο πρώτο ραδιοφάρμακο που έχει σχέση με την ποσότητα του αρχικού υλικού που ακτινοβολήθηκε για να δημιουργηθεί το ^{153}Sm (διαφορετική παρτίδα)
- την υπόθεση της ομοιόμορφης καθήλωσης στο σώμα και στους δυο ασθενείς (στον δεύτερο εκτός από τον κορμό βρέθηκε σπινθηρογραφικά έντονη καθήλωση και στις δυο κνήμες τρεις ώρες μετά τη χορήγηση),
- τη χρήση των συντελεστών απόδοσης του πρώτου ασθενή που μοντελοποιήθηκε και για τον δεύτερο ασθενή που είχε μικρότερο ύψος σώματος (με βάση τα δεδομένα των Πινάκων 8.3 και 8.5 εκτιμάται ότι υποεκτιμήθηκε η ενεργότητα του δεύτερου ασθενή που είχε υψηλότερο δείκτη μάζας σώματος κατά ~2.5%).

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι Moro και συν. [2006] ανίχνευσαν με φασματοσκοπία-γ σε υπόλειμμα χορήγησης, όπως και στην παρούσα μελέτη, καθώς και στα ούρα ασθενούς 6, 30 και 54 ημέρες μετά τη χορήγηση μόνο ^{154}Eu . Επιπλέον, ο Al Halak και συν. [2009] καθώς και οι Hayes και συν. [2010] χρησιμοποιώντας από κοινού μια γ-camera από την οποία είχαν αφαιρέσει τον κατευθυντήρα, εντόπισαν μόνο ^{154}Eu σε τρεις ασθενείς που υποβλήθηκαν σε θεραπεία πριν από 4 μήνες ως δυο χρόνια από την ανίχνευση. Αντίθετα, οι Fisher και συν. [2003] σε ασθενείς τρεις εβδομάδες μετά τη χορήγηση, εντόπισαν ^{152}Eu , ^{154}Eu και ^{156}Eu (το τελευταίο δεν

σημαίνεται σε-τυπικό φάσμα που παρουσίασαν οι ερευνητές στο σχετικό συνέδριο). Κανονικοποιώντας τις τιμές ενεργότητας που χορηγήθηκαν, 30 mCi από τον Fisher συν., έναντι 70 mCi στην παρούσα μελέτη, η αναμενόμενη ενεργότητα με βάση την εν λόγω μελέτη ^{152}Eu , ^{154}Eu (17 και 26 kBq, αντίστοιχα, λόγος 0.65), δεν είναι σε σύγκρουση με αυτές της παρούσας μελέτης (Πίνακας 9.10).

Οι Fisher συν. έδειξαν ότι οι προσμίξεις ευρωπαϊού από μια θεραπευτική αυξάνουν τη δόση που απορροφάται στο μυελό οστών μόνο ~0.8% την δόση λόγω διάσπασης του ^{153}Sm . Από την άλλη πλευρά, οι εν λόγω ασθενείς αποτελούν πηγή ακτινοβολίας για όσους είναι κοντά τους. Με χρήση απλής φορητής φασματοσκοπική διάταξης Target Identifier στην παρούσα μελέτη μετρήθηκαν τρεις εβδομάδες μετά τη χορήγηση, σε απόσταση ~30 από το δέρμα τους στην περιοχή του κορμού ρυθμοί $\text{H}^*(10)$ μεταξύ 0.75 και 1.3 $\mu\text{Sv/h}$ στον πρώτο ασθενή, ενώ στον δεύτερο, ρυθμούς μεταξύ 0.2 και 0.3 $\mu\text{Sv/h}$.

Γ. Μετρήσεις Ακτινοπροστασίας

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των σεναρίων ρύπανσης με τη χρήση του κώδικα MCNP5, η απόδοση που υπολογίζεται για το μοντέλο ολόσωμης ομοιόμορφης κατανομής του $^{99\text{m}}\text{Tc}$ είναι κατά 25 % μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή για το μοντέλο σημειακής πηγής. Για εφαρμογές ακτινοπροστασίας η χρήση της τιμής της ρύπανσης που προκύπτει από το μοντέλο ολόσωμης κατανομής, ακόμα και αν η ρύπανση δεν έχει αυτήν την κατανομή, ενδείκνυται συχνά στο πλαίσιο πραγματοποίησης συντηρητικών υπολογισμών ακτινοπροστασίας προσωπικού.

9.6 Συμπεράσματα

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τον προσδιορισμό της ολόσωμης ποσότητας καλίου με τον MOA και με τη μέθοδο της απορροφησιμετρίας διπλής ενέργειας. βρέθηκε ότι η δύο μέθοδοι παρουσιάζουν πολύ καλή συμφωνία. Κατά τη διάρκεια μετρήσεων ολόσωμου καλίου με τον MOA εντοπίστηκαν εξεταζόμενοι με σημαντικά αυξημένα επίπεδα ακτινοβολίας από ^{214}Bi . Η ενεργότητα του ανιχνευμένου ισοτόπου προσδιορίστηκε με συνδυασμό πειραματικών δεδομένων και υπολογισμών που προέκυψαν από την προσομοίωση των γεωμετριών των εξεταζόμενων και του ανιχνευόμενου ισοτόπου.

Μετρήθηκαν δυο ασθενείς στους οποίους είχε χορηγηθεί ραδιοφάρμακο με βάση το ^{153}Sm . Εκτός του κύριου ισοτόπου, ανιχνευθήκαν ποσότητες ραδιονουκλιδίων που δεν αναφέρονται από τον κατασκευαστή. Οι λόγοι των ισοτόπων επιβεβαιώθηκαν από μετρήσεις γ-φασματοσκοπίας υψηλής ανάλυσης σε δείγμα.

Σε τυχαίες μετρήσεις σε εργαζομένους, ανιχνεύθηκαν μόλυνση με $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Θεωρήθηκαν δύο ακραία σενάρια κατανομής του ισοτόπου στο σώμα του εξεταζόμενου και βρέθηκε ότι η απόδοση μέτρησης δεν διαφέρει περισσότερο από 30 %.

Κεφάλαιο 10

Γενικά συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η λεπτομερής διερεύνηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την αξιοπιστία και την ακρίβεια των μετρήσεων του ΜΟΑ της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων τύπου εγγύς θωράκισης με δεκαέξι σπινθηριστές NaI(Tl) και η ανάπτυξη μεθοδολογιών για την αποδοτική εκμετάλλευση των μετρητικών χαρακτηριστικών του, και η πιλοτική χρήση του.

Η διερεύνηση των χαρακτηριστικών του συστήματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ομοιωμάτων που απαρτίζονταν από συνδυασμούς πλαστικών δοχείων με πηγές ^{40}K , ^{137}Cs και $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Μεταξύ άλλων παρασκευάστηκαν ομοιώματα με υδατικά διαλύματα KCl ενεργότητας ^{40}K ανά μονάδα όγκου (68.2 ± 3.5) Bq/l και διαλύματα με ενεργότητα ^{137}Cs ανά μονάδα όγκου (17.7 ± 1.1) Bq/l με ημερομηνία βαθμονόμησης την 12 Οκτωβρίου 2010. Τα δοχεία συνδυαστήκαν με κατάλληλους τρόπους για τη δημιουργία ανθρωπόμορφων διαφόρων γεωμετριών (Κεφάλαιο 3). Τα ομοιώματα περιλαμβάνουν δομές όπως τα άνω και κάτω άκρα, τον κορμό και το κεφάλι. Βασική επιδίωξη κατά τη διαδικασία κατασκευής των ομοιωμάτων ήταν η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων της ονομαστικής ενεργότητας των διαλυμάτων με ελαχιστοποίηση του κόστους. Προς τούτο χρησιμοποιήθηκαν αναλυτικές τεχνικές ποσοτικοποίησης της ραδιενέργειας, όπως η φασματοσκοπία υψηλής διακριτικής ικανότητας. Το μικτό σφάλμα ενεργότητας των διαλυμάτων και συνακόλουθα των ομοιωμάτων είναι της τάξης του 5 %, μέγεθος, που θεωρείται αποδεκτό σε σχέση με τις διαθέσιμες τεχνική και υποδομές. Για την εκτίμηση της ακτινοβολίας υποστρώματος χρησιμοποιήθηκε ομοίωμα από δοχεία, τα οποία πληρωθήκαν με απιονισμένο νερό.

Για τη μελέτη των χαρακτηριστικών και τη βαθμονόμηση του συστήματος αναπτύχθηκε μαθηματικό μοντέλο με τη χρήση του κώδικα Monte Carlo MCNP5. Το μοντέλο σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να περιλαμβάνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος, καθώς και η μεθοδολογία μετρήσεων που εφαρμόζεται. Με σκοπό την ανάπτυξη ενός ευέλικτου μοντέλου το οποίο να είναι συμβατό με τα τις μεθοδολογίες ανάλυσης δεδομένων που εφαρμόζονται στη γάμμα φασματοσκοπία, χρησιμοποιήθηκαν ρουτίνες προσομοίωσης των ανιχνευτών (εκτός των ηλεκτρονικών), όπως καταγραφείς τύπου ύψους παλμών, F8 με φυσική διαπλάτυνση του φάσματος η μορφή της οποίας προσδιορίστηκε πειραματικά. Στα πλαίσια δημιουργίας του μοντέλου μελετήθηκαν εκ νέου τα στοιχεία που αφορούν τους ενεργούς όγκους των ανιχνευτών και αναπτύχθηκε εμπειρική μεθοδολογία εκτίμησης των διαστάσεων με σκοπό την βέλτιστη συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. (Οι τιμές των διαστάσεων που προέκυψαν ήταν μικρότερες από εκείνες που χρησιμοποιήθηκαν από τη Τζίμα [2003]). Υπολογισμοί με βάση τις βελτιστοποιημένες διαστάσεις των ανιχνευτών έδειξαν συμφωνία καλύτερη του 5% με τις πειραματικές τιμές ανιχνευτικής απόδοσης σε ομοιώματα που περιείχαν εκπομπούς ακτινοβολίας-γ διαφόρων ενεργειών (Κεφάλαιο 7).

Η μέθοδος προσδιορισμού του αριθμού των παλμών στις καταγραφόμενες κορυφές του φάσματος προέκυψε από τη σύγκριση της αξιοπιστίας και της ακρίβειας των αποτελεσμάτων κατά την εφαρμογή της τεχνικής της απλής άθροισης του συνολικού αριθμού παλμών σε καθορισμένες περιοχές ενδιαφέροντος και με την τεχνική του

τραπεζοειδούς, που ενυπάρχει ως ρουτίνα ανάλυσης φάσματος στο λογισμικό Maestro 32. Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των αποτελεσμάτων των δύο τεχνικών μελετήθηκαν για έναν αριθμό ενεργειακών παραθύρων διαφορετικού πλάτους σε φάσματα από ομοιώματα που περιείχαν ^{40}K ή ^{137}Cs , έδειξαν ότι η τεχνική της απλής άθροισης παρέχει καλύτερη αξιοπιστία και ακρίβεια γεγονός που οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ύπαρξη ισχυρών κορυφών στα φάσμα υποστρώματος (Peaked Background). Συγκεκριμένα, στην ενεργειακή περιοχή του ^{40}K για παράθυρο πλάτους 176 keV και του ^{137}Cs για παράθυρο πλάτους 102 keV, ο συντελεστής μεταβλητότητας με την τεχνική απλής άθροισης ήταν μικρότερος κατά 76% και 43% από ότι όταν γινόταν χρήση της τεχνικής του τραπεζοειδούς, ενώ η ανιχνευτική απόδοση του MOA ήταν σημαντικά μεγαλύτερη. Διαπιστώθηκε επίσης ότι η τεχνική προσδιορισμού παλμών με τη χρήση της επιλογής του τραπεζοειδούς δημιουργεί προβλήματα κατά τη βαθμονόμηση του MOA με τη χρήση του μαθηματικού μοντέλου που αναπτύχθηκε, εξαιτίας του αλγορίθμου υπολογισμού του RoI, ο οποίος μεταβάλλει το δηλωμένο από το χρήστη RoI. Μειονέκτημα της εφαρμογής της τεχνικής της απλής άθροισης είναι το γεγονός ότι η μέθοδος δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση στην περιοχή της κορυφής, φωτονίων που δεν οφείλονται στο υπό μελέτη ισότοπο. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε μέθοδος διόρθωσης που βασίζεται στην τεχνική spectrum stripping. Η μέθοδος αναπτύχθηκε για την διόρθωση του αριθμού των παλμών λόγω της παρουσίας ^{40}K και ^{214}Bi , τόσο στο φυσικό υπόστρωμα όσο και στον ίδιο τον άνθρωπο. Οι συντελεστές διόρθωσης υπολογίστηκαν για δύο ακραίους σωματότυπους εξεταζόμενων και διαπιστώθηκε πως οι τιμές τους είναι ανεξάρτητες της γεωμετρίας σε μεγάλο εύρος του φάσματος.

Πραγματοποιήθηκε ενεργειακή βαθμονόμηση και προσδιορισμός του μεγέθους του FWHM για διάφορες ενέργειες. Βρέθηκε μέσω του υπολογισμού των συντελεστών ενεργειακής βαθμονόμησης, ότι το σύνολο των ανιχνευτών παρουσιάζει γραμμική ενεργειακή συμπεριφορά που περιγράφεται από τις αντίστοιχες σχέσεις βαθμονόμησης στην περιοχή ενδιαφέροντος (Κεφάλαιο 5). Με σκοπό την αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος MCB δεκαέξι εισόδων, μελετήθηκε η απόκριση του συστήματος για ένα εύρος ρυθμών εκπομπής φωτονίων από την πηγή. Βρέθηκε ότι το σύστημα παρά τον ισχυρισμό του κατασκευαστή ότι διορθώνει ικανοποιητικά τον αριθμό των παλμών με συγκεκριμένη μεθοδολογία, παρουσιάζει μειωμένη απόδοση, η τιμή της οποίας σχετίζεται με το μέγεθος του νεκρού χρόνου. Με βάση την παρατήρηση αυτή προσδιορίστηκαν τα όρια σταθερής λειτουργίας της διάταξης και προέκυψε ότι ο αναγραφόμενος νεκρός χρόνος δεν πρέπει να υπερβαίνει το 25% (Κεφάλαιο 5).

Η διερεύνηση του προβλήματος της μη ικανοποιητικής αξιοπιστίας των μετρήσεων ανέδειξε την παρουσία ισχυρής πηγής ακτινοβολίας υποστρώματος στο χώρο του μετρητή μεταβλητού μεγέθους. Το μέγεθος της πηγής και η διακύμανση της ενεργότητάς της είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των τυχαίων σφαλμάτων των μετρήσεων. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με εφαρμογή κατάλληλης μαθηματικής διόρθωσης στα δεδομένα της μέτρησης για τη μείωση της επίδρασης των διακυμάνσεων στο σήμα υποστρώματος. Η μέθοδος αυτή βασίστηκε σε πειραματική μελέτη της εξάρτησης του αριθμού καταγραφόμενων παλμών στις φασματικές περιοχές ενδιαφέροντος με τον αριθμό των καταγραφόμενων παλμών στην φασματική περιοχή 1.69 – 1.84 MeV (περιοχή του ^{214}Bi). Για τη βελτίωση των συνθηκών μέτρησης εγκαταστάθηκε σύστημα αερισμού στο χώρο του δωματίου του MOA με δυνατότητα εισαγωγής, εξαγωγής και ανακύκλωσης αέρα στο δωμάτιο. Μετρήσεις σε ομοιώματα ^{40}K και ^{137}Cs έδειξαν σημαντική βελτίωση του μεγέθους

της αξιοπιστίας και μείωση του συντελεστή μεταβλητότητας των μετρήσεων έως και 75% με την εφαρμογή εξαναγκασμένης εισαγωγής αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον (Κεφάλαια 7 και 9).

Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση μετρήσεων με τη χρήση του κώδικα MCNP5 με σκοπό τη μελέτη της απόδοσης του συστήματος σε εξεταζόμενους με διαφορετικά σωματικά χαρακτηριστικά (Κεφάλαιο 8). Οι προσομοιώσεις έγιναν για δυο διαφορετικές ενέργειες φωτονίων και έδειξαν ότι για υψηλές ενέργειες της τάξης των 1.5 MeV η διαφορά στην απόδοση μεταξύ ακραίων σωματότυπων είναι 24%, ενώ για μεσαίες ως το 35%. Επιπλέον βρέθηκε ότι η πυκνότητα του ομοιώματος, άρα και η συγκέντρωση λίπους στις *in vivo* μετρήσεις, δεν επηρεάζει σημαντικά την ανιχνευτική απόδοση του MOA σε φωτόνια ενέργειας 1.46 MeV.

Η τεχνικές που αναπτύχθηκαν εφαρμόστηκαν σε μετρήσεις εθελοντών, οι οποίες κάλυψαν το φάσμα των σκοπούμενων χρήσεων του οργάνου. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της ολόσωμης ποσότητας καλίου και του ^{214}Bi που σχετίζεται συνήθως με εισπνοή ^{222}Rn . Οι σύγκριση της ποσότητας καλίου που μετρήθηκε άμεσα με τον MOA με αυτή που μετρήθηκε έμμεσα με την τεχνική της απορροφησιμετρίας διπλής ενέργειας (DXA) έδειξε καλή συμφωνία των δύο τεχνικών. Μετρήθηκαν επίσης ασθενείς στους οποίους είχε χορηγηθεί ραδιοφάρμακο και προσδιορίστηκαν οι ενεργότητες μακρόβιων ραδιενεργών προσμίξεων στο ραδιοφάρμακο. Επιπλέον, έγινε μικρός αριθμός μετρήσεων σε εργαζόμενους για λόγους ακτινοπροστασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Εισαγωγή

Οι Μετρητές Ολόσωμης Ακτινοβολίας (ΜΟΑ) χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιοϊατρικές εφαρμογές και στην ακτινοπροστασία, με σκοπό την ανίχνευση και ποσοτικοποίηση ραδιονουκλιδίων που εντοπίζονται στο σώμα και εκπέμπουν γ ακτινοβολία και ενίοτε για τον προσδιορισμό της βιοκατανομής τους. Τα ανιχνευόμενα ραδιονουκλίδια εντοπίζονται ως φυσικά συστατικά, ως αποτέλεσμα ιατρικών πράξεων ή ως στοιχεία ραδιενεργού ρύπανσης, εισερχόμενα στον οργανισμό μέσω διαφόρων οδών όπως π.χ. μέσω ενδοφλέβιας χορήγησης, εισπνοής ή κατάποσης. Στο Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων (ΕΙΦΠΙ) βρίσκεται εγκατεστημένος πρότυπος ΜΟΑ τύπου εγγύς θωράκισης με σάρωση κλίνης. Η ανίχνευση της ακτινοβολίας γίνεται μέσω δεκατεσσάρων κυλινδρικών ανιχνευτών NaI(Tl), ονομαστικών διαστάσεων 15.7 cm × 5.0 cm, που βρίσκονται τοποθετημένοι σε δύο ομάδες επάνω και κάτω από την εξεταστική κλίνη καθώς και δύο κυλινδρικών ανιχνευτών NaI(Tl), ονομαστικών διαστάσεων 29.2 cm × 10.2 cm, που είναι τοποθετημένοι σε ειδικές εσοχές δεξιά και αριστερά της κινούμενης κλίνης.

Αντικείμενο εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η λεπτομερής διερεύνηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την αξιοπιστία και την ακρίβεια των μετρήσεων του ΜΟΑ και η ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων για τη βελτίωση τους. Αναπτύχθηκε μέθοδος βαθμονόμησης, η οποία βασίστηκε σε μαθηματική προσομοίωση του μετρητή και των ομοιωμάτων. Η βελτιωμένη λειτουργικότητα του ΜΟΑ ελέγχθηκε μέσω μετρήσεων σε εθελοντές.

Μέθοδος

Διενεργήθηκαν μετρήσεις σε ανθρωπόμορφα ομοιώματα, τα οποία δομήθηκαν από πλαστικά δοχεία που περιείχαν υδατικά διαλύματα ^{40}K , ^{137}Cs και $^{99\text{m}}\text{Tc}$, καθώς επίσης και σε 50 περίπου ενήλικους εθελοντές διαφόρων ηλικιών και σωματικών δομών. Οι μετρήσεις υποστηρίχθηκαν από προσομοίωση Monte Carlo με χρήση του κώδικα MCNP. Η ακρίβεια των υπολογισμών του κώδικα ελέγχθηκε έναντι αποτελεσμάτων που προέκυψαν από πειραματικές μετρήσεις σε φυσικά ομοιώματα. Παρατηρήθηκε συμφωνία μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων.

Αποτελέσματα

Προκαταρκτικές μετρήσεις σε υγιείς εθελοντές με εκτιμώμενη ποσότητα ολόσωμου καλίου 143 g, παρουσίασαν βραχύχρονο συντελεστή μεταβλητότητας 5.3%, ο οποίος ήταν περίπου δύο φορές μεγαλύτερος από τον αναμενόμενο θεωρητικά. Βρέθηκε ότι η χαμηλή αξιοπιστία των μετρήσεων συσχετίζεται με τη μεταβλητότητα της συγκέντρωσης ραδονίου και των θυγατρικών του προϊόντων στον αέρα του δωματίου του μετρητή. Αναπτύχθηκαν δύο μέθοδοι για την βελτίωση της αξιοπιστίας. Εφαρμόστηκε διορθωτικός συντελεστής στο καταγραφόμενο σήμα των αντίστοιχων περιοχών ενδιαφέροντος, ο οποίος βασίστηκε στους μετρούμενους παλμούς που καταγράφονται στην ενεργειακή περιοχή των 1764 keV (υπό την παρουσία ^{214}Bi).

Εγκαταστάθηκε σύστημα αερισμού στο δωμάτιο του μετρητή στοχεύοντας στη μείωση και τη σταθεροποίηση των επιπέδων ραδονίου στο χώρο. Ο συντελεστής μεταβλητότητας των μετρήσεων σε ομοιώματα και εθελοντές μειώθηκε στο 2.96%.

Μελετήθηκαν εναλλακτικές μέθοδοι ανάλυσης φασμάτων για τον προσδιορισμό των καταγραφόμενων παλμών στις περιοχές των κορυφών των 661 keV και 1460 keV. Βρέθηκε ότι για μετρήσεις χαμηλών επιπέδων ραδιενέργειας, η βέλτιστη αξιοπιστία επιτεύχθηκε με απλή άθροιση των παλμών στις περιοχές ενδιαφέροντος με χρήση συμμετρικών παραθύρων πλάτους 1.23 φορές το FWHM και 1.28 φορές το FWHM για τις δύο κορυφές, αντίστοιχα. Βρέθηκε πειραματικά ότι η ανιχνευτική απόδοση του μετρητή μειώνεται όταν ο νεκρός χρόνος του συστήματος είναι μεγαλύτερος από 25%.

Προσομοιώσεις που διενεργήθηκαν για τη μελέτη της εξάρτησης της ανιχνευτικής απόδοσης του MOA από το σωματότυπο και ελέγχθηκαν με πειραματικές μετρήσεις σε ομοιώματα, έδειξαν διαφορές στη ανιχνευτική απόδοση φωτονίων 662 keV και 1460 keV σε σχέση με το σωματότυπο ως και 35% και 24% αντίστοιχα. Βρέθηκε επίσης ότι ακραίες μεταβολές της πυκνότητας του σώματος οδηγούν σε μεταβολή της απόδοσης της τάξης του 4.5% κατά την ανίχνευση φωτονίων ενέργειας 1460 keV.

Οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν, εφαρμόστηκαν σε *in vivo* μετρήσεις 50 ενηλίκων εθελοντών για τον προσδιορισμό της ολόσωμης ποσότητας ^{40}K και ^{214}Bi , σε δύο ασθενείς στους οποίους είχε χορηγηθεί ενδοφλέβια ποσότητα ^{153}Sm για τον προσδιορισμό των μακρόβιων ραδιενεργών προσμίξεων στο ραδιοφάρμακο και σε μετρήσεις ακτινοπροστασίας σε επαγγελματικά εκτιθέμενους εργαζόμενους.

Συμπεράσματα

Προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν για την διερεύνηση της επίδρασης στην απόδοση ανίχνευσης, που οφείλεται στις διαστάσεις και την σύσταση του σώματος. Βρέθηκε το βέλτιστο ενεργειακό παράθυρο για την επεξεργασία φασμάτων ^{137}Cs και ^{40}K . Επίσης βρέθηκε ότι η απόδοση ανίχνευσης μειώνεται όταν ο νεκρός χρόνος είναι μεγαλύτερος από 25%.

Βρέθηκε ότι η αξιοπιστία των μετρήσεων επηρεάζεται από την μεταβλητότητα των επιπέδων ενεργότητας του ραδονίου και των θυγατρικών προϊόντων στον αέρα. Η εφαρμογή μεθόδου αερισμού και της ημι-εμπειρικής μεθόδου διόρθωσης που αναπτύχθηκε βελτίωσαν την αξιοπιστία των μετρήσεων.

Ο MOA χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της ολόσωμης ποσότητα καλίου σε ενήλικες εθελοντές, για την ανίχνευση και ποσοτικοποίηση ραδιενεργών προσμίξεων σε ασθενείς στους οποίους χορηγήθηκε ^{153}Sm και για την εκτίμηση των επιπέδων ρύπανσης σε επαγγελματικά εκτιθέμενους εργαζόμενους.

SUMMARY

Background information

Whole Body Counters (WBC) are widely used for biomedical and radiation protection purposes, aiming at the detection and quantification of gamma emitting, radionuclides located in the body and in some cases the determination of their bio-distribution. The measured radionuclides are present in the organism either as naturally occurring ones or as a result of medical procedures or as contamination material that entered into the living organism through various pathways, e.g. intravenous injection, inhalation, ingestion. A prototype, shadow shield, moving bed WBC was installed at the University of Ioannina Medical Physics Laboratory. Radiation detection is carried out by fourteen cylindrical NaI(Tl) detectors with nominal dimensions $15.7 \text{ cm} \times 5.0 \text{ cm}$, located in groups of seven above and below the examination bed and two cylindrical NaI(Tl) detectors with nominal dimensions $29.2 \text{ cm} \times 10.2 \text{ cm}$ located in special recesses on the right and on the left sides of the scanning bed.

Scope of the study

Scope of the present study was the detailed investigation of the parameters affecting the WBC measurement precision and accuracy and the development and implementation of methods to improve them. A novel counter calibration method was developed based on mathematical modeling of the counter and phantom configuration. The improved WBC effectiveness was tested by measurements carried out in volunteers.

Method

Measurements were conducted on anthropomorphic phantoms composed of plastic bottles that contained ^{40}K , ^{137}Cs and $^{99\text{m}}\text{Tc}$ solutions in water and a set of 50 adult volunteers of various ages and body structures. Measurements were supported by Monte Carlo simulations of the WBC system performed using MCNP code. The accuracy of the MCNP calculations were tested against experimental results in physical phantoms and agreement was observed with theoretical predictions.

Results

Preliminary measurements carried out on a healthy individual with estimated total body potassium of 143g showed short-term coefficient of variation of 5.3%, approximately two times higher than the corresponding theoretical value. It was found that the poor measurement precision correlated with the variation of radon and its daughter products concentration in the air of the counting room. Two methods were developed to improve precision. First, a correction factor was applied on the registered counts in the regions of interest (RoI) based on the measured counts found in the 1764 keV (^{214}Bi presented) spectrum area. Second, a ventilation system was installed in the WBC room, aiming at the reduction and stabilization of radon levels in the area. As a result, the measurements coefficient of variation of both phantoms and individuals was decreased to 2.96%.

Different gamma spectrum analysis methods were studied for the determination of the registered counts in the areas around the 661 keV and 1460 keV peaks. It was found that in measurements of low level radioactivity, the optimal precision was obtained by simple summing of the counts in the regions of interest, using a symmetrical window of 1.23 times FWHM and 1.28 times FWHM width for the two peaks respectively. It was found that the counter detection performance was reduced when the system dead time is higher than 25%.

Simulations, performed to study the WBC efficiency dependence with the examinee body size and checked with experimental measurements in phantoms, showed differences in the detection efficiency of photons of 662 keV and 1460 keV energy, according to the body size, that approximate 35% and 24% respectively. Moreover, it was found that extreme alterations in the body density led to efficiency variations of 4.5% for 1460 keV photon detection.

The developed methods were applied for *in vivo* measurements of 51 adult volunteers for the determination of the total body ^{40}K and ^{214}Bi quantity in the body, in 2 patients who were injected with ^{153}Sm for the determination of long-term radioactive impurities in the provided pharmaceutical and radiation protection measurements in occupationally exposed workers.

Conclusions

It was found that the system precision was affected by the variation of radon and its daughter products air activity concentration variation in the WBC room. Implementation of both room ventilation and semi-empirical correction factor derived by Monte Carlo simulations of the WBC and phantom system improved significantly the coefficient of variation the measurement of ^{40}K in adult volunteers.

Optimal precision results were achieved by simple summing of the counts in the regions of interest, using a symmetrical window of 1.23 times FWHM and 1.28 times FWHM width for the ^{137}Cs and ^{40}K peaks respectively. It was also found that the counter detection performance was reduced when the system dead time is higher than 25% and therefore an upper count-rate detection level was set.

The system simulations showed differences in the detection efficiency of photons of 662 keV and 1460 keV energy, according to the body size, that approximate 35% and 24% respectively, whereas extreme alterations in the body density result in efficiency variations of 4.5% for 1460 keV photon detection.

The improved prototype Ioannina WBC was used for the measurement of whole body potassium of adult volunteers, detection and quantification of radioactive impurities in ^{153}Sm treated patients and evaluation of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ contamination in occupationally exposed hospital personnel.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Albanese CV., Diessel E., Genant HK.: *Clinical applications of body composition measurements using DXA*, *J. Clin. Dens.*, 6(2): 75-85 (2003)
2. Al Hallak MN., McCurdy M., Hayes JJ., Zouain N.: *The level of ¹⁵⁴Eu contaminating samarium-153 EDTMP activates the radiation alarm system of the US Homeland security checkpoints*. *Case Report Oncol.*, 2:157-161 (2009)
3. American National Standards Institute/Health Physics Society: *Specifications for the Bottle Manikin Absorption Phantom*, Health Physics Society, ANSI N13.35 (1999)
4. Anagnostakis M.J., Hinis EP., Simopoulos S.E., Angelopoulos M.G.: *Natural radioactivity mapping of Greek surface soil*, *Environment International*, 22(Suppl. 1): S3-S8 (1996)
5. Anderson EC.: *The Los Alamos Human Counter*, *Br. J. Radiol.*, Suppl 7: 27-32 (1956)
6. Andrási A., Kötél G.: *NaI(Tl) detector efficiency calculations for distributed sources in a human phantom*, *Int. J. Appl. Rad. Isot.*, 26: 451-454 (1975)
7. Andrews GA., Gibbs WD., Morris AC., Ross DA.: *Whole Body Counting, Seminars in Nuclear Medicine*, 3: 367-388 (1973)
8. Baedeker PA.: *Digital Methods of Photopeak Integration in Activation Analysis*, *Anal. Chem.*, 43: 405 (1971)
9. Bahrani-Samani A., Ghanannadi-Maragheh M., Jalilian AR., Yousefina H., Garousi J., Moradkahi S.: *Development of ¹⁵³Sm-DTPA-rituximab for radioimmunotherapy*, *Nuklenika*, 54: 271-277 (2009)
10. Βαλάκης ΣΘ.: *Βαθμονόμηση και ποιοτικός έλεγχος Μετρητή Ολόσωμης Ακτινοβολίας με δύο Ανιχνευτές NaI(Tl)*, Διπλωματική εργασία ΔΔΜΠΣ, Ιωάννινα (2006)
11. Balcazar M., Chavez A., Pina-Villalpando G., Alfaro M., Mendoza D.: *Radon decay products attached to clothes in a nuclear laboratory*, *Rad. Meas.*, 31: 337-342 (1999)
12. Bewley DK.: *Anthropomorphic models for checking the calibration of whole-body counters and activation analysis systems*, *Phys. Med. Biol.*, 33(7): 805-813 (1988)
13. Bird PM., Burch PRJ.: *The relative performance of large volume plastic and liquid scintillators*, *Phys. Med. Biol.*, 23: 217-228 (1958)
14. Bland JM., Altman DG.: *Comparing methods of measurement: why plotting difference against standard method is misleading*, *Lancet*, 346: 1085-87 (1995)
15. Bland JM., Altman DG.: *Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement*, *Lancet* 8: 307-10 (1986)
16. Briesmeister J.F.: *MCNP –A general Monte-Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B*, Los Alamos National Laboratory. LANL Manual LA-12625-M Version 4B, Los Alamos (1997)

17. Boddy K.: A high sensitivity shadow-shield whole body monitor with scanning-bed and tilting chair geometries, incorporated in a mobile laboratory, *Br. J. Radiol.*, 40: 631-637 (1967)
18. Boddy K.: *The development and performance of a prototype shadow-shield whole body monitor*, *Phys. Med. Biol.*, 12(1): 43-50 (1967)
19. Boddy KCP., Tothill P., Strong JA.: *Measurement of Total Body Potassium with a Shadow Shield Whole-Body Counter: Calibration and Errors*, *Phys. Med. Biol.*, 16(2): 275-282 (1971).
20. Brodsky A.: *Accuracy and detection limits for bioassay measurements in radiation protection-statistical considerations*, NUREG-1156, U.S. Nuclear Regulatory Commission Washington, D.C. (1986)
21. Burkinshaw L.: *Measurement of body potassium. Calibration and intercomparison of two whole body counters*, *Phys. Med. Biol.*, 12(4): 477-488 (1967)
22. Carter L. L., Schwarz R. A., MCNP Visual Editor Computer Code Manual (2005)
23. Cherry SR., Sorenson JA., Phelps ME.: *Physics in Nuclear Medicine*, Saunders, 3d ed., Pennsylvania, USA (2003)
24. Clouvas A., Xanthis S., Antonopoulos-Domis M.: *Radiological maps of outdoor and indoor gamma dose rates in urban Greek areas obtained by in situ gamma spectroscopy*, *Radiat. Prot. Dosim.*, 112: 267-275 (2004)
25. Cohn SH., Dombrowski CS.: *Absolute measurement of whole body potassium*, Cohn SH, Parr RM: "Nuclear-based techniques for in vivo study of the human body composition", *Clin. Phys. Physiol. Meas.*, 6: 275-301, (1985)
26. Cohn SH., Dombrowski CS., Pate HR.: *A whole-body counter with an invariant response to radionuclide distribution and body size*, *Phys. Med. Biol.*, 14(4): 645-658 (1969)
27. Constantinides C., Binopoulos D., Malamos B.: *The use of a clinical whole-body counter in long-term exchangeable sodium studies for the comparison of the effects of different diuretics*, *J. Pharmac. Exp. Ther.*, 156: 369-374 (1967)
28. Corcoran C., Anderson EJ., Burrows B., Stanley T., Walsh Mark., Poulos AM., Grinspoon S.: *Comparison of total body potassium with other techniques for measuring lean body mass in men and women with AIDS wasting*, *Am. J. of Clin. Nutr.*, 72: 1053-8 (2000)
29. Currie L A.: *Limits for qualitative detection and quantitative determination*, *Anal. Chem.*, 40: 586-593 (1968).
30. Delwalde PA.: *Potassium measurements by whole body counter*, *J. Nucl. Med.*, 14: 40-48, (1974)
31. Department of Energy: *Standard Nuclear Instrument Module*, DOE/ER-04571, TID-20893 (1968)
32. Ellis KJ.: *Human body composition: In vivo methods*, *Physiology Reviews*, 80: 469- 675, (2000)
33. Evans RD.: *Radium poisoning II The quantitative determination of radium content and radium elimination rate in living persons*, *Am. J. Roentgenol.*, 37: 368-378 (1937)

34. Fisher H., Havlik E., Wiessi K., Grenegger S., Sinzinger H.: *Radioactive impurities of $^{153}\text{Sm-EDTMP}$ - consequences of treatment*, J. Nucl. Med., 20(Supl. 2) : 206, (2003)
35. Forbes G., Gallup J., Hursh J.: Estimation of total body fat from Potassium-40 content, Science, 133: 101-102 (1961)
36. Ghanem SA.: *Monte Carlo calculations of the response features for NaI detectors*, Appl. Rad. Isot., 53: 877-880 (2000)
37. Gilmore G.: Practical Gamma-ray Spectrometry, 2nd ed. Wiley, New York (2008)
38. Hansen RD., Allen J.: *Calibration of a total potassium monitor with an anthropomorphic phantom*, Phys. Med. Biol., 41: 2447-2462 (1996)
39. Harshaw Chemie B.V. De Meern Holland: product catalogue
40. Hayes J.J., Pfund J., Zouain N.: *Detection of ^{154}Eu in patients post $^{153}\text{Sm-EDTMP}$ therapy using a clinical gamma camera*, Health Phys., 98: 535-541 (2010)
41. Health Physics Society: An American National Standard: Performance criteria for radiobioassay, HPP N3.300-1998, Health Physics Society, Lean VA (1996)
42. Helmer RG., Heath RL.: *Photopeak Analysis Program for Photon Energy and Intensity Determinations, Ge(Li) and NaI(Tl) Spectrometers*, Nucl. Instr. Meth., 57: 46-57 (1967)
43. Hendriks PH.: Full-spectrum analysis of natural γ -ray spectra, journal of Env. Rad., 53: 365-380 (2001)
44. IAEA: *Airborne gamma ray spectrometer surveying*, TRS, No. 323, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (1991)
45. IAEA Criteria for palliation therapy of bone metastasis- clinical considerations, IAEA-TECDOC-1549, Vienna, Austria (2007)
46. IAEA: *Directory of Whole-Body Radioactivity Monitors (STI/PUB/213)*, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (1970)
47. IAEA: INSAG-7, The Chernobyl accident, Safety Series, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (1992)
48. IAEA: International fact finding expert mission of the Fukushima Dai-Ichi NPP accident following the great east Japan earthquake and tsunami, International Atomic Energy Agency, Mission Report, Tokyo (2011)
49. IAEA: *Quantifying uncertainty in nuclear analytical measurements, TECDOC-1401*, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (2004)
50. IEEE: *Standard Test Procedures for Germanium Gamma-Ray Detectors*, IEEE, Std 325-1996 (1997)
51. Ioannides K., Patiris D., Papachristodoulou C.: *Indoor radon concentrations in work places and dwelling in North-Western Greece*, Rad. Prot., 44: 165-169 (2009)
52. International Commission on Radiological Protection (ICRP): *Phantoms and Computational models in therapy, diagnosis and protection*, Publication No. 48, Pergamon Press, Oxford (1992)
53. International Commission on Radiological Protection (ICRP): *Report of the Task Group on Reference Man*, Publication No. 23, Pergammon Press, Oxford (1975)

54. Ishikawa T., Matsumoto M., Uchiyama M.: *A calibration method for whole body counters using Monte-Carlo simulation*, Rad. Prot. Dos., 64(4): 283-288 (1996)
55. Ishikawa T., Uchiyama M.: *Estimation of the counting efficiencies for individual subjects in ^{137}Cs whole-body counting, using voxel phantoms*, Rad. Prot. Dos., 71 (3): 195-200 (1997)
56. Ishikawa T., Uchiyama M., Hoshi M., Takada J., Edno S., Sugiura N., Kosako T., Shimizu I.: *New in-vivo calibration phantoms and their performance*, Health Phys., 82(3), 348-357 (2002)
57. Jenkins R., Gould R. W., Gedge D.: *Quantitative X-ray Spectrometry*, 2nd ed., Marcel Dekker Inc., New York, USA (1995)
58. Jurza P., Campbell I., Robinson P., Wackerle R., Cunneen P., Pavlik B.: *Use of ^{214}Pb photopeaks for Radon removal: utilizing current airborne gamma-ray spectrometer technology and data processing*, Exploration Geophysics, 36: 322-328 (2005)
59. Kalef-Ezra J., Hatzikonstantinou I., Leontiou I., Glaros D.: *Whole body ^{137}Cs and ^{134}Cs in the Greek population following the 1986 Chernobyl accident*, Rad. Prot. Dos., 42: 51-54 (1992)
60. Kehayias JJ., Fiatarone MA., Zhuang H., Roubenoff R.: *Total body potassium and fat relevance to aging*, Am. J. Clin. Nutr., 66: 904-10 (1997)
61. Knoll FG.: *Radiation Detection and Measurement*, Wiley, 3d ed., New York (2000)
62. Kokta L.: *Determination of Peak Area*, Nucl. Instr. Meth., 112: 245-251 (1973)
63. Kramer GH., Burns L., Guerriere S.: *Monte Carlo simulation of a scanning detector whole body counter and the effect of BOMAB phantom size on the calibration*, Health Phys., 83(4): 523-533 (2002)
64. Kramer GH., Burns L., Noel L.: *The BRMD BOMAB phantom family*, Health Phys., 61(6): 895-902, (1991)
65. Kramer GH., Hauck BM., Allen SA.: *Comparison of the LLNL and JAERI torso phantoms using Ge detectors and phoswich detectors*, Health Phys., 74(5): 594-601, (1998)
66. Kramer GH., Loesch RM., Olsen PC.: *The second international in vivo monitoring intercomparison program for whole body counting facilities by Canadian and United States agencies*, Health Phys., 80(3): 214-224 (2001)
67. Kramer GH., Kenneth GWI.: *A summary of the proceedings of the workshop on standard phantoms for the in vivo radioactivity measurement*, Health Phys., 61(6): 893-894 (1991)
68. Kramer GH., Lee TY., Kim JS.: *A joint HML-KAERI project-comparison of the LLNL and JAERI torso phantoms using four 50 mm Ge detectors*, Health Phys., 74(5): 613-618 (1998)
69. Kramer GH.: *The Canadian Whole Body Counting Intercomparison program: a summary report for 1989-1993*, Health Phys., 69(4): 560-565 (1995)

70. Larsson I., Lindroos AK., Peltoenns M., Sjostrom L.: *Potassium per kilogram fat-free mass and total body potassium: predictions for sex, age, and absorptiometry*, A.M.: J. Physiol. Endocrinol. Metabol., 284: E416, E423 (2003)
71. Λεοντίου Ι.: *Πρωτότυπος μετρητής ολοσώμου γ-ακτινοβολίας και η χρήση του στον in-vivo προσδιορισμό του ραδιενεργού καλίου και καισίου*, Διδακτορική διατριβή, Ιατρική Σχολή Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, Ιωάννινα (1990)
72. Leo WR.: *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (1987)
73. Lykken GI., Lukaski HC., Bolonchuk, WW., Sandstead HH.: *Potential errors in body composition as estimated by whole body scintillation counting*, J. Lab. Clin. Med., 101: 651-658 (1983)
74. Lykken GI., Ong WS.: *Evidence of exhalation of stored environmental Rn determined by whole body counting*. Health Phys., 57: 161-162 (1989)
75. Lykken GI., Ong WS., Patrick D., Wielopolski L.: *Rn-222 and Rn-222 progeny in the human body: Effect on In Vivo K-40 Measurements*, Basic life sciences, Plenum Press, 55: 361-363, London (1990)
76. Lykken GI., Speaker, K K., Mackichan AK.: *Estimation of total body potassium in the presence of interfering radio-isotopes*, in: "In Vivo Body Composition Studies," K. J. Ellis, S. Yasumura, and W. D. Morgan, eds., The Institute of Physical Sciences in Medicine: 111-117 London (1987)
77. Lykken GI., Ong WS., Alkatib HA., Harris TR., Momcilovic B., Penland JG.: *Perquisite spin-off from twent-two years of measuring background in the WBC steel room*. in In vivo body composition studies (Yasumura S, Wang J, Pierson RN editors) Annals New York Academy Sciences, 904 : 267-270 (2000)
78. Lykken GI., Ong WS., Penland JG.: *Radon in humans: more dynamic than we thought?* Health Phys., 58(Suppl) S32, 1990)
79. Lykken GI., Bolonchuk W., Momcilovic B., Jagam P.: *Radon in body, as exemplified by ²¹⁴Bi gamma ray emissions, a natural occurring environmental toxin?* FASEB 21: 868 (2007).
80. Ma D., Kettring AR., Eihardt GJ.: *Production of radiolantanides and radiotherapy research at MURR*, J Radioanal Nucl Chem 206: 119-126 (1996)
81. Mackie A., Hannan WJ., Tothill P.: *An introduction to body composition models used in nutritional studies*, Vlin. Phys. Physiol. Meas., 10(4), 297-310 (1989)
82. Marinelli CE.: *The use of NaI-Tl crystal spectrometer in the study of gamma-ray activity in vivo: a summary of developments at the Argonne National Laboratory*, Br. J. Radiol., Suppl 7.: 38-43 (1957)
83. Mehl J.: *Single and multiple detector systems for whole body counting*, In *Instrumentation in Nuclear Medicine* (Hine G, edit). Academic Press, (1967)
84. Minty BRS.: *Airborne gamma-ray spectrometric background estimation using full spectrum analysis*, Geophysics, 57: 279-287 (1992)
85. Minty BRS.: *Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry*, AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, 17: 39-50 (1997)

86. Minty BRS.: Luyendyk A.P.J., Brodie RC.: *Calibration and data processing for gamma-ray spectrometry*, AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, 17: 51-62 (1997)
87. Minty BRS., McFadden P., Kennett B L N.: *Multichannel processing for airborne gamma-ray spectrometry*, Geophysics, 63: 1971-1985 (1998)
88. Minty BRS.: *Multichannel models for estimation of Radon background in airborne gamma-ray spectrometry*. Geophysics, 63: 1986-1996 (1998)
89. Momcilovic B., Lykken GI.: *Seasonality of ^{214}Bi activity in the human body and of ^{222}Rn concentrations in home ambient air*, Health Phys., 92(5):484-487 2007
90. Moro L., Fantinato D., Frigerio F., Shaman G., Angelovski G.: *Europium-154 contamination levels in samarium-153-EDTMP for radionuclide therapy*. Journal of Physics: conf Ser 41: 535-537 (2006)
91. Mudhole TS., Umakantha NA.: *Simple Method to Determine the Resolving time of a NaI(Th) scintillation Detector*, Nucl. Instr. Meth., 123: 405-407 (1975)
92. Muller, J W.: *Some second thoughts on error statements*. Nucl. Instrum. Methods, 163(1): 241-251 (1979)
93. National Instruments: NI-488.2 Software Reference Manual, December (1992)
94. Neuberger JS., Nazir N., Keighley J., Lynch S.: *Residential radon exposure and multiple sclerosis: a pilot study*, Proceedings of the 2011 international AARST symposium, 16-19 Oct 2011
95. Noz MM.: *Simple method for reducing shadow-shield background*, Health Phys., 39: 303-305 (1980)
96. O' Hehir S., Green S., Beddoe A.: *A new method of body habitus correction for the total body potassium measurements*, Phys. Med. Biol., 51: 4253-65 (2006)
97. Oliveira CAN., Lourenco MC., Dantas BM., Lucena EA., Bertelli L., Laurer G.R. *The IRD/CNEN whole-body counting facility. Background and calibration results*. Health Phys .,29: 203-208 (1989)
98. ORTEC: MAESTRO®-32 MCA Emulator for Microsoft® Windows® 2000 Professional and XP® Professional, A65-B32, Software User's Manual
99. ORTEC: MCB CONNECTIONS-32 Hardware Property Dialogs Manual
100. Oxford Instruments: Introduction Manual, DMR II, 601 Oak Ridge Turnpike, Oak Ridge, TN 37831-2560
101. Oxford Instruments: Introduction Manual, PCA-Multiport, 601 Oak Ridge Turnpike, Oak Ridge, TN 37831-2560
102. Oxford Instruments: Introduction Manual, TB3A NIM BIN, 601 Oak Ridge Turnpike, Oak Ridge, TN 37831-2560
103. Oxford Instruments: Introduction Manual, TC 145 PREAMP, 601 Oak Ridge Turnpike, Oak Ridge, TN 37831-2560
104. Oxford Instruments: Introduction Manual, TC 247 DUAL AMPLIFIER, 601 Oak Ridge Turnpike, Oak Ridge, TN 37831-2560

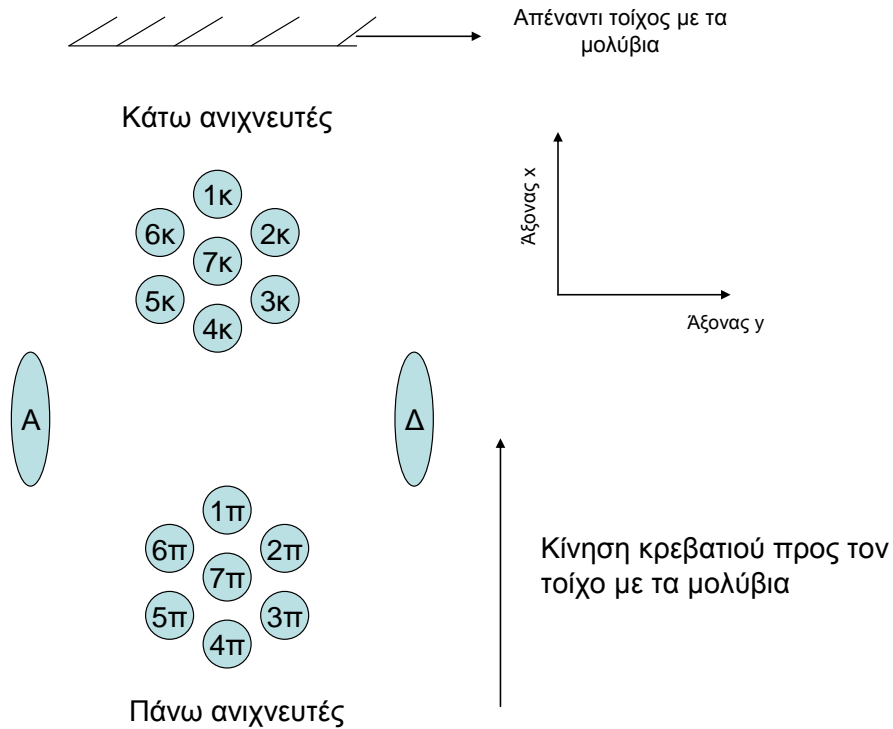
- 105.** Papachristodoulou CA., Patiris DL., Ioannides KG.: *Exposure to indoor radon and natural gamma radiation in public workplaces in north-western Greece*, Rad. Meas., 45: 865-871 (2010)
- 106.** Papastefanou C., Manolopoulou M., Hourdakias C.: *Cesium 137/134 in Human Body in Greece Following Chernobyl*, Env. Int., 14: 145-148 (1988)
- 107.** Parrthasarathy KS.: *Influence of the decay products of ^{222}Rn on the background counting rate of a sensitive whole-body radioactivity monitor*, Nucl. Instr. Meth., 136: 585-597 (1976)
- 108.** Parrthasarathy KS.: *The variations in the background counting rate of a sensitive whole-body radioactivity monitor based on plastic scintillators*, Nucl. Instr. Meth., 134: 591-594 (1976)
- 109.** Pierson RN., Wang J., Thorton JC., VanItallie TB., Colt EWD.: *Total Body potassium by four-pi 40K counting: an anthropometric correction*, Am. J. Physiol., 246: 234-239 (1980)
- 110.** Podgorsak EB.: *Radiation Physics for Medical Physicists*, Springer Berlin (2006)
- 111.** Pomme S., Robouch P., Eguskiza GA., Maguregui MI.: *Is it safe to use Poisson statistics in nuclear spectrometry*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 244: 501-506 (2000)
- 112.** Probonas M., Kritidis P.: *The exposure of a Greek population to natural gamma radiation of terrestrial origin*, Radiat. Prot. Dosim., 46: 123-126 (1993)
- 113.** Rabinovic SG.: *Measurement Errors and Uncertainties-Theory and Practice*, Springer, Berlin (2005)
- 114.** Raguso CA., Kyle U., Kossovsky MP., Roynette C., Paolinip Giacobino A., Hans D., Genton L., Pichrad C.: *A 3-year longitudinal study on body composition changes in the elderly: role of physical exercise*, Clin. Nutr., 25: 573-580 (2006)
- 115.** Ramammorthy N., Srarswathy P., Das MK., Mehra KS., Ananthakirshnan M.: *Production logistics and radionuclide purity aspects for ^{153}Sm radionuclide therapy*, Nucl. Med. Commun., 23: 83-89 (2002)
- 116.** Reus U., Westmeier W.: *Catalog of gamma-rays from radioactive decay*, Part 1, Atomic Data and Nuclear Data Tables (1983)
- 117.** Reus U., Westmeier W.: *Catalog of gamma-rays from radioactive decay*, Part 2, Atomic Data and Nuclear Data Tables (1983)
- 118.** Rogers DWO.: *More realistic Monte-Carlo calculations of photon detector response functions*, Nucl. Instr. and Meth., 199: 531-548 (1982)
- 119.** Rogers JA., Blake-James M., Green S., Beddoe AH.: *Investigation into the relationship between body surface area and total body potassium using Monte Carlo and measurement*, Phys. Med. Biol., 47: 789-800 (2002)
- 120.** Schlagbauer M., Hrenecek E., Rollet S., Fischer H., Brandl A., Kindl P.: *Uncertainty budget for a whole body counter in the scan geometry and computer simulation of the calibration phantoms*, Rad. Prot. Dos., 125: 149-152 (2007)
- 121.** Schlundt H., Harker H., Flimm F.: *The detection and estimation of radium and mesothorium in living persons*, Am. J. Roentenol., 21: 345-354 (1929)

- 122.** Schmier H.: *Optimum shielding conditions for low-level whole-body activity measurements*, Proc Symp Assessment of radiation contamination in man, Stockholm Nov. 1971, IAEA-SM-159, IAEA, Vienna, Austria (1972)
- 123.** Shypailo RJ., Ellis KJ.: *Whole body counter calibration using Monte Carlo modeling with an array of phantoms sizes based on national anthropometric reference data*, Phys. Med. Biol., 56: 2979-2997 (2011)
- 124.** Sievert RM.: *Measurement of γ -radiation from the human body*, Ark Fysik, 18: 337 (1951)
- 125.** Sjoström L., Kvist H., Cederblom A., Tylen U.: *Determination of total adipose tissue and body fat in women CT, ^{40}K and tritium*. Endocrinol. Metab., 13: E736-E745 (1986)
- 126.** Σουψανάς Θ.: *Κατασκευή Αναβαθμισμένου Μετρητή Ολόσωμης Ακτινοβολίας, Διπλωματική εργασία ΔΜΠΣ, Ιωάννινα (2004)*
- 127.** Stanga D., Muntele I.: *Importance of covariances for uncertainty estimates in measurement of radionuclide mixtures by multichannel counting*, Appl. Rad. Isot., 52: 621-626 (2000)
- 128.** St-Onge MP., Wang JSW., Allison D B., Heshka S., Pierson RN., Heymsfield SB.: *Dual x-ray absorptiometry-measured lean soft tissue mass: differing relation to body cell mass across the adult life span*, J. Gerontol. A: Biol. Sci. Med., 59: 796-800 (2004)
- 129.** Supian BS., Green S., Beddoe AH.: *The ^{40}K activity in one gram of potassium*, Phys. Med. Biol., 42: 407-413 (1997)
- 130.** Suomela M., Kahlos H.: *Studies on the elimination rate and the radiation exposure following ingestion of ^{222}Rn rich water*, Health Phys., 23: 641-652 (1972)
- 131.** Toohey R.: *Whole Body Working Group: "Current status of whole-body counting as a means to detect and quantify previous exposures to radioactive materials"*, Health Phys., 60(sup.1): 7-42, (1991)
- 132.** Toombs RJ., Ducher G., Shepherd JA., De Souza MJ.: *The impact of recent technological advances on the trueness and precision of DXA to assess body composition*, Obesity, 20: 30-39 (2012)
- 133.** Tsoulfanidis N., *Measurement and Detection of Radiation*, 2nd ed., Taylor & Francis, Washington D.C. (1995)
- 134.** Τζίμα Ε.: *Σχεδίαση και Ανάπτυξη Πρότυπου Μετρητή Ολόσωμου ακτινοβολίας, Διδακτορική διατριβή, Ιατρική Σχολή Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, Ιωάννινα (2003)*
- 135.** Uehara S., Endo S., Takada J., Hoshi M.: *Monte-Carlo simulation of in vivo measurements of $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ bremsstrahlung*, Health Phys., 74 (1): 30-37 (1998)
- 136.** Ulanovsky AV., Minenko VF., Korneev SV.: *Influence of measurement geometry on the estimate of ^{131}I activity in the thyroid: Monte-Carlo simulation of a detector and a phantom*, Health Phys., 72(1): 34-41 (1997)
- 137.** Vennart J.: Nature, 4963: 1041-1046 (1964)
- 138.** Venturini L., Campos VP., Berti EAR.: *An approach for the efficiency calibration of whole body counters*, Health Phys., 81(5): 580-584 (2001)

- 139.** Wang ZM., Heshka S., Pietrobellia, Chen Z., Milva AM., Sardina B.: *A new total body potassium method to estimate total body skeletal muscle in children*, J. Nutr., 137: 1981-1991 (2007)
- 140.** Winkler G.: *On the role of covariances for uncertainty estimates in radioactivity Measurements*, Appl. Radiat. Isot., 49: 1153-1157 (1998)
- 141.** Xie Goerge Xu and Keith F. Eckerman: *Handbook of Anatomical Models for Radiation Dosimetry*, Taylor & Francis, New York (2010)
- 142.** X-5 Monte Carlo Team, –A general Monte-Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Los Alamos National Laboratory.LANL Manual LA-UR-03-1987 Version 5, Los Alamos(2005)
- 143.** Zar JH. *Biostatistical analysis*. 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, (1984)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α- ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ

Προσδιορισμός αντιστοιχίσεως αριθμού ανιχνευτή (#No) με input στο MCA. Ειδική σημειολογία αντιστοίχισης- (A)(B)(C), όπου (A)= αριθμός ανιχνευτή βάση της καθιερωμένης ονοματολογίας, (B)=αριθμός input MCA, (C)=αριθμός ανιχνευτή στον κώδικα. (Βλέπε Σχήμα Α-1. και Πίνακα Α-1).



Σχήμα Α-1: (επεξήγηση σχήματος), στο παρόν σχήμα παρουσιάζεται η διάταξη των ανιχνευτών μέσα στο τούνελ. Οι κατευθύνσεις έχουν δοθεί σύμφωνα με την τοποθέτηση του εξεταζόμενου πάνω στην εξεταστική κλίνη. Οι αριθμοί μέσα στους κύκλους είναι αυτοί που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μέτρηση των αποστάσεων για την σχεδίαση του κώδικα. Οι ανιχνευτές με το ίδιο νούμερο είναι απέναντι ο ένας στον άλλο (κάτω-πάνω).

Πίνακας Α-1: ονοματολογία (A)(B)(C)

Αριθμός Ανιχνευτή (με βάση το σχήμα α)	Νούμερο στοιχείου (Α) Κλασική Ονοματολογία	Νούμερο στοιχείου (Β) MCA Input	Νούμερο στοιχείου (C) MCNP5
1κ	38	12	9
2κ	46	10	11
3κ	6	2	12
4κ	2	1	10
5κ	36	6	14
6κ	29	13	13
7κ	8	9	8
1π	unknown	7	2
2π	4	11	4
3π	48	14	5
4π	27	5	3
5π	11	8	7
6π	32	16	6
7π	7	3	1
Α	Α	15	15
Δ	Δ	4	16

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β-ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ ΜΟΑ

Πίνακας Β-1: Πειραματικές τιμές FWHM ανιχνευτών για διάφορες ενέργειες

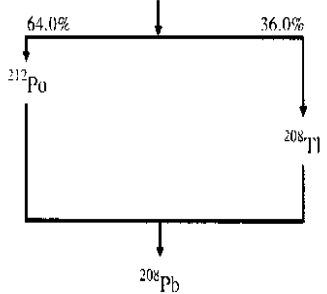
Isotope	¹¹¹ Cd	⁵¹ Cr	¹⁹⁸ Au	²⁰¹ Tl	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	¹⁵² Eu	^{99m} Tc-
Energy (MeV)	0.245	0.320	0.412	0.440	1.461	0.662	0.122	0.141
1 (INPUT)	0.039	0.044	0.046	0.054	0.106	0.063	0.023	0.035
2	0.055	0.059	0.069	0.077	0.146	0.087	0.030	0.053
3	0.048	0.050	0.060	0.061	0.140	0.075	0.028	0.048
4	0.061	0.058	0.069	0.081	0.193	0.097	0.030	0.040
5	0.047	0.048	0.065	0.064	0.121	0.071	0.027	0.047
6	0.042	0.049	0.052	0.063	0.107	0.068	0.027	0.044
7	0.061	0.059	0.080	0.082	0.163	0.089	0.034	0.053
8	0.062	0.061	0.074	0.076	0.195	0.101	0.033	0.048
9	0.040	0.044	0.050	0.052	0.102	0.063	0.025	0.046
10	0.052	0.055	0.059	0.070	0.158	0.082	0.029	0.049
11	0.058	0.051	0.065	0.073	0.126	0.078	0.031	0.050
12	0.039	0.045	0.051	0.058	0.121	0.067	0.025	0.041
13	0.051	0.052	0.058	0.064	0.125	0.077	0.028	0.045
14	0.065	0.062	0.127	0.090	0.188	0.096	0.033	0.051
15	0.069	0.064	0.089	0.074	0.201	0.096	0.043	0.033
16	0.046	0.043	0.067	0.060	0.088	0.064	0.026	0.041
Μέση τιμή	0.052	0.053	0.068	0.069	0.142	0.080	0.030	0.045

Παράρτημα Γ- ΣΧΗΜΑΤΑ ΑΠΟΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΣΕΙΡΩΝ ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th
Πίνακας Γ-1: Το σχήμα αποδιέγερσης του ^{238}U [Minty 1997]

Σχήμα	Ισότοπο	Ημιζωή	Ενέργεια (keV)	Απόδοση εκπομπής ανά διάσπαση (%)
<p>The diagram illustrates the decay chain of ^{238}U. It starts with ^{238}U at the top, which decays to ^{234}Th. ^{234}Th decays to ^{234}Pa. From ^{234}Pa, there is a 99.86% branch to ^{234}U and a 0.14% branch to ^{234}mPa. ^{234}U decays to ^{230}Th, which then decays to ^{226}Ra, ^{222}Rn, and ^{218}Po. From ^{218}Po, there is a 99.98% branch to ^{214}Pb and a 0.02% branch to ^{218}At. ^{214}Pb decays to ^{214}Bi. From ^{214}Bi, there is a 99.96% branch to ^{214}Po and a 0.04% branch to ^{214}Tl. ^{214}Po decays to ^{210}Pb, which then decays to ^{210}Bi. From ^{210}Bi, there is a ~100% branch to ^{210}Po and a ~0.0001% branch to ^{206}Tl. ^{210}Po decays to ^{206}Pb.</p>	^{238}U	4.468×10^9 y	-	-
	^{234}Th	24.1 d	63/93	3.5 /4
	^{234}Pa	1.18 min	765/1001	0.30/0.60
	^{234}U	2.48×10^5 y	53	0.2
	^{230}Th	7.52×10^4 y	68/142	0.6/0.07
	^{226}Ra	1602 y	186	4
	^{222}Rn	3.825 d	510	0.07
	^{218}Po	3.05 min	-	-
	^{214}Pb	26.8 min	295 / 352	19/36
	^{218}At	2 s	-	-
	^{214}Bi	19,7 min	609/665/1120/ ~1240/ 1380/ 1764	47/2/17 /7 /8 /18
	^{214}Po	164 μs	799	0.014
	^{210}Tl	1.32 min	296/795/1310	80/100/21
	^{210}Pb	~22 y	47	4
	^{210}Bi	5.02 d	-	-
	^{210}Po	138.3 d	803	0.0011
	^{206}Tl	4.19 min	-	-
	^{206}Pb	σταθερό	-	-

Πίνακας Γ-3: Το σχήμα αποδιέγερσης του ^{232}Th [Minty 1997]

Σχήμα	Ισότοπο	Ημιζωή	Ενέργεια (keV)	Απόδοση εκπομπής ανά διάσπαση (%)
	^{232}Th	$1.39 \times 10^{10} \text{ y}$	-	-
^{232}Th ↓ ^{228}Ra	^{228}Ra	5.75 y	-	-
^{228}Ac ↓	^{228}Ac	6.13 h	340/ 908/0.960	15/25/20
^{228}Th ↓	^{228}Th	1.913 y	84/214	1.6/0.3
^{224}Ra ↓	^{224}Ra	3.64 d	241	3.7
^{220}Rn ↓	^{220}Rn	55.6 s	55	0.07
^{216}Po ↓	^{216}Po	0.145 s	-	-
^{212}Pb ↓	^{212}Pb	10.64 h	239/300	47/3.2
^{212}Bi ↓	^{212}Bi	60.5 min	40/727/1620	2/7/1.8
^{212}Po ↓	^{212}Po	304 ns	-	-
^{208}Tl ↓	^{208}Tl	3.1 min	275/511/583/ 860/2614	7.5/ 22/84/ 12.5/100
^{208}Pb	^{208}Pb	σταθερό	-	-



Παράρτημα Δ-ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Δεδομένα αποδόσεων ομοιωμάτων με πηγή 1.460 MeV για το ενεργειακό παράθυρο 1372 keV έως 1547 keV

Πίνακας Δ-1: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο1

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	4.34E-05	6.42E-05	1.03E-04	1.52E-04	2.46E-04	3.70E-04	4.96E-04	5.69E-04	6.83E-04	8.57E-04	1.04E-03	1.11E-03	1.03E-03	8.54E-04	6.28E-04
2	2.84E-05	3.45E-05	5.83E-05	8.33E-05	1.20E-04	2.00E-04	3.13E-04	3.77E-04	4.67E-04	5.64E-04	7.21E-04	9.38E-04	1.02E-03	9.87E-04	8.75E-04
3	6.03E-05	1.05E-04	1.72E-04	2.76E-04	4.19E-04	5.32E-04	7.08E-04	8.20E-04	9.74E-04	1.13E-03	1.14E-03	1.05E-03	8.13E-04	5.30E-04	3.00E-04
4	3.81E-05	4.74E-05	7.31E-05	1.17E-04	1.90E-04	2.62E-04	3.64E-04	4.30E-04	5.32E-04	6.21E-04	7.77E-04	9.04E-04	8.99E-04	7.84E-04	6.22E-04
5	4.73E-05	7.62E-05	1.18E-04	1.84E-04	2.50E-04	3.39E-04	4.62E-04	5.05E-04	5.79E-04	7.10E-04	7.80E-04	7.31E-04	6.08E-04	4.61E-04	3.04E-04
6	3.78E-05	6.15E-05	7.57E-05	1.20E-04	1.85E-04	2.98E-04	4.08E-04	4.81E-04	5.51E-04	6.94E-04	8.77E-04	9.87E-04	9.96E-04	8.87E-04	6.93E-04
7	4.88E-05	7.02E-05	1.04E-04	1.84E-04	2.65E-04	3.44E-04	4.25E-04	5.04E-04	5.57E-04	7.03E-04	7.70E-04	7.38E-04	6.33E-04	4.68E-04	3.04E-04
8	4.14E-06	1.56E-05	4.47E-05	9.67E-05	1.81E-04	3.33E-04	4.62E-04	5.49E-04	6.36E-04	7.97E-04	8.71E-04	9.61E-04	8.94E-04	7.13E-04	4.65E-04
9	7.09E-06	1.44E-05	2.25E-05	4.90E-05	8.46E-05	1.65E-04	2.82E-04	3.74E-04	4.49E-04	5.43E-04	6.42E-04	7.27E-04	7.90E-04	7.18E-04	5.65E-04
10	0.00E+0	2.40E-06	4.58E-05	1.36E-04	2.49E-04	3.55E-04	4.58E-04	5.82E-04	6.81E-04	7.80E-04	8.70E-04	8.10E-04	6.32E-04	4.11E-04	2.43E-04
11	2.95E-06	1.29E-05	2.90E-05	6.01E-05	1.11E-04	1.98E-04	2.62E-04	3.44E-04	3.79E-04	4.66E-04	5.60E-04	6.20E-04	6.32E-04	5.59E-04	4.09E-04
12	1.18E-06	1.14E-05	3.73E-05	9.89E-05	1.77E-04	2.67E-04	3.56E-04	4.24E-04	5.01E-04	6.26E-04	6.84E-04	6.66E-04	5.77E-04	3.93E-04	2.45E-04
13	5.91E-06	1.41E-05	3.24E-05	5.99E-05	1.21E-04	2.08E-04	3.02E-04	3.60E-04	4.28E-04	5.32E-04	6.20E-04	6.95E-04	6.78E-04	6.13E-04	4.53E-04
14	5.91E-07	1.17E-05	4.32E-05	1.02E-04	1.91E-04	2.83E-04	3.89E-04	4.71E-04	5.63E-04	6.97E-04	7.36E-04	7.17E-04	6.19E-04	4.54E-04	2.94E-04
15	1.13E-04	1.90E-04	3.07E-04	5.29E-04	9.45E-04	1.52E-03	2.12E-03	2.55E-03	2.94E-03	3.63E-03	4.34E-03	4.56E-03	4.21E-03	3.37E-03	2.31E-03
16	1.05E-04	1.99E-04	3.21E-04	5.72E-04	1.01E-03	1.59E-03	2.19E-03	2.56E-03	2.97E-03	3.73E-03	4.46E-03	4.72E-03	4.35E-03	3.52E-03	2.36E-03
Σύνολο	5.45E-04	9.31E-04	1.59E-03	2.82E-03	4.74E-03	7.27E-03	1.00E-02	1.19E-02	1.39E-02	1.71E-02	1.99E-02	2.09E-02	1.94E-02	1.57E-02	1.11E-02

Πίνακας Δ-2: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο2

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	4.65E-05	6.47E-05	9.81E-05	1.67E-04	2.54E-04	3.87E-04	5.06E-04	5.86E-04	6.91E-04	8.41E-04	1.00E-03	1.06E-03	9.73E-04	7.84E-04	5.52E-04
2	2.34E-05	3.57E-05	5.24E-05	8.88E-05	1.30E-04	2.12E-04	3.18E-04	3.99E-04	4.71E-04	5.83E-04	7.25E-04	9.00E-04	9.81E-04	9.26E-04	8.00E-04
3	6.24E-05	1.02E-04	1.85E-04	2.91E-04	4.43E-04	5.56E-04	7.11E-04	8.30E-04	9.56E-04	1.09E-03	1.08E-03	9.77E-04	7.39E-04	4.77E-04	2.70E-04
4	3.39E-05	4.55E-05	6.95E-05	1.23E-04	1.92E-04	2.71E-04	3.72E-04	4.48E-04	5.31E-04	6.36E-04	7.65E-04	8.68E-04	8.44E-04	7.24E-04	5.77E-04
5	4.37E-05	7.43E-05	1.20E-04	1.89E-04	2.57E-04	3.48E-04	4.52E-04	5.04E-04	5.94E-04	6.88E-04	7.46E-04	6.80E-04	5.73E-04	4.30E-04	2.82E-04
6	3.44E-05	5.67E-05	8.25E-05	1.23E-04	1.93E-04	2.92E-04	4.20E-04	5.04E-04	5.70E-04	7.13E-04	8.69E-04	9.61E-04	9.55E-04	8.34E-04	6.30E-04
7	5.07E-05	7.89E-05	1.16E-04	1.79E-04	2.75E-04	3.62E-04	4.48E-04	5.25E-04	5.97E-04	6.82E-04	7.35E-04	7.02E-04	6.03E-04	4.27E-04	2.74E-04
8	5.38E-06	1.71E-05	4.74E-05	1.04E-04	2.00E-04	3.41E-04	4.68E-04	5.48E-04	6.43E-04	7.92E-04	8.92E-04	9.23E-04	8.40E-04	6.73E-04	4.40E-04
9	6.55E-06	1.35E-05	2.29E-05	5.09E-05	9.75E-05	1.70E-04	3.05E-04	3.80E-04	4.45E-04	5.36E-04	6.55E-04	7.13E-04	7.75E-04	6.87E-04	5.28E-04
10	0.00E+0 0	6.40E-06	5.48E-05	1.44E-04	2.59E-04	3.53E-04	4.60E-04	5.86E-04	6.78E-04	7.96E-04	8.51E-04	7.99E-04	6.04E-04	3.87E-04	2.16E-04
11	4.68E-06	1.67E-05	3.20E-05	6.06E-05	1.17E-04	1.92E-04	2.83E-04	3.45E-04	4.01E-04	4.71E-04	5.61E-04	6.21E-04	6.12E-04	5.34E-04	3.75E-04
12	1.64E-06	1.46E-05	4.63E-05	9.78E-05	1.87E-04	2.80E-04	3.79E-04	4.38E-04	5.09E-04	6.26E-04	6.61E-04	6.35E-04	5.51E-04	3.75E-04	2.35E-04
13	7.25E-06	1.87E-05	3.55E-05	6.56E-05	1.32E-04	2.22E-04	3.17E-04	3.80E-04	4.39E-04	5.38E-04	6.28E-04	7.06E-04	6.61E-04	5.85E-04	4.19E-04
14	7.01E-07	1.67E-05	5.22E-05	1.14E-04	2.05E-04	3.12E-04	4.15E-04	4.93E-04	5.64E-04	6.90E-04	7.36E-04	7.02E-04	5.87E-04	4.30E-04	2.86E-04
15	1.09E-04	1.85E-04	3.15E-04	5.58E-04	9.85E-04	1.55E-03	2.13E-03	2.54E-03	2.97E-03	3.63E-03	4.29E-03	4.45E-03	4.03E-03	3.14E-03	2.09E-03
16	1.06E-04	1.87E-04	3.45E-04	6.05E-04	1.05E-03	1.62E-03	2.20E-03	2.59E-03	2.99E-03	3.74E-03	4.36E-03	4.57E-03	4.19E-03	3.25E-03	2.14E-03
Σύνολο	5.36E-04	9.34E-04	1.68E-03	2.96E-03	4.97E-03	7.48E-03	1.02E-02	1.21E-02	1.40E-02	1.71E-02	1.96E-02	2.03E-02	1.85E-02	1.47E-02	1.01E-02

Πίνακας Δ-3: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο3

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	4.90E-05	6.81E-05	1.03E-04	1.65E-04	2.69E-04	3.99E-04	5.20E-04	5.99E-04	7.03E-04	8.32E-04	9.77E-04	1.00E-03	9.29E-04	7.29E-04	5.12E-04
2	2.62E-05	3.51E-05	4.91E-05	8.86E-05	1.28E-04	2.18E-04	3.24E-04	4.24E-04	4.80E-04	5.96E-04	7.15E-04	8.82E-04	9.31E-04	8.75E-04	7.52E-04
3	6.39E-05	1.10E-04	1.85E-04	3.03E-04	4.54E-04	5.69E-04	7.31E-04	8.22E-04	9.34E-04	1.03E-03	1.02E-03	9.21E-04	6.89E-04	4.35E-04	2.48E-04
4	3.25E-05	4.35E-05	7.74E-05	1.17E-04	1.90E-04	2.76E-04	3.80E-04	4.44E-04	5.33E-04	6.33E-04	7.43E-04	8.44E-04	8.15E-04	7.09E-04	5.45E-04
5	4.35E-05	6.68E-05	1.28E-04	1.96E-04	2.61E-04	3.54E-04	4.58E-04	5.04E-04	5.69E-04	6.52E-04	7.27E-04	6.63E-04	5.56E-04	4.10E-04	2.65E-04
6	3.59E-05	5.88E-05	8.50E-05	1.32E-04	1.90E-04	3.09E-04	4.18E-04	5.12E-04	5.70E-04	6.99E-04	8.32E-04	9.16E-04	9.32E-04	7.96E-04	6.06E-04
7	5.93E-05	7.62E-05	1.21E-04	1.86E-04	2.80E-04	3.70E-04	4.53E-04	5.23E-04	5.86E-04	6.59E-04	6.99E-04	6.81E-04	5.86E-04	4.00E-04	2.50E-04
8	4.56E-06	1.80E-05	5.17E-05	1.10E-04	2.09E-04	3.47E-04	4.69E-04	5.46E-04	6.41E-04	7.76E-04	8.51E-04	8.92E-04	8.10E-04	6.37E-04	4.11E-04
9	7.60E-06	1.09E-05	2.45E-05	5.55E-05	9.38E-05	1.82E-04	3.00E-04	3.85E-04	4.48E-04	5.37E-04	6.42E-04	6.98E-04	7.52E-04	6.62E-04	5.11E-04
10	0.00E+0 0	5.60E-06	5.46E-05	1.45E-04	2.68E-04	3.63E-04	4.67E-04	5.70E-04	6.50E-04	7.79E-04	8.40E-04	7.56E-04	5.75E-04	3.64E-04	2.12E-04
11	5.78E-06	1.59E-05	2.95E-05	6.49E-05	1.16E-04	1.96E-04	2.94E-04	3.51E-04	4.02E-04	4.74E-04	5.70E-04	6.13E-04	6.05E-04	5.21E-04	3.66E-04
12	9.12E-07	1.65E-05	4.70E-05	1.05E-04	1.93E-04	2.82E-04	3.79E-04	4.35E-04	5.11E-04	6.19E-04	6.56E-04	6.27E-04	5.32E-04	3.63E-04	2.28E-04
13	6.99E-06	1.77E-05	3.57E-05	6.54E-05	1.28E-04	2.19E-04	3.22E-04	3.79E-04	4.35E-04	5.45E-04	6.15E-04	6.84E-04	6.37E-04	5.61E-04	4.04E-04
14	6.08E-07	1.68E-05	5.61E-05	1.14E-04	2.04E-04	3.13E-04	4.01E-04	4.87E-04	5.65E-04	6.78E-04	7.21E-04	6.70E-04	5.72E-04	4.12E-04	2.65E-04
15	1.10E-04	1.91E-04	3.23E-04	5.77E-04	1.02E-03	1.56E-03	2.14E-03	2.53E-03	2.93E-03	3.61E-03	4.26E-03	4.34E-03	3.94E-03	3.01E-03	1.98E-03
16	1.03E-04	1.89E-04	3.34E-04	5.97E-04	1.05E-03	1.66E-03	2.22E-03	2.63E-03	3.03E-03	3.70E-03	4.27E-03	4.51E-03	4.07E-03	3.10E-03	1.98E-03
Σύνολο	5.49E-04	9.40E-04	1.71E-03	3.02E-03	5.05E-03	7.62E-03	1.03E-02	1.21E-02	1.40E-02	1.68E-02	1.91E-02	1.97E-02	1.79E-02	1.40E-02	9.54E-03

Πίνακας Δ-4: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο4

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	7.40E-05	1.09E-04	2.00E-04	2.92E-04	4.14E-04	5.23E-04	6.30E-04	7.13E-04	7.34E-04	8.58E-04	8.58E-04	8.29E-04	7.63E-04	6.00E-04	3.99E-04
2	3.96E-05	6.26E-05	9.02E-05	1.54E-04	2.37E-04	3.54E-04	4.66E-04	5.12E-04	5.87E-04	6.74E-04	7.41E-04	8.04E-04	8.05E-04	7.40E-04	6.05E-04
3	1.21E-04	2.34E-04	3.35E-04	4.71E-04	5.72E-04	6.89E-04	7.62E-04	8.37E-04	8.83E-04	9.19E-04	8.80E-04	7.39E-04	5.65E-04	3.42E-04	1.90E-04
4	5.36E-05	8.68E-05	1.37E-04	2.17E-04	3.04E-04	3.90E-04	4.68E-04	5.42E-04	5.87E-04	6.65E-04	7.14E-04	7.26E-04	6.68E-04	5.78E-04	4.39E-04
5	9.00E-05	1.41E-04	2.02E-04	2.87E-04	3.52E-04	4.31E-04	5.04E-04	5.44E-04	5.87E-04	6.18E-04	6.08E-04	5.34E-04	4.51E-04	3.22E-04	2.00E-04
6	6.06E-05	9.79E-05	1.47E-04	2.43E-04	3.40E-04	4.39E-04	5.42E-04	5.98E-04	6.49E-04	7.31E-04	7.84E-04	8.21E-04	7.56E-04	6.65E-04	5.02E-04
7	8.38E-05	1.30E-04	2.04E-04	2.93E-04	3.69E-04	4.39E-04	5.02E-04	5.56E-04	5.83E-04	6.07E-04	6.16E-04	5.60E-04	4.55E-04	3.20E-04	1.96E-04
8	3.50E-05	7.59E-05	1.45E-04	2.50E-04	3.66E-04	4.53E-04	5.52E-04	5.92E-04	6.54E-04	7.30E-04	7.66E-04	7.45E-04	6.59E-04	5.10E-04	3.27E-04
9	1.49E-05	3.48E-05	7.01E-05	1.21E-04	2.23E-04	3.35E-04	4.03E-04	4.54E-04	4.88E-04	5.40E-04	5.93E-04	6.10E-04	6.12E-04	5.15E-04	3.89E-04
10	2.56E-05	1.01E-04	2.03E-04	2.89E-04	3.66E-04	4.44E-04	5.23E-04	5.93E-04	6.36E-04	7.11E-04	6.89E-04	6.19E-04	4.57E-04	2.89E-04	1.65E-04
11	2.06E-05	4.38E-05	8.49E-05	1.34E-04	2.20E-04	2.93E-04	3.65E-04	3.88E-04	4.39E-04	4.73E-04	5.10E-04	5.28E-04	4.95E-04	4.06E-04	2.91E-04
12	3.06E-05	7.76E-05	1.38E-04	2.18E-04	2.84E-04	3.53E-04	4.27E-04	4.76E-04	5.19E-04	5.67E-04	5.58E-04	5.13E-04	4.27E-04	2.91E-04	1.79E-04
13	2.43E-05	5.07E-05	8.74E-05	1.55E-04	2.33E-04	3.33E-04	3.98E-04	4.44E-04	4.85E-04	5.41E-04	5.88E-04	5.87E-04	5.26E-04	4.42E-04	3.21E-04
14	3.55E-05	8.12E-05	1.57E-04	2.28E-04	3.14E-04	3.94E-04	4.73E-04	5.19E-04	5.78E-04	6.37E-04	6.04E-04	5.53E-04	4.56E-04	3.36E-04	2.07E-04
15	2.18E-04	3.94E-04	7.07E-04	1.16E-03	1.65E-03	2.08E-03	2.48E-03	2.71E-03	3.01E-03	3.44E-03	3.66E-03	3.54E-03	3.09E-03	2.33E-03	1.56E-03
16	2.21E-04	3.91E-04	7.37E-04	1.24E-03	1.69E-03	2.12E-03	2.55E-03	2.83E-03	3.10E-03	3.54E-03	3.79E-03	3.67E-03	3.21E-03	2.43E-03	1.56E-03
Σύνολο	1.15E-03	2.11E-03	3.64E-03	5.75E-03	7.93E-03	1.01E-02	1.20E-02	1.33E-02	1.45E-02	1.63E-02	1.70E-02	1.64E-02	1.44E-02	1.11E-02	7.52E-03

Πίνακας Δ-5: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο5

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	7.08E-05	1.13E-04	2.07E-04	2.98E-04	4.20E-04	5.28E-04	6.09E-04	6.76E-04	7.18E-04	8.09E-04	8.22E-04	8.01E-04	7.08E-04	5.69E-04	3.66E-04
2	3.76E-05	6.04E-05	9.25E-05	1.59E-04	2.41E-04	3.60E-04	4.57E-04	5.29E-04	5.71E-04	6.52E-04	7.13E-04	7.55E-04	7.73E-04	6.97E-04	5.75E-04
3	1.27E-04	2.53E-04	3.59E-04	4.61E-04	5.87E-04	6.71E-04	7.47E-04	8.01E-04	8.38E-04	8.72E-04	8.29E-04	6.91E-04	5.27E-04	3.15E-04	1.81E-04
4	6.39E-05	9.09E-05	1.39E-04	2.26E-04	3.19E-04	4.01E-04	4.68E-04	5.31E-04	5.62E-04	6.48E-04	6.81E-04	7.04E-04	6.45E-04	5.44E-04	4.18E-04
5	8.80E-05	1.52E-04	2.10E-04	3.06E-04	3.53E-04	4.33E-04	4.87E-04	5.24E-04	5.69E-04	5.85E-04	5.88E-04	5.09E-04	4.22E-04	3.04E-04	1.84E-04
6	6.01E-05	1.02E-04	1.58E-04	2.41E-04	3.43E-04	4.53E-04	5.52E-04	5.88E-04	6.35E-04	7.04E-04	7.76E-04	7.75E-04	7.19E-04	6.23E-04	4.75E-04
7	8.51E-05	1.39E-04	2.13E-04	3.07E-04	3.78E-04	4.37E-04	4.94E-04	5.33E-04	5.59E-04	5.97E-04	5.90E-04	5.19E-04	4.30E-04	2.98E-04	1.83E-04
8	3.74E-05	7.38E-05	1.51E-04	2.44E-04	3.52E-04	4.56E-04	5.25E-04	5.71E-04	6.15E-04	6.95E-04	7.45E-04	7.10E-04	6.26E-04	4.88E-04	3.14E-04
9	1.78E-05	3.48E-05	7.29E-05	1.30E-04	2.22E-04	3.31E-04	3.94E-04	4.48E-04	4.56E-04	5.16E-04	5.70E-04	5.99E-04	5.88E-04	4.86E-04	3.77E-04
10	2.69E-05	1.12E-04	2.08E-04	2.85E-04	3.68E-04	4.21E-04	4.92E-04	5.54E-04	6.18E-04	6.89E-04	6.62E-04	5.95E-04	4.30E-04	2.76E-04	1.56E-04
11	2.36E-05	4.66E-05	7.59E-05	1.35E-04	2.16E-04	2.96E-04	3.67E-04	3.75E-04	4.33E-04	4.61E-04	4.91E-04	5.03E-04	4.78E-04	3.92E-04	2.75E-04
12	3.16E-05	7.95E-05	1.34E-04	2.22E-04	2.90E-04	3.49E-04	4.20E-04	4.54E-04	4.98E-04	5.45E-04	5.40E-04	5.02E-04	4.08E-04	2.79E-04	1.72E-04
13	2.85E-05	5.11E-05	9.19E-05	1.58E-04	2.37E-04	3.26E-04	3.93E-04	4.32E-04	4.68E-04	5.19E-04	5.60E-04	5.58E-04	5.11E-04	4.20E-04	3.01E-04
14	3.56E-05	8.65E-05	1.67E-04	2.36E-04	3.10E-04	3.92E-04	4.59E-04	4.89E-04	5.56E-04	6.06E-04	5.73E-04	5.34E-04	4.37E-04	3.13E-04	1.87E-04
15	2.24E-04	4.01E-04	7.36E-04	1.21E-03	1.66E-03	2.06E-03	2.43E-03	2.66E-03	2.91E-03	3.36E-03	3.59E-03	3.44E-03	3.01E-03	2.21E-03	1.43E-03
16	2.23E-04	4.08E-04	7.74E-04	1.27E-03	1.73E-03	2.13E-03	2.51E-03	2.72E-03	3.01E-03	3.46E-03	3.69E-03	3.58E-03	3.10E-03	2.32E-03	1.45E-03
Σύνολο	1.18E-03	2.20E-03	3.79E-03	5.89E-03	8.03E-03	1.00E-02	1.18E-02	1.29E-02	1.40E-02	1.57E-02	1.64E-02	1.58E-02	1.38E-02	1.05E-02	7.05E-03

Πίνακας Δ-6: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο6

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	7.91E-05	1.15E-04	2.09E-04	3.20E-04	4.21E-04	5.43E-04	6.32E-04	7.00E-04	7.07E-04	7.73E-04	7.84E-04	7.41E-04	6.53E-04	5.20E-04	3.27E-04
2	3.70E-05	5.98E-05	9.57E-05	1.64E-04	2.63E-04	3.78E-04	4.68E-04	5.40E-04	5.89E-04	6.61E-04	6.91E-04	7.16E-04	7.09E-04	6.30E-04	5.09E-04
3	1.39E-04	2.62E-04	3.68E-04	4.75E-04	6.10E-04	7.00E-04	7.35E-04	7.79E-04	8.01E-04	8.21E-04	7.53E-04	6.20E-04	4.69E-04	2.81E-04	1.67E-04
4	5.91E-05	9.02E-05	1.41E-04	2.33E-04	3.26E-04	4.19E-04	4.79E-04	5.57E-04	5.79E-04	6.41E-04	6.55E-04	6.66E-04	6.14E-04	4.91E-04	3.81E-04
5	8.79E-05	1.50E-04	2.23E-04	2.96E-04	3.69E-04	4.42E-04	4.99E-04	5.23E-04	5.51E-04	5.52E-04	5.51E-04	4.80E-04	3.97E-04	2.73E-04	1.69E-04
6	6.24E-05	9.29E-05	1.56E-04	2.56E-04	3.65E-04	4.82E-04	5.72E-04	5.87E-04	6.35E-04	6.93E-04	7.34E-04	7.46E-04	6.76E-04	5.84E-04	4.35E-04
7	8.51E-05	1.54E-04	2.19E-04	3.20E-04	4.00E-04	4.60E-04	4.89E-04	5.35E-04	5.38E-04	5.64E-04	5.54E-04	4.81E-04	4.05E-04	2.76E-04	1.71E-04
8	4.08E-05	7.84E-05	1.65E-04	2.47E-04	3.54E-04	4.51E-04	5.16E-04	5.66E-04	6.04E-04	6.86E-04	7.08E-04	6.79E-04	5.93E-04	4.46E-04	2.98E-04
9	1.87E-05	4.16E-05	7.39E-05	1.41E-04	2.21E-04	3.32E-04	4.00E-04	4.30E-04	4.50E-04	5.00E-04	5.48E-04	5.67E-04	5.49E-04	4.62E-04	3.52E-04
10	3.28E-05	1.13E-04	2.06E-04	2.80E-04	3.61E-04	4.11E-04	4.85E-04	5.45E-04	6.07E-04	6.52E-04	6.29E-04	5.57E-04	4.01E-04	2.57E-04	1.48E-04
11	2.73E-05	4.58E-05	7.55E-05	1.33E-04	2.21E-04	2.93E-04	3.54E-04	3.80E-04	4.27E-04	4.49E-04	4.72E-04	4.89E-04	4.58E-04	3.71E-04	2.62E-04
12	3.15E-05	8.11E-05	1.38E-04	2.27E-04	2.78E-04	3.53E-04	4.28E-04	4.49E-04	4.89E-04	5.37E-04	5.17E-04	4.74E-04	3.73E-04	2.64E-04	1.59E-04
13	3.09E-05	4.88E-05	9.55E-05	1.61E-04	2.43E-04	3.26E-04	3.76E-04	4.23E-04	4.50E-04	4.97E-04	5.51E-04	5.38E-04	4.86E-04	4.00E-04	2.84E-04
14	3.75E-05	8.83E-05	1.70E-04	2.40E-04	3.01E-04	3.82E-04	4.43E-04	4.80E-04	5.47E-04	5.99E-04	5.62E-04	5.16E-04	4.10E-04	2.91E-04	1.83E-04
15	2.27E-04	4.08E-04	7.44E-04	1.23E-03	1.67E-03	2.06E-03	2.39E-03	2.61E-03	2.87E-03	3.32E-03	3.52E-03	3.35E-03	2.92E-03	2.05E-03	1.30E-03
16	2.19E-04	4.23E-04	7.80E-04	1.29E-03	1.76E-03	2.12E-03	2.45E-03	2.66E-03	2.95E-03	3.42E-03	3.57E-03	3.49E-03	3.02E-03	2.16E-03	1.31E-03
Σύνολο	1.21E-03	2.25E-03	3.86E-03	6.01E-03	8.16E-03	1.02E-02	1.17E-02	1.28E-02	1.38E-02	1.54E-02	1.58E-02	1.51E-02	1.31E-02	9.76E-03	6.45E-03

Πίνακας Δ-7: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο7

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	7.70E-05	1.15E-04	2.03E-04	3.13E-04	4.21E-04	5.50E-04	6.30E-04	6.81E-04	6.88E-04	7.50E-04	7.35E-04	6.94E-04	5.94E-04	4.73E-04	3.09E-04
2	3.90E-05	6.14E-05	9.32E-05	1.62E-04	2.57E-04	3.74E-04	4.71E-04	5.45E-04	5.89E-04	6.42E-04	6.66E-04	6.87E-04	6.69E-04	5.82E-04	4.64E-04
3	1.30E-04	2.52E-04	3.64E-04	4.72E-04	6.10E-04	6.89E-04	7.14E-04	7.53E-04	7.77E-04	7.70E-04	7.02E-04	5.70E-04	4.34E-04	2.60E-04	1.52E-04
4	5.47E-05	8.33E-05	1.36E-04	2.19E-04	3.31E-04	4.04E-04	4.91E-04	5.55E-04	5.82E-04	6.25E-04	6.27E-04	6.41E-04	5.74E-04	4.69E-04	3.55E-04
5	8.24E-05	1.42E-04	2.21E-04	3.01E-04	3.65E-04	4.49E-04	4.93E-04	5.10E-04	5.26E-04	5.29E-04	5.30E-04	4.61E-04	3.76E-04	2.56E-04	1.62E-04
6	6.33E-05	9.35E-05	1.57E-04	2.51E-04	3.53E-04	4.68E-04	5.74E-04	5.90E-04	6.34E-04	6.83E-04	7.05E-04	7.00E-04	6.38E-04	5.42E-04	4.11E-04
7	8.42E-05	1.51E-04	2.15E-04	3.09E-04	3.97E-04	4.52E-04	4.88E-04	5.10E-04	5.28E-04	5.48E-04	5.13E-04	4.64E-04	3.77E-04	2.56E-04	1.58E-04
8	4.27E-05	7.58E-05	1.60E-04	2.40E-04	3.49E-04	4.33E-04	4.90E-04	5.46E-04	5.81E-04	6.55E-04	6.71E-04	6.34E-04	5.60E-04	4.18E-04	2.79E-04
9	1.98E-05	4.27E-05	6.73E-05	1.37E-04	2.15E-04	3.17E-04	3.81E-04	4.21E-04	4.30E-04	4.89E-04	5.22E-04	5.36E-04	5.15E-04	4.33E-04	3.26E-04
10	3.23E-05	1.11E-04	1.94E-04	2.71E-04	3.47E-04	3.94E-04	4.67E-04	5.22E-04	5.77E-04	6.23E-04	5.92E-04	5.28E-04	3.72E-04	2.40E-04	1.42E-04
11	2.84E-05	4.73E-05	7.68E-05	1.26E-04	2.16E-04	2.90E-04	3.51E-04	3.76E-04	4.10E-04	4.41E-04	4.55E-04	4.67E-04	4.33E-04	3.51E-04	2.50E-04
12	3.38E-05	8.18E-05	1.35E-04	2.24E-04	2.75E-04	3.49E-04	4.09E-04	4.41E-04	4.77E-04	5.17E-04	5.07E-04	4.58E-04	3.56E-04	2.47E-04	1.53E-04
13	2.97E-05	5.02E-05	9.36E-05	1.53E-04	2.37E-04	3.14E-04	3.69E-04	4.13E-04	4.38E-04	4.85E-04	5.41E-04	5.13E-04	4.74E-04	3.83E-04	2.63E-04
14	4.03E-05	8.56E-05	1.61E-04	2.36E-04	2.96E-04	3.72E-04	4.32E-04	4.69E-04	5.35E-04	5.85E-04	5.35E-04	4.94E-04	3.84E-04	2.73E-04	1.77E-04
15	2.25E-04	4.03E-04	7.31E-04	1.23E-03	1.69E-03	2.05E-03	2.37E-03	2.56E-03	2.86E-03	3.32E-03	3.51E-03	3.36E-03	2.91E-03	1.96E-03	1.21E-03
16	2.14E-04	4.14E-04	7.65E-04	1.27E-03	1.74E-03	2.11E-03	2.45E-03	2.62E-03	2.95E-03	3.46E-03	3.61E-03	3.49E-03	3.01E-03	2.07E-03	1.24E-03
Σύνολο	1.20E-03	2.21E-03	3.77E-03	5.91E-03	8.10E-03	1.00E-02	1.16E-02	1.25E-02	1.36E-02	1.51E-02	1.54E-02	1.47E-02	1.27E-02	9.22E-03	6.05E-03

Πίνακας Δ-8: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο8

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	7.36E-05	1.14E-04	1.89E-04	3.06E-04	4.02E-04	5.32E-04	5.95E-04	6.41E-04	6.55E-04	6.90E-04	6.76E-04	6.28E-04	5.40E-04	4.25E-04	2.85E-04
2	3.54E-05	5.42E-05	8.66E-05	1.54E-04	2.45E-04	3.56E-04	4.49E-04	5.22E-04	5.51E-04	6.04E-04	6.16E-04	6.23E-04	6.05E-04	5.40E-04	4.18E-04
3	1.29E-04	2.35E-04	3.56E-04	4.47E-04	5.80E-04	6.53E-04	6.80E-04	7.02E-04	7.12E-04	6.98E-04	6.39E-04	5.08E-04	3.99E-04	2.40E-04	1.39E-04
4	5.23E-05	8.04E-05	1.29E-04	2.04E-04	3.21E-04	3.80E-04	4.73E-04	5.32E-04	5.65E-04	5.98E-04	6.00E-04	6.15E-04	5.45E-04	4.42E-04	3.32E-04
5	8.19E-05	1.32E-04	2.06E-04	2.86E-04	3.55E-04	4.33E-04	4.78E-04	4.89E-04	5.09E-04	5.06E-04	5.04E-04	4.32E-04	3.50E-04	2.36E-04	1.47E-04
6	6.01E-05	8.76E-05	1.46E-04	2.40E-04	3.31E-04	4.57E-04	5.47E-04	5.71E-04	5.98E-04	6.49E-04	6.63E-04	6.58E-04	5.81E-04	5.01E-04	3.74E-04
7	8.05E-05	1.45E-04	2.08E-04	2.94E-04	3.82E-04	4.25E-04	4.64E-04	4.88E-04	5.12E-04	5.23E-04	4.86E-04	4.28E-04	3.54E-04	2.41E-04	1.46E-04
8	3.76E-05	7.34E-05	1.47E-04	2.19E-04	3.34E-04	4.15E-04	4.79E-04	5.32E-04	5.74E-04	6.39E-04	6.69E-04	6.24E-04	5.48E-04	4.16E-04	2.66E-04
9	1.76E-05	3.77E-05	6.37E-05	1.27E-04	2.05E-04	3.04E-04	3.62E-04	4.06E-04	4.20E-04	4.86E-04	5.18E-04	5.33E-04	5.17E-04	4.27E-04	3.13E-04
10	2.98E-05	1.04E-04	1.84E-04	2.58E-04	3.34E-04	3.85E-04	4.55E-04	5.01E-04	5.69E-04	6.15E-04	5.95E-04	5.08E-04	3.72E-04	2.33E-04	1.37E-04
11	2.51E-05	4.35E-05	7.02E-05	1.26E-04	2.07E-04	2.76E-04	3.38E-04	3.70E-04	4.03E-04	4.32E-04	4.59E-04	4.64E-04	4.33E-04	3.47E-04	2.37E-04
12	3.13E-05	7.46E-05	1.32E-04	2.06E-04	2.63E-04	3.30E-04	3.92E-04	4.29E-04	4.73E-04	5.11E-04	5.07E-04	4.54E-04	3.56E-04	2.47E-04	1.46E-04
13	2.92E-05	5.42E-05	8.41E-05	1.47E-04	2.30E-04	2.97E-04	3.60E-04	3.98E-04	4.30E-04	4.86E-04	5.38E-04	5.17E-04	4.75E-04	3.83E-04	2.63E-04
14	3.92E-05	8.00E-05	1.50E-04	2.22E-04	2.83E-04	3.66E-04	4.27E-04	4.68E-04	5.24E-04	5.84E-04	5.48E-04	4.89E-04	3.80E-04	2.72E-04	1.68E-04
15	2.15E-04	3.84E-04	6.89E-04	1.18E-03	1.62E-03	1.98E-03	2.28E-03	2.52E-03	2.87E-03	3.45E-03	3.67E-03	3.52E-03	3.05E-03	1.96E-03	1.14E-03
16	2.12E-04	3.91E-04	7.30E-04	1.21E-03	1.68E-03	2.04E-03	2.38E-03	2.56E-03	2.96E-03	3.61E-03	3.78E-03	3.65E-03	3.15E-03	2.03E-03	1.15E-03
Σύνολο	1.15E-03	2.09E-03	3.57E-03	5.62E-03	7.77E-03	9.63E-03	1.12E-02	1.21E-02	1.33E-02	1.51E-02	1.55E-02	1.47E-02	1.27E-02	8.94E-03	5.66E-03

Πίνακας Δ-9: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο9

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	9.09E-05	1.64E-04	2.46E-04	3.49E-04	4.79E-04	5.72E-04	6.58E-04	6.96E-04	7.52E-04	8.27E-04	8.41E-04	7.91E-04	7.01E-04	5.40E-04	3.51E-04
2	4.23E-05	7.06E-05	1.19E-04	1.99E-04	2.88E-04	3.95E-04	5.07E-04	5.61E-04	6.22E-04	6.73E-04	7.57E-04	7.74E-04	7.49E-04	6.94E-04	5.46E-04
3	1.82E-04	2.88E-04	3.81E-04	5.14E-04	6.12E-04	7.00E-04	7.91E-04	8.58E-04	8.69E-04	8.63E-04	8.14E-04	6.69E-04	4.99E-04	3.05E-04	1.79E-04
4	7.60E-05	1.01E-04	1.71E-04	2.51E-04	3.42E-04	4.34E-04	5.17E-04	5.71E-04	6.08E-04	6.71E-04	6.72E-04	7.08E-04	6.24E-04	5.20E-04	3.98E-04
5	1.10E-04	1.77E-04	2.47E-04	3.17E-04	3.85E-04	4.62E-04	5.18E-04	5.51E-04	5.78E-04	5.89E-04	5.68E-04	4.89E-04	4.27E-04	2.94E-04	1.75E-04
6	7.80E-05	1.22E-04	1.84E-04	2.75E-04	3.99E-04	4.93E-04	5.70E-04	6.25E-04	6.82E-04	7.36E-04	7.89E-04	7.77E-04	7.14E-04	6.03E-04	4.56E-04
7	1.09E-04	1.70E-04	2.44E-04	3.36E-04	4.04E-04	4.60E-04	5.15E-04	5.42E-04	5.78E-04	5.94E-04	5.65E-04	5.22E-04	4.18E-04	2.94E-04	1.77E-04
8	5.24E-05	1.03E-04	1.92E-04	2.87E-04	3.88E-04	4.97E-04	5.50E-04	6.30E-04	6.41E-04	7.03E-04	7.34E-04	6.86E-04	6.06E-04	4.42E-04	2.85E-04
9	2.43E-05	4.96E-05	9.44E-05	1.72E-04	2.65E-04	3.49E-04	4.07E-04	4.63E-04	4.73E-04	5.42E-04	5.91E-04	5.73E-04	5.39E-04	4.65E-04	3.49E-04
10	6.48E-05	1.34E-04	2.31E-04	3.10E-04	3.90E-04	4.54E-04	5.22E-04	5.89E-04	6.17E-04	6.67E-04	6.43E-04	5.58E-04	3.97E-04	2.59E-04	1.47E-04
11	3.02E-05	5.61E-05	1.07E-04	1.70E-04	2.43E-04	3.14E-04	3.72E-04	4.04E-04	4.49E-04	4.92E-04	5.09E-04	4.77E-04	4.56E-04	3.65E-04	2.58E-04
12	4.56E-05	1.03E-04	1.68E-04	2.39E-04	3.10E-04	3.79E-04	4.42E-04	4.81E-04	5.13E-04	5.47E-04	5.16E-04	4.73E-04	3.76E-04	2.57E-04	1.57E-04
13	3.35E-05	7.18E-05	1.12E-04	1.98E-04	2.68E-04	3.31E-04	4.19E-04	4.53E-04	4.76E-04	5.46E-04	5.66E-04	5.36E-04	5.00E-04	3.98E-04	2.83E-04
14	5.85E-05	1.11E-04	1.89E-04	2.64E-04	3.43E-04	4.17E-04	4.74E-04	5.33E-04	5.75E-04	5.95E-04	5.72E-04	5.28E-04	4.18E-04	2.87E-04	1.82E-04
15	2.96E-04	5.43E-04	9.24E-04	1.37E-03	1.77E-03	2.16E-03	2.54E-03	2.83E-03	3.02E-03	3.34E-03	3.38E-03	3.21E-03	2.79E-03	2.01E-03	1.27E-03
16	3.07E-04	5.54E-04	9.49E-04	1.41E-03	1.86E-03	2.27E-03	2.64E-03	2.89E-03	3.16E-03	3.41E-03	3.50E-03	3.34E-03	2.90E-03	2.11E-03	1.29E-03
Σύνολο	1.60E-03	2.82E-03	4.56E-03	6.66E-03	8.74E-03	1.07E-02	1.24E-02	1.37E-02	1.46E-02	1.58E-02	1.60E-02	1.51E-02	1.31E-02	9.83E-03	6.50E-03

Πίνακας Δ-10: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο10

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	8.79E-05	1.52E-04	2.30E-04	3.28E-04	4.43E-04	5.13E-04	6.33E-04	6.77E-04	7.33E-04	7.98E-04	7.99E-04	7.61E-04	6.61E-04	5.09E-04	3.36E-04
2	4.75E-05	6.74E-05	1.15E-04	1.83E-04	2.72E-04	3.65E-04	4.73E-04	5.08E-04	5.91E-04	6.53E-04	7.45E-04	7.40E-04	7.36E-04	6.57E-04	5.08E-04
3	1.67E-04	2.82E-04	3.63E-04	4.86E-04	5.76E-04	6.85E-04	7.62E-04	8.37E-04	8.34E-04	8.22E-04	7.78E-04	6.29E-04	4.77E-04	2.93E-04	1.72E-04
4	7.49E-05	9.99E-05	1.58E-04	2.50E-04	3.29E-04	4.17E-04	4.90E-04	5.39E-04	5.74E-04	6.74E-04	6.64E-04	6.93E-04	6.26E-04	5.15E-04	3.78E-04
5	1.13E-04	1.61E-04	2.42E-04	3.03E-04	3.70E-04	4.36E-04	4.91E-04	5.44E-04	5.81E-04	5.89E-04	5.64E-04	4.76E-04	4.09E-04	2.65E-04	1.70E-04
6	7.09E-05	1.18E-04	1.74E-04	2.62E-04	3.69E-04	4.65E-04	5.46E-04	5.98E-04	6.57E-04	7.13E-04	7.74E-04	7.68E-04	6.81E-04	5.79E-04	4.31E-04
7	1.05E-04	1.71E-04	2.33E-04	3.05E-04	3.79E-04	4.31E-04	5.15E-04	5.40E-04	5.61E-04	5.91E-04	5.54E-04	5.09E-04	3.89E-04	2.81E-04	1.67E-04
8	4.60E-05	1.04E-04	1.72E-04	2.67E-04	3.72E-04	4.54E-04	5.31E-04	6.04E-04	6.32E-04	6.99E-04	7.08E-04	6.75E-04	5.99E-04	4.20E-04	2.64E-04
9	2.29E-05	4.82E-05	8.71E-05	1.70E-04	2.40E-04	3.27E-04	3.77E-04	4.31E-04	4.59E-04	5.22E-04	5.78E-04	5.66E-04	5.29E-04	4.48E-04	3.30E-04
10	6.50E-05	1.25E-04	2.09E-04	2.89E-04	3.56E-04	4.29E-04	5.14E-04	5.75E-04	5.91E-04	6.51E-04	6.29E-04	5.46E-04	3.75E-04	2.46E-04	1.40E-04
11	2.81E-05	5.37E-05	9.44E-05	1.58E-04	2.29E-04	2.99E-04	3.53E-04	3.91E-04	4.39E-04	4.84E-04	5.05E-04	4.84E-04	4.56E-04	3.77E-04	2.63E-04
12	4.58E-05	8.79E-05	1.62E-04	2.25E-04	2.94E-04	3.67E-04	4.28E-04	4.62E-04	5.01E-04	5.39E-04	5.21E-04	4.79E-04	3.74E-04	2.66E-04	1.63E-04
13	3.55E-05	6.54E-05	1.04E-04	1.84E-04	2.60E-04	3.08E-04	3.80E-04	4.31E-04	4.72E-04	5.47E-04	5.62E-04	5.40E-04	4.87E-04	3.85E-04	2.73E-04
14	4.75E-05	1.02E-04	1.80E-04	2.44E-04	3.21E-04	3.96E-04	4.66E-04	5.15E-04	5.62E-04	5.94E-04	5.70E-04	5.12E-04	4.15E-04	2.69E-04	1.76E-04
15	2.69E-04	5.02E-04	8.91E-04	1.32E-03	1.69E-03	2.02E-03	2.43E-03	2.81E-03	3.13E-03	3.44E-03	3.51E-03	3.36E-03	2.86E-03	1.96E-03	1.20E-03
16	2.67E-04	5.30E-04	9.02E-04	1.35E-03	1.76E-03	2.13E-03	2.49E-03	2.84E-03	3.24E-03	3.55E-03	3.59E-03	3.47E-03	2.98E-03	2.06E-03	1.21E-03
Σύνολο	1.49E-03	2.67E-03	4.32E-03	6.32E-03	8.27E-03	1.00E-02	1.19E-02	1.33E-02	1.46E-02	1.59E-02	1.60E-02	1.52E-02	1.31E-02	9.53E-03	6.19E-03

Πίνακας Δ-11: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο11

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	9.15E-05	1.56E-04	2.41E-04	3.35E-04	4.50E-04	5.36E-04	6.27E-04	6.75E-04	7.12E-04	7.82E-04	7.60E-04	7.23E-04	6.14E-04	4.81E-04	3.22E-04
2	4.34E-05	6.69E-05	1.20E-04	1.88E-04	2.82E-04	3.76E-04	4.90E-04	5.34E-04	5.87E-04	6.40E-04	7.29E-04	7.15E-04	6.94E-04	6.14E-04	4.83E-04
3	1.70E-04	2.89E-04	3.62E-04	4.91E-04	5.95E-04	6.77E-04	7.47E-04	8.11E-04	8.02E-04	7.87E-04	7.30E-04	5.98E-04	4.35E-04	2.71E-04	1.62E-04
4	7.34E-05	1.03E-04	1.58E-04	2.46E-04	3.32E-04	4.19E-04	5.06E-04	5.65E-04	5.82E-04	6.53E-04	6.46E-04	6.62E-04	5.84E-04	4.78E-04	3.60E-04
5	1.06E-04	1.60E-04	2.50E-04	3.08E-04	3.82E-04	4.58E-04	4.94E-04	5.23E-04	5.62E-04	5.68E-04	5.43E-04	4.54E-04	3.83E-04	2.53E-04	1.62E-04
6	7.20E-05	1.10E-04	1.83E-04	2.76E-04	3.77E-04	4.79E-04	5.67E-04	6.17E-04	6.55E-04	6.96E-04	7.56E-04	7.32E-04	6.42E-04	5.50E-04	4.13E-04
7	1.14E-04	1.72E-04	2.33E-04	3.16E-04	4.00E-04	4.55E-04	5.06E-04	5.45E-04	5.29E-04	5.62E-04	5.23E-04	4.79E-04	3.79E-04	2.63E-04	1.52E-04
8	4.90E-05	1.06E-04	1.70E-04	2.77E-04	3.72E-04	4.47E-04	5.19E-04	5.87E-04	6.07E-04	6.70E-04	6.69E-04	6.21E-04	5.68E-04	3.89E-04	2.54E-04
9	2.52E-05	4.75E-05	9.20E-05	1.64E-04	2.46E-04	3.21E-04	3.82E-04	4.20E-04	4.49E-04	5.07E-04	5.55E-04	5.25E-04	4.88E-04	4.14E-04	3.15E-04
10	6.35E-05	1.22E-04	2.11E-04	2.88E-04	3.47E-04	4.29E-04	4.97E-04	5.52E-04	5.70E-04	6.16E-04	5.85E-04	5.13E-04	3.53E-04	2.34E-04	1.39E-04
11	2.83E-05	5.82E-05	9.36E-05	1.65E-04	2.32E-04	2.82E-04	3.43E-04	3.93E-04	4.30E-04	4.69E-04	4.86E-04	4.64E-04	4.28E-04	3.55E-04	2.43E-04
12	4.68E-05	9.62E-05	1.71E-04	2.25E-04	2.95E-04	3.63E-04	4.23E-04	4.56E-04	4.79E-04	5.29E-04	4.84E-04	4.42E-04	3.56E-04	2.50E-04	1.49E-04
13	3.74E-05	7.06E-05	1.02E-04	1.86E-04	2.62E-04	3.07E-04	3.80E-04	4.22E-04	4.52E-04	5.28E-04	5.34E-04	5.06E-04	4.68E-04	3.54E-04	2.59E-04
14	6.24E-05	1.05E-04	1.86E-04	2.51E-04	3.09E-04	3.99E-04	4.49E-04	4.91E-04	5.47E-04	5.72E-04	5.42E-04	4.85E-04	3.92E-04	2.57E-04	1.64E-04
15	2.77E-04	5.13E-04	8.89E-04	1.34E-03	1.67E-03	2.04E-03	2.45E-03	2.79E-03	3.14E-03	3.38E-03	3.43E-03	3.30E-03	2.78E-03	1.86E-03	1.12E-03
16	2.69E-04	5.33E-04	9.09E-04	1.38E-03	1.79E-03	2.14E-03	2.48E-03	2.85E-03	3.23E-03	3.50E-03	3.51E-03	3.39E-03	2.93E-03	1.96E-03	1.14E-03
Σύνολο	1.53E-03	2.71E-03	4.37E-03	6.44E-03	8.35E-03	1.01E-02	1.19E-02	1.32E-02	1.43E-02	1.55E-02	1.55E-02	1.46E-02	1.25E-02	8.98E-03	5.84E-03

Πίνακας Δ-12: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο12

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	8.43E-05	1.45E-04	2.36E-04	3.27E-04	4.33E-04	5.22E-04	6.06E-04	6.48E-04	6.90E-04	7.46E-04	7.24E-04	6.86E-04	5.74E-04	4.49E-04	3.00E-04
2	4.34E-05	6.29E-05	1.09E-04	1.82E-04	2.79E-04	3.60E-04	4.74E-04	5.17E-04	5.65E-04	6.37E-04	6.89E-04	6.74E-04	6.52E-04	5.80E-04	4.49E-04
3	1.74E-04	2.78E-04	3.46E-04	4.82E-04	5.75E-04	6.56E-04	7.20E-04	7.73E-04	7.60E-04	7.42E-04	6.78E-04	5.53E-04	4.08E-04	2.52E-04	1.51E-04
4	6.40E-05	9.76E-05	1.47E-04	2.43E-04	3.20E-04	4.17E-04	5.02E-04	5.47E-04	5.77E-04	6.13E-04	6.39E-04	6.37E-04	5.64E-04	4.53E-04	3.37E-04
5	1.02E-04	1.52E-04	2.46E-04	2.95E-04	3.76E-04	4.55E-04	4.87E-04	4.87E-04	5.49E-04	5.56E-04	5.23E-04	4.38E-04	3.59E-04	2.43E-04	1.61E-04
6	7.09E-05	1.05E-04	1.74E-04	2.63E-04	3.62E-04	4.68E-04	5.45E-04	5.99E-04	6.33E-04	6.79E-04	7.18E-04	6.98E-04	6.08E-04	5.40E-04	3.81E-04
7	1.04E-04	1.65E-04	2.21E-04	3.02E-04	3.81E-04	4.31E-04	4.91E-04	5.27E-04	5.22E-04	5.40E-04	5.04E-04	4.58E-04	3.68E-04	2.46E-04	1.39E-04
8	5.23E-05	1.00E-04	1.74E-04	2.77E-04	3.56E-04	4.29E-04	4.99E-04	5.72E-04	5.84E-04	6.65E-04	6.48E-04	6.08E-04	5.46E-04	3.92E-04	2.46E-04
9	2.59E-05	4.68E-05	8.45E-05	1.69E-04	2.43E-04	3.14E-04	3.76E-04	4.19E-04	4.29E-04	4.95E-04	5.32E-04	5.12E-04	4.82E-04	4.14E-04	3.05E-04
10	6.81E-05	1.25E-04	2.14E-04	2.80E-04	3.40E-04	4.15E-04	4.78E-04	5.35E-04	5.56E-04	6.00E-04	5.75E-04	4.93E-04	3.54E-04	2.25E-04	1.33E-04
11	3.14E-05	5.49E-05	9.77E-05	1.59E-04	2.31E-04	2.74E-04	3.28E-04	3.72E-04	4.14E-04	4.65E-04	4.81E-04	4.56E-04	4.23E-04	3.38E-04	2.36E-04
12	4.59E-05	9.58E-05	1.61E-04	2.17E-04	2.86E-04	3.47E-04	4.04E-04	4.54E-04	4.81E-04	5.15E-04	4.87E-04	4.33E-04	3.50E-04	2.43E-04	1.39E-04
13	3.11E-05	6.09E-05	1.11E-04	1.80E-04	2.53E-04	3.10E-04	3.78E-04	4.09E-04	4.51E-04	5.12E-04	5.19E-04	5.12E-04	4.64E-04	3.65E-04	2.49E-04
14	5.45E-05	1.09E-04	1.73E-04	2.43E-04	2.98E-04	3.93E-04	4.48E-04	4.80E-04	5.48E-04	5.68E-04	5.51E-04	4.91E-04	3.91E-04	2.53E-04	1.56E-04
15	2.62E-04	4.82E-04	8.59E-04	1.29E-03	1.63E-03	1.98E-03	2.37E-03	2.84E-03	3.29E-03	3.54E-03	3.62E-03	3.46E-03	2.94E-03	1.85E-03	1.04E-03
16	2.63E-04	4.94E-04	8.72E-04	1.31E-03	1.70E-03	2.05E-03	2.45E-03	2.94E-03	3.40E-03	3.67E-03	3.68E-03	3.58E-03	3.08E-03	1.95E-03	1.10E-03
Σύνολο	1.48E-03	2.57E-03	4.23E-03	6.22E-03	8.07E-03	9.82E-03	1.16E-02	1.31E-02	1.44E-02	1.55E-02	1.56E-02	1.47E-02	1.26E-02	8.80E-03	5.52E-03

Πίνακας Δ-13: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο13

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	7.96E-05	1.57E-04	2.44E-04	3.43E-04	4.52E-04	5.14E-04	5.89E-04	6.04E-04	6.21E-04	6.46E-04	6.29E-04	6.00E-04	5.02E-04	3.88E-04	2.61E-04
2	4.15E-05	6.36E-05	1.22E-04	1.99E-04	3.05E-04	3.93E-04	4.79E-04	5.14E-04	5.48E-04	5.75E-04	6.10E-04	5.85E-04	5.67E-04	4.83E-04	3.85E-04
3	1.87E-04	2.87E-04	3.85E-04	4.95E-04	5.60E-04	6.27E-04	6.41E-04	6.89E-04	6.56E-04	6.44E-04	5.85E-04	4.85E-04	3.53E-04	2.17E-04	1.37E-04
4	7.08E-05	9.60E-05	1.69E-04	2.45E-04	3.45E-04	4.20E-04	4.98E-04	5.17E-04	5.32E-04	5.80E-04	5.72E-04	5.83E-04	5.04E-04	4.10E-04	2.97E-04
5	1.09E-04	1.72E-04	2.44E-04	3.01E-04	3.71E-04	4.32E-04	4.48E-04	4.67E-04	4.99E-04	4.89E-04	4.63E-04	3.95E-04	3.18E-04	2.15E-04	1.42E-04
6	7.36E-05	1.13E-04	1.91E-04	2.88E-04	3.87E-04	4.83E-04	5.37E-04	5.65E-04	6.06E-04	6.32E-04	6.57E-04	6.19E-04	5.56E-04	4.74E-04	3.34E-04
7	1.06E-04	1.80E-04	2.37E-04	3.20E-04	3.87E-04	4.16E-04	4.64E-04	4.90E-04	4.73E-04	4.95E-04	4.44E-04	4.12E-04	3.18E-04	2.29E-04	1.30E-04
8	5.17E-05	1.07E-04	1.75E-04	2.72E-04	3.40E-04	4.29E-04	4.79E-04	5.51E-04	5.56E-04	6.31E-04	6.31E-04	5.89E-04	5.29E-04	3.67E-04	2.31E-04
9	2.76E-05	5.16E-05	9.56E-05	1.62E-04	2.37E-04	3.06E-04	3.61E-04	3.95E-04	4.18E-04	4.67E-04	5.25E-04	4.96E-04	4.60E-04	3.94E-04	2.88E-04
10	6.74E-05	1.33E-04	2.15E-04	2.78E-04	3.28E-04	4.11E-04	4.56E-04	5.29E-04	5.36E-04	5.79E-04	5.51E-04	4.78E-04	3.22E-04	2.16E-04	1.24E-04
11	3.38E-05	6.03E-05	1.06E-04	1.61E-04	2.36E-04	2.86E-04	3.37E-04	3.72E-04	4.03E-04	4.54E-04	4.50E-04	4.43E-04	4.09E-04	3.34E-04	2.20E-04
12	4.89E-05	9.74E-05	1.77E-04	2.28E-04	2.95E-04	3.47E-04	3.94E-04	4.47E-04	4.70E-04	4.96E-04	4.69E-04	4.23E-04	3.36E-04	2.23E-04	1.33E-04
13	3.64E-05	6.33E-05	1.14E-04	1.87E-04	2.55E-04	3.08E-04	3.72E-04	4.11E-04	4.28E-04	4.84E-04	5.14E-04	4.76E-04	4.45E-04	3.41E-04	2.31E-04
14	6.03E-05	1.18E-04	1.96E-04	2.48E-04	2.98E-04	3.91E-04	4.22E-04	4.81E-04	5.22E-04	5.49E-04	5.15E-04	4.60E-04	3.72E-04	2.44E-04	1.52E-04
15	2.80E-04	5.21E-04	9.90E-04	1.42E-03	1.77E-03	2.08E-03	2.41E-03	2.77E-03	3.16E-03	3.38E-03	3.46E-03	3.30E-03	2.76E-03	1.78E-03	1.02E-03
16	2.99E-04	5.54E-04	9.69E-04	1.44E-03	1.83E-03	2.13E-03	2.48E-03	2.87E-03	3.21E-03	3.53E-03	3.57E-03	3.40E-03	2.92E-03	1.85E-03	1.05E-03
Σύνολο	1.57E-03	2.77E-03	4.63E-03	6.59E-03	8.40E-03	9.97E-03	1.14E-02	1.27E-02	1.36E-02	1.46E-02	1.46E-02	1.37E-02	1.17E-02	8.16E-03	5.14E-03

Πίνακας Δ-14: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο14

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	5.65E-05	8.54E-05	1.56E-04	2.52E-04	3.30E-04	4.34E-04	5.18E-04	5.39E-04	4.91E-04	4.05E-04	3.71E-04	3.36E-04	3.14E-04	2.91E-04	2.59E-04
2	2.67E-05	4.53E-05	7.33E-05	1.17E-04	1.98E-04	2.92E-04	3.74E-04	4.38E-04	4.83E-04	4.89E-04	3.98E-04	3.36E-04	3.19E-04	3.07E-04	2.57E-04
3	9.53E-05	1.87E-04	2.94E-04	3.76E-04	4.88E-04	5.53E-04	5.14E-04	4.50E-04	3.92E-04	3.77E-04	3.52E-04	3.02E-04	3.18E-04	2.25E-04	1.33E-04
4	4.54E-05	7.04E-05	1.14E-04	1.83E-04	2.56E-04	3.21E-04	4.02E-04	4.40E-04	4.74E-04	4.69E-04	4.42E-04	4.54E-04	4.05E-04	3.31E-04	2.82E-04
5	7.11E-05	1.11E-04	1.75E-04	2.45E-04	2.91E-04	3.55E-04	4.04E-04	3.96E-04	3.82E-04	3.64E-04	3.76E-04	3.15E-04	2.64E-04	2.09E-04	1.43E-04
6	4.99E-05	6.88E-05	1.22E-04	2.05E-04	2.87E-04	3.69E-04	4.59E-04	4.84E-04	5.12E-04	5.05E-04	4.88E-04	4.65E-04	4.23E-04	3.56E-04	3.11E-04
7	6.47E-05	1.19E-04	1.76E-04	2.46E-04	3.14E-04	3.65E-04	3.96E-04	3.95E-04	3.86E-04	3.63E-04	3.49E-04	3.06E-04	2.66E-04	2.13E-04	1.33E-04
8	3.08E-05	5.75E-05	1.16E-04	1.88E-04	2.79E-04	3.53E-04	4.24E-04	4.93E-04	5.67E-04	6.55E-04	7.13E-04	6.78E-04	6.01E-04	4.45E-04	2.76E-04
9	1.30E-05	2.90E-05	5.49E-05	9.94E-05	1.64E-04	2.57E-04	3.10E-04	3.58E-04	3.77E-04	4.65E-04	5.32E-04	5.73E-04	5.70E-04	4.80E-04	3.44E-04
10	2.23E-05	7.81E-05	1.45E-04	2.07E-04	2.75E-04	3.36E-04	4.43E-04	5.00E-04	5.70E-04	6.59E-04	6.46E-04	5.53E-04	3.91E-04	2.48E-04	1.43E-04
11	1.99E-05	3.93E-05	6.47E-05	1.14E-04	1.77E-04	2.38E-04	2.97E-04	3.22E-04	3.72E-04	4.39E-04	4.87E-04	5.00E-04	4.79E-04	3.75E-04	2.61E-04
12	2.79E-05	5.75E-05	1.14E-04	1.71E-04	2.31E-04	2.80E-04	3.59E-04	4.25E-04	4.71E-04	5.42E-04	5.33E-04	4.90E-04	3.77E-04	2.62E-04	1.51E-04
13	2.06E-05	3.92E-05	6.93E-05	1.20E-04	1.94E-04	2.56E-04	3.23E-04	3.66E-04	4.10E-04	4.82E-04	5.41E-04	5.53E-04	5.25E-04	4.14E-04	2.80E-04
14	2.78E-05	6.68E-05	1.28E-04	1.84E-04	2.34E-04	3.13E-04	4.02E-04	4.47E-04	5.25E-04	5.91E-04	5.80E-04	5.29E-04	4.26E-04	2.81E-04	1.82E-04
15	1.61E-04	2.94E-04	5.48E-04	9.60E-04	1.37E-03	1.73E-03	2.03E-03	2.30E-03	2.72E-03	3.47E-03	3.76E-03	3.65E-03	3.14E-03	2.05E-03	1.19E-03
16	1.71E-04	3.12E-04	5.76E-04	9.99E-04	1.39E-03	1.76E-03	2.13E-03	2.37E-03	2.83E-03	3.60E-03	3.92E-03	3.80E-03	3.31E-03	2.14E-03	1.22E-03
Σύνολο	9.03E-04	1.66E-03	2.93E-03	4.67E-03	6.47E-03	8.21E-03	9.79E-03	1.07E-02	1.20E-02	1.39E-02	1.45E-02	1.38E-02	1.21E-02	8.63E-03	5.57E-03

Πίνακας Δ-15: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο15

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	1.65E-04	2.52E-04	3.30E-04	3.91E-04	4.58E-04	4.98E-04	5.20E-04	5.44E-04	5.68E-04	5.71E-04	5.76E-04	5.43E-04	4.81E-04	3.86E-04	2.69E-04
2	8.15E-05	1.26E-04	2.03E-04	2.90E-04	3.39E-04	4.05E-04	4.59E-04	4.70E-04	4.78E-04	5.14E-04	5.30E-04	5.36E-04	5.19E-04	4.65E-04	3.84E-04
3	2.83E-04	3.62E-04	4.29E-04	4.86E-04	5.21E-04	5.46E-04	5.89E-04	5.92E-04	6.09E-04	5.94E-04	5.39E-04	4.72E-04	3.60E-04	2.31E-04	1.38E-04
4	1.14E-04	1.82E-04	2.57E-04	3.13E-04	3.70E-04	4.08E-04	4.54E-04	4.61E-04	4.82E-04	5.14E-04	5.20E-04	5.24E-04	4.69E-04	3.88E-04	2.98E-04
5	1.75E-04	2.43E-04	2.75E-04	3.19E-04	3.67E-04	3.86E-04	4.06E-04	4.30E-04	4.38E-04	4.44E-04	4.26E-04	3.69E-04	3.05E-04	2.24E-04	1.39E-04
6	1.30E-04	2.06E-04	2.75E-04	3.51E-04	4.08E-04	4.64E-04	4.96E-04	5.16E-04	5.40E-04	5.61E-04	5.87E-04	5.64E-04	5.13E-04	4.37E-04	3.29E-04
7	1.80E-04	2.31E-04	2.77E-04	3.25E-04	3.64E-04	3.99E-04	4.22E-04	4.25E-04	4.38E-04	4.45E-04	4.13E-04	3.70E-04	3.02E-04	2.24E-04	1.36E-04
8	1.22E-04	1.93E-04	2.72E-04	3.19E-04	3.90E-04	4.37E-04	5.15E-04	5.23E-04	5.85E-04	6.34E-04	6.45E-04	6.19E-04	5.36E-04	3.95E-04	2.54E-04
9	5.64E-05	1.03E-04	1.73E-04	2.46E-04	2.92E-04	3.29E-04	3.67E-04	3.93E-04	4.34E-04	4.69E-04	5.19E-04	5.27E-04	4.83E-04	4.17E-04	3.00E-04
10	1.55E-04	2.15E-04	2.62E-04	3.14E-04	3.56E-04	4.06E-04	4.74E-04	5.23E-04	5.51E-04	5.91E-04	5.65E-04	4.97E-04	3.52E-04	2.22E-04	1.28E-04
11	6.95E-05	1.14E-04	1.75E-04	2.21E-04	2.63E-04	2.94E-04	3.29E-04	3.60E-04	3.90E-04	4.22E-04	4.50E-04	4.44E-04	4.12E-04	3.26E-04	2.30E-04
12	1.09E-04	1.71E-04	2.16E-04	2.45E-04	2.95E-04	3.40E-04	3.87E-04	4.28E-04	4.67E-04	4.82E-04	4.88E-04	4.28E-04	3.33E-04	2.26E-04	1.46E-04
13	7.36E-05	1.29E-04	1.85E-04	2.44E-04	2.91E-04	3.23E-04	3.63E-04	3.99E-04	4.22E-04	4.78E-04	5.02E-04	4.96E-04	4.59E-04	3.73E-04	2.45E-04
14	1.32E-04	1.85E-04	2.41E-04	2.89E-04	3.26E-04	3.78E-04	4.26E-04	4.61E-04	5.11E-04	5.24E-04	5.18E-04	4.70E-04	3.74E-04	2.59E-04	1.56E-04
15	6.09E-04	1.01E-03	1.37E-03	1.67E-03	1.88E-03	2.06E-03	2.30E-03	2.48E-03	2.69E-03	3.05E-03	3.15E-03	3.01E-03	2.50E-03	1.70E-03	1.03E-03
16	6.35E-04	1.07E-03	1.40E-03	1.67E-03	1.90E-03	2.12E-03	2.37E-03	2.57E-03	2.78E-03	3.09E-03	3.20E-03	3.14E-03	2.62E-03	1.76E-03	1.05E-03
Σύνολο	3.09E-03	4.79E-03	6.34E-03	7.69E-03	8.81E-03	9.79E-03	1.09E-02	1.16E-02	1.24E-02	1.34E-02	1.36E-02	1.30E-02	1.10E-02	8.03E-03	5.23E-03

Δεδομένα αποδόσεων ομοιωμάτων με πηγή 662 keV για το ενεργειακό παράθυρο 613 keV έως 715 keV

Πίνακας Δ-16: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο1

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	5.50E-05	9.14E-05	1.48E-04	2.24E-04	4.04E-04	6.17E-04	8.22E-04	9.55E-04	1.16E-03	1.42E-03	1.75E-03	1.84E-03	1.73E-03	1.40E-03	9.33E-04
2	2.71E-05	4.46E-05	7.82E-05	1.13E-04	1.76E-04	3.07E-04	4.75E-04	6.37E-04	7.49E-04	9.63E-04	1.18E-03	1.51E-03	1.68E-03	1.61E-03	1.38E-03
3	7.40E-05	1.41E-04	2.58E-04	4.29E-04	6.60E-04	8.75E-04	1.15E-03	1.32E-03	1.59E-03	1.82E-03	1.87E-03	1.67E-03	1.27E-03	7.80E-04	4.09E-04
4	4.09E-05	6.15E-05	1.02E-04	1.58E-04	2.70E-04	3.96E-04	5.78E-04	6.99E-04	8.28E-04	9.95E-04	1.24E-03	1.38E-03	1.40E-03	1.23E-03	9.35E-04
5	6.05E-05	1.13E-04	1.78E-04	2.91E-04	4.03E-04	5.37E-04	6.91E-04	8.06E-04	9.12E-04	1.10E-03	1.18E-03	1.16E-03	9.73E-04	6.72E-04	4.23E-04
6	4.06E-05	6.71E-05	1.06E-04	1.73E-04	2.83E-04	4.38E-04	6.35E-04	7.40E-04	8.69E-04	1.07E-03	1.35E-03	1.49E-03	1.54E-03	1.35E-03	1.03E-03
7	7.37E-05	1.12E-04	1.72E-04	3.08E-04	4.46E-04	6.00E-04	7.58E-04	8.84E-04	9.96E-04	1.23E-03	1.32E-03	1.30E-03	1.07E-03	7.46E-04	4.76E-04
8	6.62E-06	1.84E-05	4.88E-05	1.19E-04	2.81E-04	4.93E-04	6.94E-04	8.29E-04	9.58E-04	1.17E-03	1.38E-03	1.42E-03	1.32E-03	1.05E-03	6.89E-04
9	4.81E-06	1.34E-05	2.88E-05	5.70E-05	1.17E-04	2.34E-04	4.46E-04	5.52E-04	6.66E-04	8.16E-04	9.79E-04	1.13E-03	1.23E-03	1.11E-03	8.69E-04
10	0.00E+0 0	1.87E-06	6.09E-05	2.21E-04	3.83E-04	5.63E-04	7.01E-04	8.75E-04	1.02E-03	1.21E-03	1.33E-03	1.25E-03	9.24E-04	5.95E-04	3.25E-04
11	4.81E-06	1.37E-05	4.27E-05	7.36E-05	1.63E-04	2.73E-04	4.14E-04	4.98E-04	5.91E-04	7.38E-04	8.81E-04	9.79E-04	1.01E-03	8.47E-04	6.10E-04
12	9.02E-07	1.31E-05	5.33E-05	1.44E-04	2.55E-04	3.97E-04	5.32E-04	6.40E-04	7.32E-04	9.13E-04	1.04E-03	9.77E-04	8.35E-04	5.70E-04	3.47E-04
13	5.72E-06	1.62E-05	3.67E-05	7.33E-05	1.59E-04	3.05E-04	4.42E-04	5.19E-04	6.50E-04	7.96E-04	9.22E-04	1.01E-03	9.97E-04	9.10E-04	6.47E-04
14	1.20E-06	1.44E-05	6.21E-05	1.44E-04	2.97E-04	4.11E-04	5.87E-04	7.27E-04	7.87E-04	1.01E-03	1.10E-03	1.05E-03	8.99E-04	6.50E-04	4.02E-04
15	1.12E-04	2.02E-04	3.57E-04	6.40E-04	1.20E-03	2.00E-03	2.77E-03	3.28E-03	3.80E-03	4.70E-03	5.63E-03	6.04E-03	5.59E-03	4.50E-03	3.01E-03
16	1.12E-04	2.14E-04	3.60E-04	6.70E-04	1.28E-03	2.07E-03	2.85E-03	3.35E-03	3.88E-03	4.88E-03	5.83E-03	6.23E-03	5.79E-03	4.58E-03	2.99E-03
Σύνολο	6.20E-04	1.14E-03	2.09E-03	3.84E-03	6.77E-03	1.05E-02	1.46E-02	1.73E-02	2.02E-02	2.48E-02	2.90E-02	3.05E-02	2.82E-02	2.26E-02	1.55E-02

Πίνακας Δ-17: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο2

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	5.64E-05	8.33E-05	1.56E-04	2.52E-04	4.27E-04	6.26E-04	8.41E-04	9.77E-04	1.16E-03	1.39E-03	1.67E-03	1.74E-03	1.60E-03	1.26E-03	8.51E-04
2	2.76E-05	4.53E-05	7.05E-05	1.19E-04	1.88E-04	3.28E-04	4.99E-04	6.34E-04	7.61E-04	9.65E-04	1.18E-03	1.45E-03	1.58E-03	1.51E-03	1.24E-03
3	8.52E-05	1.51E-04	2.84E-04	4.56E-04	6.93E-04	8.96E-04	1.16E-03	1.32E-03	1.53E-03	1.71E-03	1.72E-03	1.50E-03	1.15E-03	7.05E-04	3.75E-04
4	4.36E-05	6.34E-05	9.78E-05	1.70E-04	2.82E-04	4.12E-04	5.91E-04	7.09E-04	8.29E-04	9.98E-04	1.19E-03	1.32E-03	1.29E-03	1.14E-03	8.47E-04
5	6.62E-05	1.07E-04	1.82E-04	2.86E-04	3.97E-04	5.56E-04	6.93E-04	7.91E-04	9.06E-04	1.07E-03	1.13E-03	1.06E-03	8.98E-04	6.17E-04	3.93E-04
6	4.48E-05	6.97E-05	1.10E-04	1.78E-04	2.87E-04	4.35E-04	6.51E-04	7.71E-04	8.92E-04	1.08E-03	1.30E-03	1.46E-03	1.43E-03	1.27E-03	9.27E-04
7	7.16E-05	1.06E-04	1.83E-04	3.00E-04	4.45E-04	6.16E-04	7.77E-04	8.95E-04	9.98E-04	1.16E-03	1.26E-03	1.20E-03	9.96E-04	6.75E-04	4.19E-04
8	6.89E-06	1.90E-05	5.48E-05	1.44E-04	2.85E-04	5.06E-04	7.07E-04	8.28E-04	9.52E-04	1.17E-03	1.36E-03	1.37E-03	1.26E-03	9.96E-04	6.28E-04
9	5.17E-06	1.41E-05	2.79E-05	5.84E-05	1.31E-04	2.47E-04	4.41E-04	5.81E-04	6.78E-04	8.01E-04	9.87E-04	1.11E-03	1.19E-03	1.04E-03	8.07E-04
10	2.46E-07	6.34E-06	7.65E-05	2.31E-04	4.04E-04	5.59E-04	7.08E-04	8.78E-04	1.02E-03	1.20E-03	1.28E-03	1.20E-03	8.72E-04	5.43E-04	3.02E-04
11	6.64E-06	1.76E-05	3.90E-05	8.39E-05	1.69E-04	2.85E-04	4.32E-04	5.23E-04	6.17E-04	7.22E-04	8.79E-04	9.74E-04	9.50E-04	8.32E-04	5.65E-04
12	7.38E-07	1.67E-05	6.43E-05	1.46E-04	2.71E-04	4.02E-04	5.65E-04	6.46E-04	7.38E-04	9.12E-04	9.96E-04	9.47E-04	7.96E-04	5.43E-04	3.23E-04
13	6.15E-06	2.04E-05	4.39E-05	8.71E-05	1.68E-04	3.08E-04	4.55E-04	5.45E-04	6.60E-04	7.96E-04	9.15E-04	1.01E-03	9.81E-04	8.62E-04	6.06E-04
14	9.84E-07	2.02E-05	7.10E-05	1.61E-04	3.06E-04	4.26E-04	6.10E-04	7.30E-04	8.04E-04	1.01E-03	1.09E-03	1.03E-03	8.50E-04	6.08E-04	3.70E-04
15	1.14E-04	2.10E-04	3.71E-04	6.89E-04	1.28E-03	2.05E-03	2.78E-03	3.27E-03	3.74E-03	4.65E-03	5.57E-03	5.79E-03	5.34E-03	4.15E-03	2.69E-03
16	1.11E-04	2.21E-04	3.86E-04	7.23E-04	1.34E-03	2.12E-03	2.89E-03	3.36E-03	3.82E-03	4.80E-03	5.67E-03	5.95E-03	5.48E-03	4.22E-03	2.69E-03
Σύνολο	6.47E-04	1.17E-03	2.22E-03	4.09E-03	7.07E-03	1.08E-02	1.48E-02	1.75E-02	2.01E-02	2.44E-02	2.82E-02	2.91E-02	2.66E-02	2.10E-02	1.40E-02

Πίνακας Δ-18: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο3

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	5.74E-05	8.52E-05	1.54E-04	2.48E-04	4.35E-04	6.36E-04	8.57E-04	9.97E-04	1.16E-03	1.35E-03	1.59E-03	1.60E-03	1.49E-03	1.15E-03	7.77E-04
2	2.83E-05	4.79E-05	6.38E-05	1.20E-04	1.82E-04	3.37E-04	5.01E-04	6.46E-04	7.85E-04	9.70E-04	1.17E-03	1.39E-03	1.47E-03	1.40E-03	1.15E-03
3	8.08E-05	1.55E-04	2.84E-04	4.66E-04	7.04E-04	9.03E-04	1.15E-03	1.30E-03	1.45E-03	1.60E-03	1.61E-03	1.40E-03	1.05E-03	6.43E-04	3.41E-04
4	4.01E-05	6.00E-05	9.45E-05	1.77E-04	2.75E-04	4.19E-04	5.98E-04	7.01E-04	8.48E-04	9.63E-04	1.15E-03	1.27E-03	1.23E-03	1.09E-03	7.84E-04
5	6.01E-05	1.02E-04	1.79E-04	2.81E-04	4.08E-04	5.58E-04	7.09E-04	7.74E-04	8.78E-04	1.03E-03	1.07E-03	1.01E-03	8.55E-04	5.82E-04	3.59E-04
6	4.40E-05	7.10E-05	1.04E-04	1.77E-04	2.88E-04	4.44E-04	6.62E-04	7.88E-04	9.01E-04	1.05E-03	1.25E-03	1.38E-03	1.36E-03	1.21E-03	8.61E-04
7	8.02E-05	1.05E-04	1.77E-04	3.01E-04	4.63E-04	6.26E-04	7.76E-04	8.84E-04	9.90E-04	1.11E-03	1.19E-03	1.13E-03	9.35E-04	6.36E-04	3.76E-04
8	6.68E-06	2.13E-05	6.69E-05	1.51E-04	2.96E-04	5.18E-04	7.10E-04	8.35E-04	9.44E-04	1.12E-03	1.31E-03	1.34E-03	1.20E-03	9.51E-04	5.89E-04
9	4.56E-06	1.30E-05	3.37E-05	6.33E-05	1.28E-04	2.51E-04	4.47E-04	5.86E-04	6.87E-04	8.03E-04	9.53E-04	1.09E-03	1.16E-03	9.90E-04	7.80E-04
10	0.00E+0 0	8.58E-06	7.56E-05	2.37E-04	4.16E-04	5.65E-04	6.99E-04	8.59E-04	9.76E-04	1.17E-03	1.23E-03	1.15E-03	8.25E-04	5.12E-04	2.89E-04
11	5.77E-06	1.48E-05	3.80E-05	8.80E-05	1.67E-04	2.91E-04	4.35E-04	5.20E-04	6.26E-04	7.17E-04	8.65E-04	9.48E-04	9.34E-04	7.87E-04	5.51E-04
12	6.08E-07	1.60E-05	6.95E-05	1.47E-04	2.77E-04	4.03E-04	5.67E-04	6.35E-04	7.28E-04	8.95E-04	9.84E-04	9.07E-04	7.68E-04	5.16E-04	3.03E-04
13	9.11E-06	1.92E-05	4.08E-05	8.20E-05	1.73E-04	3.09E-04	4.67E-04	5.47E-04	6.42E-04	7.75E-04	9.19E-04	9.87E-04	9.44E-04	8.46E-04	5.86E-04
14	1.52E-06	1.89E-05	7.06E-05	1.71E-04	3.04E-04	4.43E-04	5.93E-04	7.06E-04	8.03E-04	9.96E-04	1.06E-03	9.79E-04	8.27E-04	5.82E-04	3.51E-04
15	1.04E-04	2.10E-04	3.72E-04	6.83E-04	1.27E-03	2.06E-03	2.78E-03	3.25E-03	3.68E-03	4.53E-03	5.40E-03	5.65E-03	5.12E-03	3.98E-03	2.55E-03
16	1.10E-04	2.22E-04	3.84E-04	7.27E-04	1.34E-03	2.12E-03	2.89E-03	3.36E-03	3.83E-03	4.72E-03	5.52E-03	5.80E-03	5.29E-03	4.01E-03	2.50E-03
Σύνολο	6.33E-04	1.17E-03	2.21E-03	4.12E-03	7.13E-03	1.09E-02	1.48E-02	1.74E-02	1.99E-02	2.38E-02	2.73E-02	2.80E-02	2.54E-02	1.99E-02	1.32E-02

Πίνακας Δ-19: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο4

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	1.05E-04	1.70E-04	3.14E-04	4.70E-04	6.92E-04	8.59E-04	1.07E-03	1.16E-03	1.21E-03	1.35E-03	1.40E-03	1.36E-03	1.22E-03	9.57E-04	6.23E-04
2	4.80E-05	7.64E-05	1.31E-04	2.29E-04	3.71E-04	5.52E-04	7.40E-04	8.29E-04	9.76E-04	1.07E-03	1.17E-03	1.26E-03	1.26E-03	1.15E-03	9.06E-04
3	1.86E-04	3.53E-04	5.23E-04	7.41E-04	9.03E-04	1.10E-03	1.21E-03	1.30E-03	1.37E-03	1.41E-03	1.36E-03	1.12E-03	8.48E-04	5.02E-04	2.76E-04
4	6.58E-05	1.13E-04	1.98E-04	3.27E-04	4.76E-04	6.13E-04	7.38E-04	8.35E-04	9.12E-04	1.02E-03	1.08E-03	1.06E-03	1.02E-03	8.73E-04	6.33E-04
5	1.20E-04	2.05E-04	3.33E-04	4.47E-04	5.62E-04	6.65E-04	7.79E-04	8.42E-04	9.00E-04	9.29E-04	9.10E-04	8.13E-04	6.74E-04	4.66E-04	2.96E-04
6	7.91E-05	1.30E-04	2.16E-04	3.48E-04	5.10E-04	6.54E-04	8.30E-04	8.91E-04	9.86E-04	1.09E-03	1.17E-03	1.19E-03	1.14E-03	9.64E-04	7.05E-04
7	1.48E-04	2.13E-04	3.31E-04	4.93E-04	6.38E-04	7.52E-04	8.46E-04	9.16E-04	9.43E-04	1.04E-03	1.02E-03	9.35E-04	7.53E-04	5.09E-04	3.19E-04
8	4.48E-05	9.84E-05	2.04E-04	3.79E-04	5.48E-04	6.78E-04	8.18E-04	9.16E-04	9.99E-04	1.09E-03	1.15E-03	1.09E-03	9.83E-04	7.39E-04	4.62E-04
9	1.83E-05	4.15E-05	8.28E-05	1.69E-04	3.19E-04	4.92E-04	6.00E-04	6.69E-04	7.27E-04	8.30E-04	9.09E-04	9.30E-04	9.30E-04	7.88E-04	6.07E-04
10	3.00E-05	1.52E-04	3.14E-04	4.57E-04	5.45E-04	6.85E-04	8.09E-04	8.85E-04	9.60E-04	1.05E-03	1.03E-03	9.31E-04	6.58E-04	4.07E-04	2.35E-04
11	2.42E-05	5.21E-05	1.12E-04	2.04E-04	3.32E-04	4.25E-04	5.48E-04	6.02E-04	6.50E-04	7.31E-04	7.60E-04	8.35E-04	7.54E-04	6.16E-04	4.33E-04
12	3.72E-05	1.04E-04	1.95E-04	3.14E-04	4.11E-04	5.27E-04	5.99E-04	6.79E-04	7.46E-04	8.26E-04	8.34E-04	7.43E-04	6.08E-04	4.06E-04	2.51E-04
13	2.97E-05	6.30E-05	1.13E-04	2.17E-04	3.42E-04	4.65E-04	5.66E-04	6.21E-04	6.76E-04	7.84E-04	8.53E-04	8.42E-04	7.80E-04	6.62E-04	4.69E-04
14	4.71E-05	1.07E-04	2.28E-04	3.54E-04	4.35E-04	5.62E-04	6.63E-04	7.44E-04	8.40E-04	8.98E-04	8.85E-04	8.18E-04	6.78E-04	4.68E-04	2.80E-04
15	2.49E-04	4.58E-04	8.72E-04	1.51E-03	2.13E-03	2.66E-03	3.11E-03	3.38E-03	3.76E-03	4.37E-03	4.67E-03	4.56E-03	4.07E-03	3.09E-03	1.96E-03
16	2.41E-04	4.78E-04	8.94E-04	1.57E-03	2.19E-03	2.75E-03	3.25E-03	3.56E-03	3.94E-03	4.52E-03	4.80E-03	4.70E-03	4.18E-03	3.14E-03	1.96E-03
Σύνολο	1.47E-03	2.81E-03	5.06E-03	8.23E-03	1.14E-02	1.44E-02	1.72E-02	1.88E-02	2.06E-02	2.30E-02	2.40E-02	2.32E-02	2.06E-02	1.57E-02	1.04E-02

Πίνακας Δ-20: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο5

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	1.04E-04	1.83E-04	3.23E-04	5.00E-04	6.94E-04	8.50E-04	1.03E-03	1.10E-03	1.14E-03	1.28E-03	1.31E-03	1.29E-03	1.12E-03	8.75E-04	5.60E-04
2	4.37E-05	8.00E-05	1.27E-04	2.47E-04	3.87E-04	5.77E-04	7.31E-04	8.36E-04	9.31E-04	1.01E-03	1.13E-03	1.17E-03	1.18E-03	1.08E-03	8.52E-04
3	2.00E-04	3.69E-04	5.60E-04	7.35E-04	9.02E-04	1.06E-03	1.15E-03	1.25E-03	1.29E-03	1.33E-03	1.27E-03	1.03E-03	7.73E-04	4.56E-04	2.55E-04
4	7.32E-05	1.24E-04	1.99E-04	3.40E-04	4.85E-04	6.26E-04	7.50E-04	8.26E-04	8.79E-04	9.62E-04	1.02E-03	1.03E-03	9.58E-04	8.18E-04	5.85E-04
5	1.27E-04	2.15E-04	3.33E-04	4.54E-04	5.68E-04	6.82E-04	7.45E-04	7.94E-04	8.52E-04	9.03E-04	8.70E-04	7.70E-04	6.39E-04	4.34E-04	2.71E-04
6	7.99E-05	1.30E-04	2.23E-04	3.55E-04	5.21E-04	6.75E-04	8.26E-04	8.82E-04	9.56E-04	1.03E-03	1.13E-03	1.13E-03	1.05E-03	9.06E-04	6.54E-04
7	1.42E-04	2.36E-04	3.60E-04	5.07E-04	6.59E-04	7.47E-04	8.14E-04	8.76E-04	9.23E-04	9.88E-04	9.72E-04	8.71E-04	6.97E-04	4.71E-04	2.94E-04
8	4.31E-05	1.03E-04	2.10E-04	3.66E-04	5.33E-04	6.69E-04	7.69E-04	8.47E-04	9.33E-04	1.02E-03	1.10E-03	1.04E-03	9.33E-04	6.79E-04	4.34E-04
9	2.42E-05	4.40E-05	8.48E-05	1.84E-04	3.15E-04	4.98E-04	5.69E-04	6.47E-04	6.78E-04	7.67E-04	8.65E-04	8.98E-04	8.88E-04	7.44E-04	5.66E-04
10	3.92E-05	1.62E-04	3.04E-04	4.47E-04	5.37E-04	6.34E-04	7.58E-04	8.32E-04	9.14E-04	9.90E-04	9.86E-04	8.81E-04	6.12E-04	3.64E-04	2.25E-04
11	2.74E-05	5.54E-05	1.14E-04	2.11E-04	3.32E-04	4.28E-04	5.36E-04	5.77E-04	6.41E-04	6.93E-04	7.48E-04	8.01E-04	7.17E-04	6.00E-04	4.16E-04
12	4.51E-05	1.06E-04	2.11E-04	3.18E-04	4.03E-04	5.15E-04	6.01E-04	6.52E-04	7.19E-04	7.95E-04	7.93E-04	7.20E-04	5.75E-04	3.95E-04	2.32E-04
13	3.01E-05	6.48E-05	1.22E-04	2.18E-04	3.46E-04	4.64E-04	5.57E-04	6.06E-04	6.56E-04	7.31E-04	8.17E-04	8.15E-04	7.49E-04	6.37E-04	4.40E-04
14	4.84E-05	1.17E-04	2.33E-04	3.54E-04	4.48E-04	5.48E-04	6.50E-04	7.03E-04	7.96E-04	8.71E-04	8.58E-04	7.82E-04	6.52E-04	4.39E-04	2.60E-04
15	2.52E-04	4.79E-04	8.99E-04	1.54E-03	2.18E-03	2.62E-03	3.03E-03	3.28E-03	3.66E-03	4.27E-03	4.56E-03	4.44E-03	3.92E-03	2.90E-03	1.78E-03
16	2.39E-04	4.93E-04	9.33E-04	1.62E-03	2.24E-03	2.73E-03	3.13E-03	3.41E-03	3.77E-03	4.35E-03	4.62E-03	4.52E-03	4.03E-03	2.94E-03	1.82E-03
Σύνολο	1.52E-03	2.96E-03	5.23E-03	8.40E-03	1.16E-02	1.43E-02	1.66E-02	1.81E-02	1.97E-02	2.20E-02	2.31E-02	2.22E-02	1.95E-02	1.47E-02	9.64E-03

Πίνακας Δ-21: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο6

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	1.07E-04	1.85E-04	3.28E-04	5.44E-04	7.25E-04	9.01E-04	1.04E-03	1.09E-03	1.12E-03	1.21E-03	1.19E-03	1.17E-03	1.01E-03	7.76E-04	4.93E-04
2	4.91E-05	8.42E-05	1.37E-04	2.49E-04	4.25E-04	5.98E-04	7.67E-04	8.73E-04	9.47E-04	9.96E-04	1.07E-03	1.08E-03	1.08E-03	9.81E-04	7.58E-04
3	2.10E-04	3.77E-04	5.97E-04	7.68E-04	9.42E-04	1.09E-03	1.12E-03	1.21E-03	1.22E-03	1.22E-03	1.14E-03	9.23E-04	6.91E-04	4.02E-04	2.41E-04
4	8.02E-05	1.31E-04	1.99E-04	3.39E-04	4.98E-04	6.33E-04	7.63E-04	8.51E-04	8.87E-04	9.41E-04	9.76E-04	9.67E-04	9.05E-04	7.69E-04	5.41E-04
5	1.25E-04	2.18E-04	3.34E-04	4.75E-04	5.74E-04	6.91E-04	7.56E-04	7.79E-04	8.31E-04	8.39E-04	8.20E-04	7.07E-04	5.88E-04	4.03E-04	2.49E-04
6	8.38E-05	1.27E-04	2.21E-04	3.59E-04	5.49E-04	7.07E-04	8.58E-04	8.87E-04	9.43E-04	1.01E-03	1.06E-03	1.05E-03	9.69E-04	8.14E-04	6.06E-04
7	1.33E-04	2.42E-04	3.71E-04	5.33E-04	6.70E-04	7.60E-04	8.14E-04	8.56E-04	8.86E-04	9.32E-04	8.96E-04	8.18E-04	6.40E-04	4.38E-04	2.64E-04
8	5.32E-05	1.06E-04	2.13E-04	3.75E-04	5.35E-04	6.57E-04	7.64E-04	8.39E-04	9.02E-04	9.86E-04	1.04E-03	9.87E-04	8.73E-04	6.42E-04	4.05E-04
9	2.37E-05	5.07E-05	8.99E-05	1.87E-04	3.18E-04	4.92E-04	5.77E-04	6.31E-04	6.79E-04	7.40E-04	8.26E-04	8.65E-04	8.34E-04	6.92E-04	5.15E-04
10	4.27E-05	1.62E-04	3.18E-04	4.51E-04	5.28E-04	6.38E-04	7.34E-04	8.08E-04	8.89E-04	9.33E-04	9.34E-04	8.28E-04	5.74E-04	3.46E-04	2.01E-04
11	3.24E-05	5.47E-05	1.13E-04	2.05E-04	3.24E-04	4.37E-04	5.23E-04	5.57E-04	6.27E-04	6.64E-04	7.36E-04	7.93E-04	6.96E-04	5.68E-04	4.00E-04
12	4.42E-05	1.06E-04	2.08E-04	3.15E-04	4.02E-04	4.99E-04	5.89E-04	6.34E-04	6.95E-04	7.81E-04	7.81E-04	6.84E-04	5.36E-04	3.71E-04	2.15E-04
13	3.27E-05	6.11E-05	1.24E-04	2.20E-04	3.46E-04	4.69E-04	5.52E-04	5.95E-04	6.32E-04	7.16E-04	7.88E-04	7.63E-04	7.18E-04	6.01E-04	4.05E-04
14	4.37E-05	1.20E-04	2.37E-04	3.60E-04	4.48E-04	5.33E-04	6.24E-04	6.81E-04	7.74E-04	8.38E-04	8.19E-04	7.38E-04	6.08E-04	4.04E-04	2.40E-04
15	2.52E-04	4.82E-04	8.99E-04	1.57E-03	2.20E-03	2.61E-03	3.01E-03	3.23E-03	3.55E-03	4.17E-03	4.41E-03	4.26E-03	3.73E-03	2.65E-03	1.58E-03
16	2.47E-04	5.03E-04	9.46E-04	1.62E-03	2.25E-03	2.72E-03	3.08E-03	3.31E-03	3.66E-03	4.28E-03	4.51E-03	4.37E-03	3.87E-03	2.72E-03	1.61E-03
Σύνολο	1.56E-03	3.01E-03	5.34E-03	8.57E-03	1.17E-02	1.44E-02	1.66E-02	1.78E-02	1.92E-02	2.13E-02	2.20E-02	2.10E-02	1.83E-02	1.36E-02	8.73E-03

Πίνακας Δ-22: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο7

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	1.01E-04	1.86E-04	3.29E-04	5.35E-04	7.23E-04	8.90E-04	1.02E-03	1.08E-03	1.09E-03	1.13E-03	1.11E-03	1.06E-03	9.17E-04	7.10E-04	4.56E-04
2	4.52E-05	7.54E-05	1.29E-04	2.47E-04	4.15E-04	5.90E-04	7.70E-04	8.75E-04	9.33E-04	9.74E-04	1.01E-03	9.89E-04	9.81E-04	8.72E-04	6.94E-04
3	2.06E-04	3.77E-04	5.93E-04	7.68E-04	9.36E-04	1.06E-03	1.09E-03	1.12E-03	1.13E-03	1.11E-03	1.03E-03	8.51E-04	6.19E-04	3.71E-04	2.12E-04
4	6.98E-05	1.24E-04	2.01E-04	3.31E-04	5.05E-04	6.12E-04	7.43E-04	8.35E-04	8.68E-04	9.06E-04	9.19E-04	9.35E-04	8.39E-04	6.98E-04	5.03E-04
5	1.26E-04	2.11E-04	3.25E-04	4.73E-04	5.62E-04	6.75E-04	7.47E-04	7.60E-04	7.87E-04	7.88E-04	7.63E-04	6.72E-04	5.33E-04	3.65E-04	2.29E-04
6	8.02E-05	1.26E-04	2.18E-04	3.54E-04	6.04E-04	6.80E-04	8.16E-04	8.80E-04	9.36E-04	9.73E-04	9.90E-04	9.93E-04	9.20E-04	7.54E-04	5.46E-04
7	1.34E-04	2.38E-04	3.61E-04	5.27E-04	8.78E-04	7.34E-04	8.08E-04	8.27E-04	8.55E-04	8.71E-04	8.35E-04	7.50E-04	5.80E-04	3.90E-04	2.41E-04
8	4.95E-05	1.02E-04	2.10E-04	3.56E-04	6.70E-04	6.28E-04	7.32E-04	7.98E-04	8.54E-04	9.45E-04	9.70E-04	9.21E-04	8.17E-04	6.05E-04	3.75E-04
9	1.95E-05	4.70E-05	8.49E-05	1.79E-04	4.12E-04	4.76E-04	5.61E-04	6.06E-04	6.44E-04	7.03E-04	7.79E-04	8.06E-04	7.79E-04	6.53E-04	4.81E-04
10	4.54E-05	1.54E-04	3.03E-04	4.29E-04	7.18E-04	6.02E-04	6.92E-04	7.56E-04	8.44E-04	8.77E-04	8.78E-04	7.66E-04	5.37E-04	3.27E-04	1.86E-04
11	3.26E-05	5.73E-05	1.09E-04	2.09E-04	4.46E-04	4.18E-04	5.13E-04	5.42E-04	6.06E-04	6.52E-04	7.12E-04	7.38E-04	6.59E-04	5.32E-04	3.77E-04
12	4.57E-05	1.07E-04	2.05E-04	3.16E-04	5.90E-04	4.76E-04	5.69E-04	6.18E-04	6.81E-04	7.41E-04	7.38E-04	6.51E-04	5.09E-04	3.49E-04	2.01E-04
13	3.34E-05	6.36E-05	1.16E-04	2.16E-04	4.64E-04	4.49E-04	5.32E-04	5.72E-04	6.16E-04	7.01E-04	7.66E-04	7.41E-04	6.89E-04	5.74E-04	3.78E-04
14	4.75E-05	1.18E-04	2.20E-04	3.52E-04	5.93E-04	5.22E-04	6.03E-04	6.60E-04	7.51E-04	8.10E-04	7.92E-04	7.09E-04	5.72E-04	3.73E-04	2.34E-04
15	2.42E-04	4.68E-04	8.97E-04	1.58E-03	1.74E-03	2.57E-03	2.93E-03	3.14E-03	3.50E-03	4.12E-03	4.35E-03	4.23E-03	3.70E-03	2.51E-03	1.47E-03
16	2.34E-04	4.87E-04	9.39E-04	1.62E-03	1.80E-03	2.65E-03	3.02E-03	3.29E-03	3.67E-03	4.26E-03	4.45E-03	4.34E-03	3.81E-03	2.58E-03	1.51E-03
Σύνολο	1.51E-03	2.94E-03	5.24E-03	8.49E-03	1.21E-02	1.40E-02	1.61E-02	1.74E-02	1.88E-02	2.06E-02	2.11E-02	2.02E-02	1.75E-02	1.27E-02	8.10E-03

Πίνακας Δ-23: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο8

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	9.12E-05	1.70E-04	3.10E-04	5.09E-04	6.71E-04	8.44E-04	9.60E-04	1.01E-03	1.01E-03	1.00E-03	9.73E-04	9.24E-04	8.04E-04	6.25E-04	4.17E-04
2	3.80E-05	6.91E-05	1.18E-04	2.28E-04	3.91E-04	5.60E-04	7.31E-04	8.26E-04	8.73E-04	9.17E-04	9.08E-04	8.71E-04	8.53E-04	7.81E-04	6.10E-04
3	1.96E-04	3.47E-04	5.70E-04	7.13E-04	8.99E-04	9.89E-04	1.01E-03	1.02E-03	1.00E-03	9.54E-04	9.17E-04	7.50E-04	5.57E-04	3.42E-04	1.95E-04
4	6.85E-05	1.15E-04	1.83E-04	3.07E-04	4.73E-04	5.73E-04	6.97E-04	7.84E-04	8.30E-04	8.61E-04	8.61E-04	8.55E-04	7.74E-04	6.29E-04	4.60E-04
5	1.21E-04	1.92E-04	3.13E-04	4.46E-04	5.29E-04	6.38E-04	7.13E-04	7.29E-04	7.41E-04	7.31E-04	7.02E-04	6.14E-04	4.93E-04	3.28E-04	2.14E-04
6	7.24E-05	1.14E-04	1.98E-04	3.39E-04	5.04E-04	6.50E-04	7.78E-04	8.43E-04	8.88E-04	9.13E-04	9.25E-04	9.11E-04	8.37E-04	6.80E-04	5.05E-04
7	1.23E-04	2.22E-04	3.49E-04	4.93E-04	6.00E-04	6.93E-04	7.63E-04	7.79E-04	8.05E-04	8.06E-04	7.66E-04	6.75E-04	5.25E-04	3.58E-04	2.20E-04
8	4.48E-05	9.60E-05	1.97E-04	3.40E-04	4.90E-04	6.00E-04	6.98E-04	7.75E-04	8.24E-04	9.16E-04	9.65E-04	9.16E-04	8.02E-04	5.97E-04	3.57E-04
9	1.80E-05	4.33E-05	8.03E-05	1.69E-04	2.97E-04	4.52E-04	5.33E-04	5.79E-04	6.24E-04	6.85E-04	7.70E-04	8.03E-04	7.75E-04	6.47E-04	4.62E-04
10	4.56E-05	1.44E-04	2.82E-04	4.05E-04	4.83E-04	5.80E-04	6.61E-04	7.32E-04	8.27E-04	8.73E-04	8.66E-04	7.42E-04	5.25E-04	3.11E-04	1.77E-04
11	2.86E-05	5.83E-05	1.04E-04	1.99E-04	3.02E-04	4.06E-04	5.00E-04	5.31E-04	5.88E-04	6.43E-04	7.06E-04	7.33E-04	6.51E-04	5.23E-04	3.59E-04
12	4.50E-05	9.90E-05	1.95E-04	2.91E-04	3.86E-04	4.65E-04	5.52E-04	6.03E-04	6.76E-04	7.37E-04	7.28E-04	6.53E-04	5.01E-04	3.37E-04	1.96E-04
13	3.11E-05	6.03E-05	1.09E-04	2.03E-04	3.18E-04	4.27E-04	5.15E-04	5.68E-04	6.02E-04	6.91E-04	7.60E-04	7.53E-04	6.89E-04	5.69E-04	3.70E-04
14	4.50E-05	1.10E-04	2.04E-04	3.31E-04	4.04E-04	5.04E-04	5.94E-04	6.51E-04	7.37E-04	8.15E-04	8.06E-04	7.17E-04	5.70E-04	3.64E-04	2.29E-04
15	2.29E-04	4.27E-04	8.37E-04	1.49E-03	2.06E-03	2.47E-03	2.85E-03	3.08E-03	3.50E-03	4.28E-03	4.50E-03	4.37E-03	3.80E-03	2.45E-03	1.37E-03
16	2.26E-04	4.43E-04	8.84E-04	1.55E-03	2.13E-03	2.58E-03	2.93E-03	3.20E-03	3.66E-03	4.47E-03	4.61E-03	4.54E-03	3.96E-03	2.55E-03	1.41E-03
Σύνολο	1.42E-03	2.71E-03	4.93E-03	8.01E-03	1.09E-02	1.34E-02	1.55E-02	1.67E-02	1.82E-02	2.03E-02	2.08E-02	1.98E-02	1.71E-02	1.21E-02	7.55E-03

Πίνακας Δ-24: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο9

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	1.34E-04	2.42E-04	3.94E-04	5.81E-04	7.72E-04	9.38E-04	1.08E-03	1.15E-03	1.23E-03	1.33E-03	1.33E-03	1.27E-03	1.12E-03	8.65E-04	5.56E-04
2	6.03E-05	9.77E-05	1.85E-04	2.95E-04	4.66E-04	6.42E-04	8.00E-04	8.99E-04	9.84E-04	1.09E-03	1.19E-03	1.20E-03	1.18E-03	1.06E-03	8.53E-04
3	2.65E-04	4.38E-04	6.21E-04	8.21E-04	9.78E-04	1.12E-03	1.23E-03	1.32E-03	1.34E-03	1.33E-03	1.25E-03	1.05E-03	7.50E-04	4.60E-04	2.58E-04
4	9.63E-05	1.60E-04	2.48E-04	3.93E-04	5.29E-04	6.70E-04	8.13E-04	8.62E-04	9.49E-04	1.03E-03	1.04E-03	1.05E-03	9.75E-04	8.07E-04	5.79E-04
5	1.64E-04	2.50E-04	3.83E-04	5.01E-04	6.10E-04	7.29E-04	8.08E-04	8.40E-04	8.89E-04	8.86E-04	8.83E-04	7.67E-04	6.21E-04	4.26E-04	2.64E-04
6	1.05E-04	1.64E-04	2.92E-04	4.19E-04	5.75E-04	7.46E-04	8.60E-04	9.45E-04	1.01E-03	1.10E-03	1.17E-03	1.13E-03	1.05E-03	8.86E-04	6.34E-04
7	1.74E-04	2.85E-04	4.18E-04	5.43E-04	7.05E-04	7.87E-04	8.74E-04	9.33E-04	9.68E-04	9.85E-04	9.49E-04	8.64E-04	6.82E-04	4.66E-04	2.81E-04
8	6.31E-05	1.56E-04	2.82E-04	4.34E-04	5.77E-04	7.18E-04	8.17E-04	9.05E-04	9.67E-04	1.06E-03	1.06E-03	1.00E-03	8.88E-04	6.58E-04	4.05E-04
9	2.85E-05	6.05E-05	1.30E-04	2.33E-04	3.94E-04	5.35E-04	6.15E-04	6.98E-04	7.15E-04	8.02E-04	8.92E-04	8.74E-04	8.26E-04	7.03E-04	5.27E-04
10	9.20E-05	2.23E-04	3.65E-04	4.71E-04	6.03E-04	6.82E-04	7.96E-04	8.93E-04	9.26E-04	9.78E-04	9.43E-04	8.20E-04	5.88E-04	3.63E-04	1.97E-04
11	4.26E-05	8.13E-05	1.49E-04	2.66E-04	3.59E-04	4.64E-04	5.64E-04	6.26E-04	6.60E-04	7.42E-04	7.74E-04	7.70E-04	6.84E-04	5.63E-04	3.94E-04
12	6.98E-05	1.52E-04	2.56E-04	3.48E-04	4.57E-04	5.50E-04	6.29E-04	6.87E-04	7.66E-04	8.06E-04	7.61E-04	6.91E-04	5.55E-04	3.70E-04	2.10E-04
13	4.11E-05	8.64E-05	1.56E-04	2.69E-04	3.91E-04	4.85E-04	5.91E-04	6.41E-04	7.13E-04	7.92E-04	7.98E-04	7.80E-04	7.28E-04	6.05E-04	4.06E-04
14	7.84E-05	1.63E-04	2.78E-04	3.81E-04	4.82E-04	6.00E-04	7.04E-04	7.75E-04	8.17E-04	8.49E-04	8.26E-04	7.64E-04	6.14E-04	4.05E-04	2.46E-04
15	3.21E-04	6.48E-04	1.17E-03	1.77E-03	2.28E-03	2.75E-03	3.17E-03	3.52E-03	3.87E-03	4.22E-03	4.29E-03	4.07E-03	3.59E-03	2.58E-03	1.58E-03
16	3.46E-04	6.52E-04	1.21E-03	1.84E-03	2.38E-03	2.88E-03	3.28E-03	3.65E-03	4.01E-03	4.35E-03	4.36E-03	4.20E-03	3.72E-03	2.67E-03	1.64E-03
Σύνολο	2.08E-03	3.86E-03	6.53E-03	9.57E-03	1.26E-02	1.53E-02	1.76E-02	1.93E-02	2.08E-02	2.24E-02	2.25E-02	2.13E-02	1.86E-02	1.39E-02	9.03E-03

Πίνακας Δ-25: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο10

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	1.34E-04	2.39E-04	3.66E-04	5.40E-04	7.06E-04	8.73E-04	1.03E-03	1.08E-03	1.15E-03	1.26E-03	1.25E-03	1.20E-03	1.04E-03	7.97E-04	5.05E-04
2	5.67E-05	9.72E-05	1.76E-04	2.79E-04	4.38E-04	5.88E-04	7.57E-04	8.36E-04	9.37E-04	1.02E-03	1.14E-03	1.14E-03	1.11E-03	1.00E-03	7.74E-04
3	2.55E-04	4.16E-04	5.83E-04	7.62E-04	9.25E-04	1.07E-03	1.17E-03	1.26E-03	1.26E-03	1.28E-03	1.16E-03	9.40E-04	7.05E-04	4.16E-04	2.36E-04
4	9.70E-05	1.48E-04	2.43E-04	3.72E-04	5.18E-04	6.28E-04	7.72E-04	8.22E-04	8.86E-04	9.89E-04	1.02E-03	1.03E-03	9.23E-04	7.72E-04	5.54E-04
5	1.54E-04	2.44E-04	3.59E-04	4.79E-04	5.91E-04	6.88E-04	7.51E-04	8.06E-04	8.50E-04	8.72E-04	8.44E-04	7.32E-04	5.91E-04	4.04E-04	2.56E-04
6	9.83E-05	1.57E-04	2.62E-04	3.89E-04	5.45E-04	7.13E-04	8.25E-04	8.89E-04	9.70E-04	1.06E-03	1.14E-03	1.09E-03	1.02E-03	8.50E-04	6.09E-04
7	1.65E-04	2.67E-04	3.94E-04	5.01E-04	6.53E-04	7.44E-04	8.37E-04	9.11E-04	9.50E-04	9.84E-04	9.14E-04	8.29E-04	6.29E-04	4.53E-04	2.59E-04
8	5.41E-05	1.52E-04	2.52E-04	4.02E-04	5.25E-04	6.55E-04	7.79E-04	8.53E-04	9.47E-04	1.03E-03	1.04E-03	9.74E-04	8.53E-04	6.21E-04	3.99E-04
9	2.87E-05	5.46E-05	1.20E-04	2.29E-04	3.60E-04	4.73E-04	5.63E-04	6.37E-04	6.88E-04	7.70E-04	8.54E-04	8.66E-04	8.06E-04	6.77E-04	4.89E-04
10	8.51E-05	2.16E-04	3.21E-04	4.18E-04	5.38E-04	6.42E-04	7.78E-04	8.55E-04	8.86E-04	9.53E-04	9.03E-04	7.89E-04	5.68E-04	3.42E-04	1.95E-04
11	3.88E-05	7.79E-05	1.35E-04	2.52E-04	3.42E-04	4.43E-04	5.41E-04	5.92E-04	6.37E-04	7.15E-04	7.90E-04	7.77E-04	6.78E-04	5.49E-04	3.83E-04
12	6.00E-05	1.33E-04	2.54E-04	3.25E-04	4.31E-04	5.34E-04	6.04E-04	6.67E-04	7.41E-04	8.25E-04	7.54E-04	6.76E-04	5.25E-04	3.54E-04	2.10E-04
13	4.16E-05	8.45E-05	1.56E-04	2.38E-04	3.72E-04	4.57E-04	5.43E-04	6.10E-04	6.87E-04	7.94E-04	7.96E-04	7.78E-04	7.27E-04	5.82E-04	3.83E-04
14	7.45E-05	1.55E-04	2.52E-04	3.55E-04	4.61E-04	5.60E-04	6.80E-04	7.49E-04	8.26E-04	8.47E-04	8.16E-04	7.41E-04	6.04E-04	3.97E-04	2.40E-04
15	3.00E-04	6.19E-04	1.13E-03	1.71E-03	2.15E-03	2.60E-03	3.07E-03	3.50E-03	3.96E-03	4.28E-03	4.38E-03	4.21E-03	3.65E-03	2.51E-03	1.48E-03
16	3.17E-04	6.20E-04	1.17E-03	1.75E-03	2.25E-03	2.68E-03	3.13E-03	3.59E-03	4.07E-03	4.46E-03	4.47E-03	4.36E-03	3.78E-03	2.60E-03	1.53E-03
Σύνολο	1.96E-03	3.68E-03	6.17E-03	9.00E-03	1.18E-02	1.43E-02	1.68E-02	1.87E-02	2.04E-02	2.21E-02	2.23E-02	2.11E-02	1.82E-02	1.33E-02	8.50E-03

Πίνακας Δ-26: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο 11

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	1.29E-04	2.22E-04	3.86E-04	5.47E-04	7.39E-04	8.96E-04	1.02E-03	1.07E-03	1.12E-03	1.21E-03	1.17E-03	1.13E-03	9.61E-04	7.39E-04	4.74E-04
2	5.46E-05	9.99E-05	1.72E-04	2.86E-04	4.63E-04	6.10E-04	7.82E-04	8.63E-04	9.35E-04	1.00E-03	1.08E-03	1.07E-03	1.05E-03	9.29E-04	7.27E-04
3	2.56E-04	4.36E-04	5.90E-04	7.85E-04	9.39E-04	1.04E-03	1.13E-03	1.22E-03	1.21E-03	1.19E-03	1.09E-03	8.73E-04	6.46E-04	3.85E-04	2.25E-04
4	9.69E-05	1.51E-04	2.38E-04	3.81E-04	5.15E-04	6.32E-04	7.75E-04	8.37E-04	8.82E-04	9.57E-04	9.82E-04	9.79E-04	8.80E-04	7.24E-04	5.14E-04
5	1.59E-04	2.36E-04	3.64E-04	4.71E-04	6.02E-04	7.02E-04	7.51E-04	7.92E-04	8.22E-04	8.30E-04	8.00E-04	6.90E-04	5.48E-04	3.71E-04	2.32E-04
6	9.69E-05	1.56E-04	2.77E-04	3.89E-04	5.50E-04	7.42E-04	8.45E-04	9.10E-04	9.44E-04	1.01E-03	1.08E-03	1.03E-03	9.50E-04	7.98E-04	5.68E-04
7	1.68E-04	2.79E-04	3.92E-04	5.21E-04	6.68E-04	7.64E-04	8.09E-04	8.75E-04	8.97E-04	9.28E-04	8.56E-04	7.83E-04	5.94E-04	4.19E-04	2.44E-04
8	5.82E-05	1.53E-04	2.53E-04	4.00E-04	5.14E-04	6.45E-04	7.65E-04	8.23E-04	8.92E-04	9.75E-04	9.80E-04	9.05E-04	8.10E-04	5.85E-04	3.73E-04
9	2.82E-05	5.20E-05	1.22E-04	2.25E-04	3.59E-04	4.58E-04	5.56E-04	6.27E-04	6.79E-04	7.42E-04	8.04E-04	8.10E-04	7.48E-04	6.50E-04	4.56E-04
10	8.94E-05	2.07E-04	3.24E-04	4.27E-04	5.43E-04	6.30E-04	7.47E-04	8.04E-04	8.55E-04	8.99E-04	8.46E-04	7.41E-04	5.26E-04	3.26E-04	1.88E-04
11	3.84E-05	8.01E-05	1.43E-04	2.54E-04	3.43E-04	4.38E-04	5.25E-04	5.85E-04	6.21E-04	6.93E-04	7.35E-04	7.36E-04	6.42E-04	5.21E-04	3.62E-04
12	6.38E-05	1.42E-04	2.57E-04	3.21E-04	4.28E-04	5.21E-04	5.93E-04	6.44E-04	7.04E-04	7.77E-04	7.06E-04	6.33E-04	4.97E-04	3.34E-04	1.98E-04
13	4.13E-05	8.46E-05	1.56E-04	2.46E-04	3.71E-04	4.45E-04	5.29E-04	5.82E-04	6.47E-04	7.65E-04	7.46E-04	7.37E-04	6.89E-04	5.41E-04	3.66E-04
14	8.28E-05	1.54E-04	2.64E-04	3.70E-04	4.50E-04	5.39E-04	6.45E-04	7.14E-04	7.98E-04	8.04E-04	7.72E-04	7.04E-04	5.73E-04	3.74E-04	2.28E-04
15	3.14E-04	6.15E-04	1.13E-03	1.73E-03	2.16E-03	2.60E-03	3.09E-03	3.49E-03	3.93E-03	4.19E-03	4.27E-03	4.11E-03	3.57E-03	2.38E-03	1.39E-03
16	3.27E-04	6.17E-04	1.17E-03	1.75E-03	2.24E-03	2.68E-03	3.12E-03	3.55E-03	4.03E-03	4.38E-03	4.34E-03	4.24E-03	3.70E-03	2.47E-03	1.42E-03
Σύνολο	2.00E-03	3.68E-03	6.23E-03	9.11E-03	1.19E-02	1.43E-02	1.67E-02	1.84E-02	2.00E-02	2.14E-02	2.13E-02	2.02E-02	1.74E-02	1.25E-02	7.97E-03

Πίνακας Δ-27: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο12

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	1.21E-04	2.10E-04	3.64E-04	5.40E-04	7.23E-04	8.73E-04	9.84E-04	1.05E-03	1.08E-03	1.11E-03	1.10E-03	1.05E-03	8.86E-04	6.67E-04	4.38E-04
2	5.29E-05	8.89E-05	1.66E-04	2.77E-04	4.32E-04	6.00E-04	7.51E-04	8.33E-04	8.97E-04	9.58E-04	9.93E-04	9.91E-04	9.64E-04	8.56E-04	6.72E-04
3	2.43E-04	4.14E-04	5.70E-04	7.58E-04	9.11E-04	1.01E-03	1.08E-03	1.11E-03	1.11E-03	1.09E-03	1.01E-03	8.32E-04	5.88E-04	3.63E-04	2.09E-04
4	8.87E-05	1.44E-04	2.34E-04	3.63E-04	4.95E-04	6.15E-04	7.40E-04	8.02E-04	8.68E-04	9.11E-04	9.20E-04	9.04E-04	8.27E-04	6.84E-04	4.83E-04
5	1.52E-04	2.33E-04	3.49E-04	4.56E-04	5.62E-04	6.64E-04	7.36E-04	7.64E-04	8.02E-04	7.81E-04	7.53E-04	6.70E-04	5.12E-04	3.44E-04	2.13E-04
6	8.50E-05	1.45E-04	2.53E-04	3.81E-04	5.26E-04	6.83E-04	7.89E-04	8.70E-04	9.10E-04	9.95E-04	1.03E-03	9.59E-04	8.99E-04	7.49E-04	5.18E-04
7	1.51E-04	2.65E-04	3.75E-04	5.07E-04	6.29E-04	7.35E-04	7.77E-04	8.42E-04	8.82E-04	8.80E-04	8.13E-04	7.43E-04	5.59E-04	3.84E-04	2.25E-04
8	6.11E-05	1.39E-04	2.58E-04	3.79E-04	5.05E-04	6.27E-04	7.20E-04	7.85E-04	8.64E-04	9.54E-04	9.53E-04	8.90E-04	7.83E-04	5.74E-04	3.45E-04
9	2.72E-05	5.75E-05	1.19E-04	2.32E-04	3.53E-04	4.44E-04	5.26E-04	6.05E-04	6.37E-04	7.06E-04	7.93E-04	7.82E-04	7.42E-04	6.30E-04	4.44E-04
10	8.71E-05	2.09E-04	3.10E-04	4.08E-04	5.11E-04	6.05E-04	7.06E-04	7.76E-04	8.40E-04	8.69E-04	8.40E-04	7.05E-04	5.04E-04	3.10E-04	1.77E-04
11	3.30E-05	7.76E-05	1.39E-04	2.33E-04	3.35E-04	4.22E-04	4.99E-04	5.56E-04	6.15E-04	6.85E-04	7.17E-04	7.21E-04	6.30E-04	5.13E-04	3.52E-04
12	5.93E-05	1.33E-04	2.32E-04	3.13E-04	4.11E-04	4.86E-04	5.80E-04	6.52E-04	6.90E-04	7.42E-04	7.05E-04	6.24E-04	4.97E-04	3.23E-04	1.85E-04
13	3.69E-05	7.47E-05	1.51E-04	2.42E-04	3.50E-04	4.34E-04	5.30E-04	5.82E-04	6.48E-04	7.34E-04	7.51E-04	7.41E-04	6.81E-04	5.50E-04	3.51E-04
14	6.97E-05	1.54E-04	2.47E-04	3.39E-04	4.44E-04	5.44E-04	6.40E-04	6.99E-04	7.75E-04	8.02E-04	7.90E-04	7.00E-04	5.54E-04	3.49E-04	2.23E-04
15	2.81E-04	5.76E-04	1.10E-03	1.64E-03	2.10E-03	2.49E-03	2.96E-03	3.52E-03	4.08E-03	4.37E-03	4.43E-03	4.30E-03	3.71E-03	2.35E-03	1.29E-03
16	3.12E-04	6.07E-04	1.11E-03	1.67E-03	2.14E-03	2.58E-03	3.06E-03	3.66E-03	4.22E-03	4.53E-03	4.54E-03	4.47E-03	3.86E-03	2.43E-03	1.33E-03
Σύνολο	1.86E-03	3.53E-03	5.98E-03	8.74E-03	1.14E-02	1.38E-02	1.61E-02	1.81E-02	1.99E-02	2.11E-02	2.11E-02	2.01E-02	1.72E-02	1.21E-02	7.46E-03

Πίνακας Δ-28: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο13

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	1.25E-04	2.44E-04	3.96E-04	5.47E-04	7.38E-04	8.46E-04	9.28E-04	9.43E-04	9.36E-04	9.57E-04	9.06E-04	8.52E-04	7.39E-04	5.73E-04	3.76E-04
2	5.32E-05	9.45E-05	1.76E-04	2.95E-04	4.60E-04	6.10E-04	7.41E-04	7.82E-04	8.49E-04	8.43E-04	8.50E-04	8.31E-04	7.89E-04	7.11E-04	5.56E-04
3	2.75E-04	4.49E-04	5.96E-04	7.65E-04	8.70E-04	9.42E-04	9.37E-04	9.52E-04	9.41E-04	8.93E-04	8.38E-04	6.91E-04	5.13E-04	3.11E-04	1.85E-04
4	8.44E-05	1.52E-04	2.48E-04	3.90E-04	5.21E-04	6.19E-04	7.18E-04	7.59E-04	7.88E-04	8.26E-04	8.11E-04	7.97E-04	7.11E-04	5.83E-04	4.21E-04
5	1.62E-04	2.52E-04	3.74E-04	4.72E-04	5.59E-04	6.39E-04	6.67E-04	6.97E-04	7.16E-04	6.89E-04	6.58E-04	5.65E-04	4.42E-04	3.02E-04	2.00E-04
6	9.29E-05	1.53E-04	2.77E-04	4.16E-04	5.60E-04	6.83E-04	7.80E-04	8.17E-04	8.57E-04	8.87E-04	8.94E-04	8.42E-04	7.82E-04	6.37E-04	4.58E-04
7	1.65E-04	2.73E-04	4.06E-04	5.36E-04	6.18E-04	6.91E-04	7.36E-04	7.60E-04	7.56E-04	7.55E-04	7.19E-04	6.33E-04	4.81E-04	3.33E-04	2.02E-04
8	6.78E-05	1.49E-04	2.54E-04	3.96E-04	5.00E-04	6.09E-04	6.87E-04	7.58E-04	8.18E-04	9.13E-04	9.14E-04	8.46E-04	7.40E-04	5.39E-04	3.23E-04
9	3.23E-05	5.99E-05	1.31E-04	2.25E-04	3.55E-04	4.64E-04	5.24E-04	5.87E-04	6.03E-04	6.80E-04	7.73E-04	7.48E-04	7.04E-04	5.93E-04	4.20E-04
10	9.21E-05	2.11E-04	3.32E-04	4.07E-04	5.01E-04	5.78E-04	6.77E-04	7.53E-04	7.97E-04	8.35E-04	7.93E-04	6.73E-04	4.76E-04	2.93E-04	1.62E-04
11	4.27E-05	8.19E-05	1.39E-04	2.43E-04	3.35E-04	4.27E-04	4.98E-04	5.51E-04	5.96E-04	6.66E-04	6.78E-04	6.98E-04	6.11E-04	4.86E-04	3.38E-04
12	7.63E-05	1.50E-04	2.42E-04	3.26E-04	4.10E-04	4.86E-04	5.63E-04	6.20E-04	6.73E-04	7.14E-04	6.80E-04	5.95E-04	4.68E-04	3.01E-04	1.72E-04
13	4.66E-05	8.72E-05	1.56E-04	2.54E-04	3.63E-04	4.43E-04	5.26E-04	5.68E-04	6.19E-04	7.00E-04	7.18E-04	6.98E-04	6.37E-04	5.23E-04	3.27E-04
14	7.91E-05	1.62E-04	2.75E-04	3.45E-04	4.52E-04	5.36E-04	6.12E-04	6.90E-04	7.43E-04	7.69E-04	7.43E-04	6.58E-04	5.23E-04	3.31E-04	2.15E-04
15	3.19E-04	6.27E-04	1.21E-03	1.80E-03	2.24E-03	2.59E-03	2.96E-03	3.41E-03	3.90E-03	4.19E-03	4.25E-03	4.07E-03	3.52E-03	2.23E-03	1.24E-03
16	3.35E-04	6.60E-04	1.23E-03	1.86E-03	2.29E-03	2.66E-03	3.06E-03	3.54E-03	4.04E-03	4.35E-03	4.35E-03	4.24E-03	3.67E-03	2.34E-03	1.29E-03
Σύνολο	2.05E-03	3.81E-03	6.44E-03	9.27E-03	1.18E-02	1.38E-02	1.56E-02	1.72E-02	1.86E-02	1.97E-02	1.96E-02	1.84E-02	1.58E-02	1.11E-02	6.88E-03

Πίνακας Δ-29: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο14

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	7.75E-05	1.33E-04	2.36E-04	4.00E-04	5.51E-04	6.89E-04	7.79E-04	8.17E-04	7.69E-04	4.96E-04	4.26E-04	3.87E-04	3.68E-04	3.98E-04	3.60E-04
2	3.22E-05	5.72E-05	9.81E-05	1.80E-04	3.08E-04	4.52E-04	5.96E-04	6.66E-04	7.09E-04	7.53E-04	5.38E-04	3.84E-04	3.67E-04	3.53E-04	3.31E-04
3	1.43E-04	2.71E-04	4.44E-04	5.99E-04	7.32E-04	8.14E-04	7.70E-04	5.77E-04	4.57E-04	4.22E-04	3.89E-04	3.59E-04	4.31E-04	3.11E-04	1.84E-04
4	5.31E-05	9.56E-05	1.55E-04	2.55E-04	3.90E-04	4.82E-04	5.82E-04	6.52E-04	6.86E-04	6.45E-04	5.71E-04	5.52E-04	4.86E-04	4.25E-04	3.85E-04
5	1.02E-04	1.63E-04	2.58E-04	3.62E-04	4.38E-04	5.30E-04	5.87E-04	5.73E-04	5.19E-04	4.75E-04	4.59E-04	3.93E-04	3.62E-04	2.91E-04	2.00E-04
6	6.02E-05	9.29E-05	1.63E-04	2.77E-04	4.09E-04	5.35E-04	6.62E-04	6.88E-04	7.33E-04	6.84E-04	5.94E-04	5.77E-04	5.19E-04	4.48E-04	3.98E-04
7	1.04E-04	1.74E-04	2.77E-04	4.11E-04	4.86E-04	5.83E-04	6.34E-04	6.02E-04	5.53E-04	5.06E-04	4.78E-04	4.29E-04	3.62E-04	3.06E-04	2.07E-04
8	3.52E-05	7.51E-05	1.47E-04	2.63E-04	4.04E-04	5.06E-04	6.22E-04	7.12E-04	8.10E-04	9.38E-04	1.02E-03	9.88E-04	8.63E-04	6.48E-04	3.77E-04
9	1.58E-05	3.22E-05	6.63E-05	1.26E-04	2.31E-04	3.71E-04	4.44E-04	5.07E-04	5.55E-04	6.70E-04	7.94E-04	8.61E-04	8.46E-04	7.16E-04	4.99E-04
10	2.70E-05	1.06E-04	2.17E-04	3.25E-04	3.90E-04	4.95E-04	6.28E-04	7.21E-04	8.40E-04	9.46E-04	9.44E-04	7.98E-04	5.62E-04	3.25E-04	1.86E-04
11	2.42E-05	4.44E-05	8.77E-05	1.60E-04	2.44E-04	3.46E-04	4.30E-04	4.82E-04	5.40E-04	6.41E-04	7.38E-04	7.89E-04	7.18E-04	5.72E-04	3.84E-04
12	3.52E-05	8.04E-05	1.57E-04	2.26E-04	3.18E-04	4.04E-04	5.02E-04	5.80E-04	6.82E-04	7.75E-04	7.85E-04	7.00E-04	5.41E-04	3.51E-04	2.03E-04
13	2.40E-05	4.42E-05	8.56E-05	1.61E-04	2.69E-04	3.57E-04	4.64E-04	5.12E-04	5.66E-04	6.83E-04	7.85E-04	8.08E-04	7.59E-04	6.05E-04	3.96E-04
14	3.63E-05	8.72E-05	1.71E-04	2.58E-04	3.37E-04	4.42E-04	5.50E-04	6.32E-04	7.44E-04	8.43E-04	8.63E-04	7.71E-04	6.04E-04	3.84E-04	2.42E-04
15	1.71E-04	3.43E-04	6.73E-04	1.23E-03	1.72E-03	2.14E-03	2.51E-03	2.74E-03	3.28E-03	4.26E-03	4.63E-03	4.57E-03	3.97E-03	2.56E-03	1.42E-03
16	1.90E-04	3.76E-04	6.96E-04	1.27E-03	1.78E-03	2.17E-03	2.63E-03	2.93E-03	3.43E-03	4.39E-03	4.76E-03	4.69E-03	4.11E-03	2.66E-03	1.47E-03
Σύνολο	1.13E-03	2.17E-03	3.93E-03	6.50E-03	9.00E-03	1.13E-02	1.34E-02	1.44E-02	1.59E-02	1.81E-02	1.88E-02	1.81E-02	1.59E-02	1.14E-02	7.25E-03

Πίνακας Δ-30: Αποτελέσματα Monte Carlo για ομοίωμα Νο15

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	2.61E-04	4.03E-04	5.35E-04	6.40E-04	7.29E-04	7.88E-04	8.02E-04	8.00E-04	8.21E-04	8.45E-04	8.38E-04	7.91E-04	7.23E-04	5.83E-04	4.07E-04
2	1.06E-04	1.97E-04	3.16E-04	4.50E-04	5.51E-04	6.34E-04	7.10E-04	7.20E-04	7.28E-04	7.40E-04	7.55E-04	7.60E-04	7.39E-04	6.74E-04	5.66E-04
3	4.51E-04	5.68E-04	6.63E-04	7.66E-04	7.90E-04	8.00E-04	8.24E-04	8.45E-04	8.40E-04	8.41E-04	7.74E-04	6.82E-04	5.35E-04	3.43E-04	1.96E-04
4	1.65E-04	2.67E-04	3.89E-04	4.75E-04	5.48E-04	6.17E-04	6.55E-04	6.87E-04	7.00E-04	7.17E-04	7.37E-04	7.18E-04	6.62E-04	5.67E-04	4.16E-04
5	2.57E-04	3.62E-04	4.24E-04	4.98E-04	5.35E-04	5.74E-04	5.99E-04	6.04E-04	6.23E-04	6.16E-04	5.88E-04	5.37E-04	4.41E-04	3.07E-04	2.01E-04
6	1.79E-04	2.88E-04	4.05E-04	5.11E-04	5.95E-04	6.67E-04	7.16E-04	7.27E-04	7.43E-04	7.63E-04	7.93E-04	7.88E-04	7.22E-04	5.96E-04	4.56E-04
7	2.87E-04	3.99E-04	4.68E-04	5.45E-04	5.87E-04	6.31E-04	6.43E-04	6.48E-04	6.70E-04	6.71E-04	6.70E-04	5.80E-04	4.76E-04	3.44E-04	2.16E-04
8	1.72E-04	2.91E-04	3.97E-04	4.79E-04	5.53E-04	6.31E-04	7.29E-04	7.75E-04	8.71E-04	9.23E-04	9.65E-04	9.04E-04	7.83E-04	5.84E-04	3.59E-04
9	7.60E-05	1.39E-04	2.54E-04	3.73E-04	4.23E-04	4.68E-04	5.33E-04	5.70E-04	6.25E-04	7.13E-04	7.83E-04	8.09E-04	7.48E-04	6.40E-04	4.60E-04
10	2.48E-04	3.32E-04	4.05E-04	4.56E-04	5.13E-04	6.05E-04	7.18E-04	7.71E-04	8.20E-04	8.84E-04	8.42E-04	7.26E-04	5.14E-04	3.21E-04	1.70E-04
11	9.28E-05	1.67E-04	2.62E-04	3.40E-04	3.92E-04	4.36E-04	4.96E-04	5.32E-04	5.95E-04	6.33E-04	7.03E-04	6.94E-04	6.41E-04	5.03E-04	3.40E-04
12	1.71E-04	2.56E-04	3.11E-04	3.63E-04	4.27E-04	4.89E-04	5.68E-04	6.10E-04	6.51E-04	7.18E-04	6.95E-04	6.33E-04	4.80E-04	3.17E-04	1.90E-04
13	9.32E-05	1.72E-04	2.68E-04	3.44E-04	4.20E-04	4.63E-04	5.20E-04	5.66E-04	6.13E-04	6.69E-04	7.14E-04	7.29E-04	6.72E-04	5.29E-04	3.52E-04
14	1.86E-04	2.65E-04	3.43E-04	4.10E-04	4.62E-04	5.39E-04	6.12E-04	6.52E-04	7.14E-04	7.55E-04	7.69E-04	6.94E-04	5.27E-04	3.68E-04	2.07E-04
15	7.63E-04	1.33E-03	1.76E-03	2.09E-03	2.35E-03	2.55E-03	2.85E-03	3.08E-03	3.36E-03	3.79E-03	3.89E-03	3.75E-03	3.19E-03	2.12E-03	1.23E-03
16	7.81E-04	1.35E-03	1.82E-03	2.14E-03	2.41E-03	2.67E-03	2.94E-03	3.18E-03	3.43E-03	3.90E-03	4.02E-03	3.90E-03	3.31E-03	2.18E-03	1.29E-03
Σύνολο	4.29E-03	6.79E-03	9.02E-03	1.09E-02	1.23E-02	1.36E-02	1.49E-02	1.58E-02	1.68E-02	1.82E-02	1.85E-02	1.77E-02	1.52E-02	1.10E-02	7.06E-03

**Δεδομένα αποδόσεων ομοιωμάτων με πηγή 140 keV για το ενεργειακό παράθυρο
119 keV έως 161 keV**

	-100	-85	-70	-55	-40	-25	-10	0	10	25	40	55	70	85	100
1	2.38E-04	4.64E-04	7.90E-04	1.19E-03	1.59E-03	1.99E-03	2.32E-03	2.46E-03	2.59E-03	2.77E-03	2.78E-03	2.66E-03	2.26E-03	1.67E-03	1.05E-03
2	1.11E-04	1.83E-04	3.47E-04	6.33E-04	1.01E-03	1.38E-03	1.76E-03	1.99E-03	2.17E-03	2.37E-03	2.56E-03	2.61E-03	2.56E-03	2.26E-03	1.70E-03
3	5.14E-04	8.43E-04	1.23E-03	1.65E-03	2.04E-03	2.29E-03	2.52E-03	2.66E-03	2.69E-03	2.73E-03	2.53E-03	2.05E-03	1.44E-03	8.27E-04	4.45E-04
4	1.60E-04	2.85E-04	5.02E-04	7.53E-04	1.09E-03	1.35E-03	1.64E-03	1.77E-03	1.93E-03	2.14E-03	2.21E-03	2.20E-03	1.99E-03	1.60E-03	1.11E-03
5	3.35E-04	5.83E-04	8.54E-04	1.16E-03	1.43E-03	1.68E-03	1.89E-03	2.01E-03	2.15E-03	2.15E-03	2.05E-03	1.81E-03	1.36E-03	8.96E-04	5.40E-04
6	1.69E-04	2.93E-04	5.31E-04	8.30E-04	1.17E-03	1.48E-03	1.76E-03	1.93E-03	2.09E-03	2.32E-03	2.42E-03	2.37E-03	2.13E-03	1.74E-03	1.23E-03
7	3.64E-04	6.24E-04	9.48E-04	1.25E-03	1.56E-03	1.80E-03	2.02E-03	2.19E-03	2.31E-03	2.34E-03	2.20E-03	1.96E-03	1.50E-03	9.96E-04	5.52E-04
8	1.08E-04	2.47E-04	5.07E-04	8.01E-04	1.08E-03	1.32E-03	1.57E-03	1.72E-03	1.90E-03	2.10E-03	2.13E-03	2.05E-03	1.74E-03	1.27E-03	7.58E-04
9	3.73E-05	9.20E-05	1.94E-04	4.29E-04	7.25E-04	9.54E-04	1.14E-03	1.28E-03	1.41E-03	1.58E-03	1.78E-03	1.79E-03	1.75E-03	1.47E-03	1.05E-03
10	1.69E-04	4.42E-04	6.88E-04	9.24E-04	1.10E-03	1.35E-03	1.63E-03	1.80E-03	1.85E-03	1.93E-03	1.90E-03	1.59E-03	1.11E-03	6.25E-04	3.10E-04
11	5.81E-05	1.38E-04	2.63E-04	4.66E-04	6.97E-04	8.95E-04	1.06E-03	1.19E-03	1.31E-03	1.55E-03	1.62E-03	1.64E-03	1.46E-03	1.16E-03	7.83E-04
12	1.24E-04	2.84E-04	5.04E-04	6.71E-04	8.69E-04	1.07E-03	1.26E-03	1.43E-03	1.55E-03	1.65E-03	1.60E-03	1.42E-03	1.08E-03	7.03E-04	3.75E-04
13	6.84E-05	1.39E-04	2.53E-04	4.90E-04	7.15E-04	8.94E-04	1.10E-03	1.23E-03	1.42E-03	1.56E-03	1.66E-03	1.64E-03	1.50E-03	1.17E-03	7.80E-04
14	1.35E-04	2.81E-04	5.17E-04	7.03E-04	8.88E-04	1.12E-03	1.39E-03	1.50E-03	1.61E-03	1.70E-03	1.69E-03	1.51E-03	1.16E-03	7.35E-04	4.04E-04
15	3.14E-04	7.13E-04	1.48E-03	2.30E-03	2.94E-03	3.46E-03	4.05E-03	4.64E-03	5.22E-03	5.62E-03	5.75E-03	5.63E-03	4.98E-03	3.39E-03	1.94E-03
16	3.54E-04	8.02E-04	1.69E-03	2.64E-03	3.34E-03	3.95E-03	4.56E-03	5.23E-03	5.93E-03	6.46E-03	6.48E-03	6.40E-03	5.65E-03	3.85E-03	2.17E-03
Σύνολο	3.26E-03	6.41E-03	1.13E-02	1.69E-02	2.22E-02	2.70E-02	3.17E-02	3.50E-02	3.82E-02	4.10E-02	4.14E-02	3.93E-02	3.37E-02	2.44E-02	1.52E-02