

ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ - ΑΚΤΙΝΟΦΥΣΙΚΗ»
ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΕΘΝΙΚΟΥ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΕΘΝΙΚΟΥ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΡΑΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ

IN VIVO ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΡΑΔΙΟΝΟΥΚΛΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΣΩΜΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΕΦΑΝΙΔΟΥ ΧΡΥΣΟΥΛΑ

Επιβλέπων

**Καλέφ-Εζρά Τζων, Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής, Ιατρική Σχολή,
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων**

ΙΩΑΝΝΙΝΑ, 2017

Τριμελής εξεταστική επιτροπή

Καλέφ-Εζρά Τζών, Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής, Τμήμα Ιατρικής, Σχολή Επιστημών Υγείας, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Κουρκουμέλης Νίκος, Επίκουρος Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής, Ιατρική Σχολή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Ποτηριάδης Κωνσταντίνος, Ειδικός Λειτουργικός Επιστήμονας Α΄ Βαθμίδας Υπεύθυνος Τμήματος Ελέγχου Ραδιενέργειας Περιβάλλοντος, Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (Ε.Ε.Α.Ε)

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διαπανεπιστημιακού-Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Ιατρική Φυσική-Ακτινοφυσική στο εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Τζών Καλέφ-Εζρά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας μελέτης καθώς και για την πολύ καλή συνεργασία και τις γνώσεις που μου μετέδωσε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες οφείλονται σε όλους στους εθελοντές, απλούς πολίτες και εργαζομένους του Τμήματος Πυρηνικής Ιατρικής του Πανεπιστημιακού Γενικού Νοσοκομείου Ιωαννίνων για την συμμετοχή τους στην έρευνα καθώς χωρίς τη συμβολή τους δεν θα ήταν εφικτή η πραγματοποίηση της.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την αμέριστη ηθική και υλική συμπαράσταση τους καθ' όλη την διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ABSTRACT.....	vi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
Α. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
Α.1 Μετρητές ολόσωμης ακτινοβολίας	1
Α.2 Φασματοσκοπία και αρχή λειτουργίας ανιχνευτών NaI(Tl)	2
Α.3 Χαρακτηριστικά των σπινθηριστών NaI(Tl)	4
Α.4 Πυρηνικά Ηλεκτρονικά του ΜΟΑ.....	6
Α.5 Κάλιο (K)	9
Α.6 Ραδόνιο (Rn)	11
Α.7 Ραδιοϊσότοπα στην Πυρηνική Ιατρική	14
Α.8 Αντικείμενο της εργασίας	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	16
Β. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	16
Β.1 Μετρητικό σύστημα	16
Β.2 Ενεργειακή βαθμονόμηση μετρητικού συστήματος	18
Β.3 Περιγραφή ομοιωμάτων	19
Β.4 Εξαερισμός και θέρμανση αίθουσας.....	19
Β.5 In vivo μετρήσεις	20
Β.6 Ελάχιστη ανιχνεύσιμη ενεργότητα	20
Β.7 Επίπεδα ραδονίου στα Ιωάννινα	20
Β.8 Dual energy X-ray absorptiometry (DXA)	21
Β.9 Εργαλεία Στατιστικής Ανάλυσης	21
Β.10 Στατιστικά Δεδομένα Εξεταζόμενων	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	24
Γ. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΑΝΑΛΥΣΗ.....	25
Γ.1 In vivo μετρήσεις ^{40}K	25
Γ.2 In vivo μετρήσεις ^{214}Bi	39
Γ.3 In vivo μετρήσεις σε επαγγελματικά εκτιθέμενους	60
Γ.4 In vivo μετρήσεις μετά από επίσκεψη σε σπήλαιο	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	76
Δ. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	76
Δ.1 Μελέτη ^{40}K στα δύο φύλα	76
Δ.2 Αποτελέσματα μελέτης ^{214}Bi	79
Δ.3 Εσωτερική δοσιμέτρηση των επαγγελματικά εκτιθέμενων.....	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	86
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	90

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι μετρητές ολόσωμης ακτινοβολίας είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ακτινοβολίας γ και X που εκπέμπονται από τα ραδιονουκλίδια που βρίσκονται μέσα στο ανθρώπινο σώμα. Τα δεδομένα από την ποσοτικοποίηση των ραδιονουκλιδίων στο ανθρώπινο σώμα χρησιμοποιούνται κυρίως στην έρευνα και στην ακτινοπροστασία του πληθυσμού και των εργαζομένων. Στην παρούσα εργασία διενεργήθηκαν μετρήσεις για την μελέτη τεσσάρων ραδιονουκλιδίων δυο φυσικών (^{40}K και ^{214}Bi), και δυο τεχνητών ($^{99\text{m}}\text{Tc}$ και ^{131}I) στο ανθρώπινο σώμα με χρήση του μετρητή ολόσωμης ακτινοβολίας (ΜΟΑ) του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Το κάλιο είναι ένα στοιχείο μεγάλης βιολογικής σημασίας, που μπορεί να ποσοτικοποιηθεί μέσω της ακτινοβολίας- γ που εκπέμπει το ^{40}K . Μετρήσεις ολόσωμης ποσότητας καλίου (TBK) σε 21 ενήλικες υγιείς εθελοντές έδειξαν μέση τιμή συγκέντρωσης καλίου 1.57 ± 0.28 g/kg στο σώμα επτά ανδρών και 1.29 ± 0.22 g/kg 14 γυναικών με αξιοπιστία μετρήσεων σε διάστημα μερικών μηνών σε μια από τις γυναίκες (8.5 ± 1.1)% και (4.7 ± 1.0)% και σε έναν τους άνδρες.

Το ^{214}Bi αποτελεί θυγατρικό του ραδονίου τα επίπεδα του οποίου στο περιβάλλον, και κατά επέκταση στον ανθρώπινο οργανισμό, εξαρτώνται από τον τόπο, την εποχή του χρόνου, τις καιρικές συνθήκες, την ώρα της ημέρας και τις δραστηριότητες του κάθε ατόμου. Ως εκ τούτου, μελετήθηκε η ενεργότητα του ^{214}Bi στο ανθρώπινο σώμα σε διαφορετικές συνθήκες. Δώδεκα μετρήσεις σε διάστημα χειμερινών μηνών που έγιναν σε έναν άνδρα απογευματινή ώρα, έδειξαν ολόσωμη συγκέντρωση ^{214}Bi στο σώμα του (1.81 ± 1.15) Bq/kg. Δέκα μετρήσεις ^{214}Bi σε ενήλικη γυναίκα που διενεργήθηκαν επίσης απογευματινές ώρες έδειξαν μέση συγκέντρωσης ^{214}Bi , (1.39 ± 0.36) Bq/kg μικρότερη από τις δέκα πρωινές και δέκα μεσημβρινές μετρήσεις, (2.81 ± 1.26) Bq/kg και (2.03 ± 1.06) Bq/kg αντίστοιχα. Μετρήσεις σε έναν εθελοντή μετά από τουριστική επίσκεψη στο σπήλαιο του Περάματος Ιωαννίνων έδειξαν ότι ο ενεργός χρόνος ημιζωής του ^{214}Bi στο σώμα του λόγω της επίσκεψης ήταν (55 ± 2) min, και ότι το πηλίκο ενεργοτήτων $^{214}\text{Pb}/^{214}\text{Bi}$ στο σώμα του μειώθηκε με το πέρασμα του χρόνου από την έξοδο από το σπήλαιο.

Ποσοτικοποιήθηκε η εσωτερική ραδιομόλυνση επτά εργαζομένων του Τμήματος Πυρηνικής Ιατρικής του Γενικού Πανεπιστημιακού Νοσοκομείου Ιωαννίνων. Θεωρώντας τις λίγες μετρήσεις που έγιναν ενδεικτικές, βρέθηκε ότι η ετήσια ενεργή τους δόση από εσωτερική ακτινοβολήση από $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ή/και ^{131}I , κυμαινόταν από 0.00 έως 0.4 mSv, ενώ η αντίστοιχη από εξωτερική ακτινοβολήση ήταν το 2016 από 0.2 έως 2.1 mSv.

ABSTRACT

The Whole Body Counter (WBC) is an apparatus used for the detection of γ and α rays which are emitted by the radionuclides in the human body. The measurements of radionuclides in the human body are useful for research purposes and for the protection of the general population and personnel from radiation exposure. In this thesis, measurements were conducted for the study of two natural (^{40}K and ^{214}Bi) and two artificial ($^{99\text{m}}\text{Tc}$ and ^{131}I) radionuclides in the human body using the WBC that is located in the University of Ioannina.

Potassium is an element of great biological significance which can be quantified by the γ -radiation emitted by ^{40}K . Measurements of total body potassium in twenty one healthy adults volunteers showed mean value of potassium concentration of 1.57 ± 0.28 g/kg in the body of seven men and 1.29 ± 0.22 g/kg in the body of fourteen women. The reliability of the measurements conducted for one of the females was $(8.5 \pm 1.1)\%$ and for one of the males $(4.7 \pm 1.0)\%$ over a few months.

The ^{214}Bi is a daughter radionuclide of radon whose levels in the environment and thus in the human body, depend on the place, the season, the weather conditions, the time of the day and the activities of each person. Therefore, the activity of ^{214}Bi in the human body was studied under variable conditions. Twelve measurements performed to an adult male in winter afternoons, showed a total body concentration of ^{214}Bi equal to (1.81 ± 1.15) Bq/kg. Ten ^{214}Bi measurements, obtained from an adult woman in the afternoon, showed a mean concentration of ^{214}Bi (1.39 ± 0.36) Bq/kg, which was less than the mean concentration of ten morning and ten midday measurements (2.81 ± 1.26) Bq/kg and (2.03 ± 1.06) Bq/kg, respectively. Measurements to a male volunteer after his visit to the Perama Cave of Ioannina showed that the effective half-life of ^{214}Bi in his body following the visit was (55 ± 2) min and that the $^{214}\text{Pb}/^{214}\text{Bi}$ activity ratio in his body decreased with time since the moment he left the cave.

The internal radioactive contamination of seven employees of the Department of Nuclear Medicine of the General University Hospital of Ioannina was quantified. Assuming that these measurements were representative, it was found that the annual effective dose from internal exposure from $^{99\text{m}}\text{Tc}$ and/or ^{131}I ranged from 0.00 to 0.40 mSv, while the corresponding external irradiation ranged from 0.2 to 2.1 mSv in 2016.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

A. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

A.1 Μετρητές ολόσωμης ακτινοβολίας

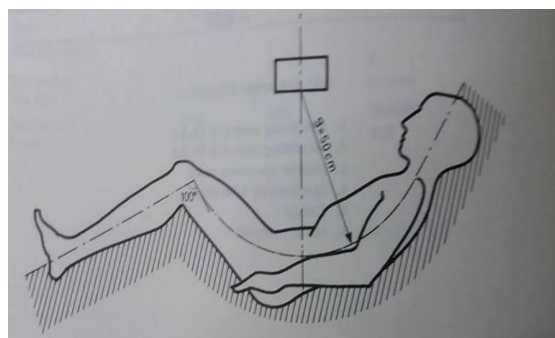
Το ανθρώπινο σώμα είναι φορέας ραδιενεργών ουσιών ως αποτέλεσμα της φυσιολογικής σύνθεσης του αλλά και των αλληλεπιδράσεών του με το περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσεται. Ο προσδιορισμός και η ποσοτικοποίηση των ραδιονουκλιδίων στο ανθρώπινο σώμα επιτυγχάνεται άμεσα με χρήση Μετρητών Ολόσωμης Ακτινοβολίας (ΜΟΑ).

Ο Μετρητής Ολόσωμης Ακτινοβολίας ή Whole Body Counter (WBC) είναι μια διάταξη υψηλής ευαισθησίας που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ραδιονουκλιδίων που εκπέμπουν ακτινοβολία γ ή χ και βρίσκονται κατά την διάρκεια της μέτρησης στους ιστούς και στα όργανα ενός ζωντανού οργανισμού χωρίς να απαιτείται η γνώση της χωρικής κατανομής τους σε αυτόν. Μερικές φορές ο όρος χρησιμοποιείται και για να περιγραφούν διατάξεις μέτρησης της ραδιενέργειας από ορισμένη περιοχή του σώματος (partial body counter) όπως της ραδιενέργειας στους πνεύμονες, το κρανίο, τον θυρεοειδή, τα άκρα των χεριών, κλπ. Αν και οι περισσότεροι ΜΟΑ χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της ραδιενέργειας στο ανθρώπινο σώμα, έχουν κατασκευαστεί ορισμένοι που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για μετρήσεις σε ζώα (Stamatelatos et al, 1999).

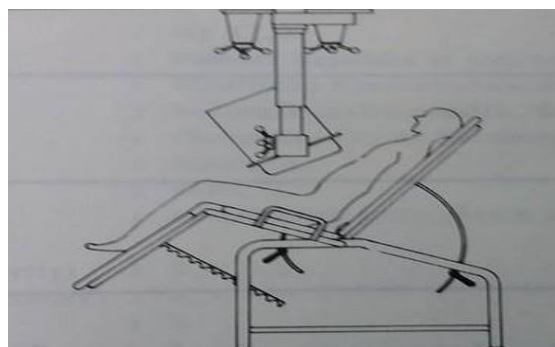
Οι ΜΟΑ είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι στην μέτρηση ατόμων μετά από υπερέκθεση σε ραδιενεργά υλικά ως αποτέλεσμα πυρηνικού ατυχήματος. Επίσης βοηθούν τον γιατρό σε διάφορες κλινικές μελέτες όπως στο να προσδιοριστεί η αναλογία μυϊκού ιστού και λίπους στο σώμα του ασθενή μέσω της μέτρησης του ολόσωμου καλίου (^{40}K). Ως αποτέλεσμα η μέτρηση του ολόσωμου ^{40}K με τον ΜΟΑ μπορεί να οδηγήσει στην έγκαιρη διάγνωση μυασθενειών και άλλων διαταραχών (Frederick W. Lengemann and John H. Woodburn, 1964). Περιορισμένες μελέτες με χρήση του ΜΟΑ έχουν γίνει για την μέτρηση της ολόσωμης ποσότητας του εισπνεόμενου ^{214}Bi στον ανθρώπινο οργανισμό, που είναι θυγατρικό του ραδονίου, ^{222}Rn , (ραδιενεργή σειρά ^{238}U) και είναι συνήθως ο κυριότερος περιβαλλοντικός παράγοντας έκθεσης του πληθυσμού σε ακτινοβολία.

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι μετρητών ολόσωμης ακτινοβολίας είναι οι εξής:

α) Γεωμετρίας τόξου: ο εξεταζόμενος είναι τοποθετημένος σε κλίνη κοίλου σχήματος και ο ανιχνευτής είναι με τέτοιο τρόπο τοποθετημένος ώστε να ισαπέχει όσο το δυνατόν από όλα τα σημεία του σώματος.



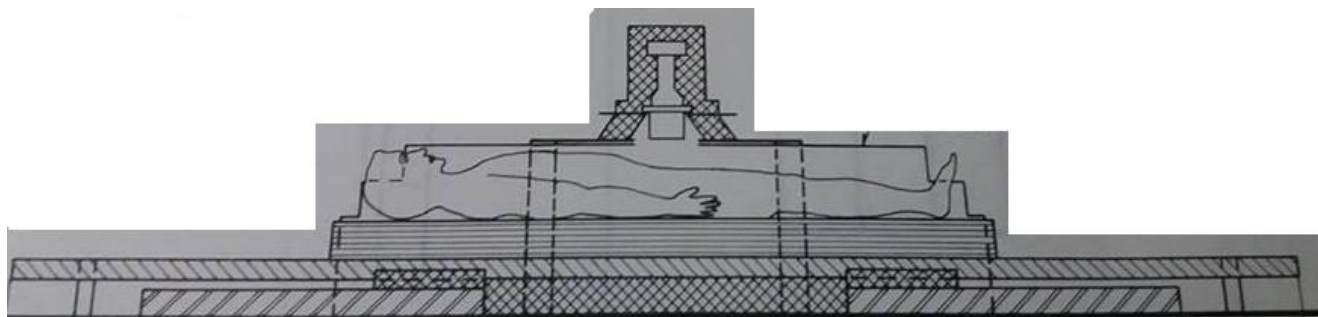
β) Γεωμετρία καρέκλας: η μέτρηση γίνεται με τον εξεταζόμενο καθισμένο σε καρέκλα με τους



γοφούς και τα γόνατα λυγισμένα σε γωνία $\sim 90^\circ$. Το σώμα εκτός από το κάτω μέρος των ποδιών περίπου ισαπέχει από τον ανιχνευτή.

γ) Γεωμετρία κινούμενης ή ακίνητης κλίνης: ο εξεταζόμενος ξαπλώνει σε μια κλίνη οι ανιχνευτές βρίσκονται τοποθετημένοι πάνω και/ή κάτω από το σώμα του. Σε αυτήν την περίπτωση κινούνται είτε οι ανιχνευτές είτε η κλίνη και σαρώνεται ολόκληρο το σώμα του εξεταζόμενου.

δ) ΜΟΑ τύπου δωματίου: ο εξεταζόμενος εισέρχεται σε θωρακισμένο δωμάτιο όπου βρίσκονται τοποθετημένοι ανιχνευτές για την διενέργεια των μετρήσεων.



γ) Γεωμετρία κλίνης (Directory of whole body radioactivity monitors, IAEA 1970)

A.2 Φασματοσκοπία και αρχή λειτουργίας ανιχνευτών NaI(Tl)

Οι ανιχνευτές σπινθηρισμών χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλούς τομείς όπως στην πυρηνική και σωματιδιακή φυσική. Βασίζονται στην ιδιότητα που έχουν ορισμένα υλικά να μετατρέπουν σε ορατό φως την ενέργεια που εναποτίθεται σε αυτά από ιοντίζουσες ακτινοβολίες ή άλλα σωματίδια.

A.2.1 Βασικοί τρόποι αλληλεπίδρασης ιοντίζουσας ακτινοβολίας με την ύλη

Για την κατανόηση του τρόπου απόκρισης και λειτουργίας των ανιχνευτών NaI απαιτείται η γνώση των βασικών διαδικασιών αλληλεπίδρασης των φωτονίων με την ύλη, δηλαδή του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, της σκέδασης Compton και της δίδυμης γένεσης.

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο όλη η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου απορροφάται από ένα δέσμιο ηλεκτρόνιο του ατόμου και μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια εκπεμπόμενου φωτοηλεκτρονίου. Το κενό που δημιουργείται στο άτομο καλύπτεται από ηλεκτρόνια εξωτερικών στοιβάδων με εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας ή ηλεκτρονίων Auger.

Σκέδαση Compton

Στην σκέδαση Compton προσπίπτοντα φωτόνια σκεδάζονται από ηλεκτρόνια χάνοντας ένα μέρος της ενέργειάς τους. Οι ενέργειες του σκεδαζόμενου φωτονίου και ηλεκτρονίου δίνονται από τις σχέσεις:

$$E_{\gamma}' = \frac{E_{\gamma}}{1 + E_o(1 - \cos \theta)} \quad E_e = E_{\gamma} - \frac{E_{\gamma}}{1 + E_o(1 - \cos \theta)}$$

E_{γ} είναι η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου

E_e η ενέργεια του σκεδαζόμενου ηλεκτρονίου

$E_o = E_{\gamma}/mc^2$

θ είναι η γωνία της διεύθυνσης του αρχικού και του σκεδαζόμενου φωτονίου

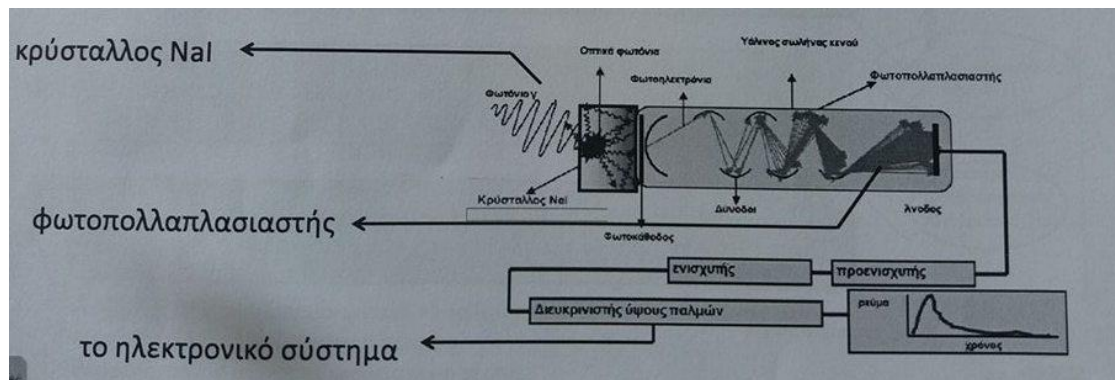
Δίδυμη γένεση

Στην δίδυμη γένεση ένα υψηλής ενέργειας φωτόνιο ($>1.02\text{MeV}$) μπορεί να οδηγήσει στην αυθόρμητη δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου. Η κινητική ενέργεια του ζεύγους σωματιδίων είναι ίση με την ενέργεια του αρχικού φωτονίου μείον την ενέργεια ηρεμίας των δύο σωματιδίων ($2mc^2$). Η εξαΰλωση του ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου οδηγεί σε εκπομπή δύο φωτονίων ενέργειας 0.511MeV . Τα φωτόνια αυτά είναι πιθανό να αλληλεπιδράσουν εκ νέου με τον κρύσταλλο είτε με φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είτε με σκέδαση Compton.

A.2.2 Διαδικασία ανίχνευσης φωτονίων γ και X

Αρχικά όταν ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με τα δομικά στοιχεία του κρυστάλλου με φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, Compton ή δίδυμη γένεση χάνει όλη ή ένα μέρος της ενέργειάς του με αποτέλεσμα την εκπομπή ενός ηλεκτρονίου από τις ατομικές στοιβάδες. Το ηλεκτρόνιο που παράγεται χάνει την κινητική του ενέργεια μέσα στον κρύσταλλο με μη ελαστικές κρούσεις, παράγοντας κυρίως δευτερογενείς ιοντισμούς. Ένα μικρό ποσοστό από την ενέργεια που χάνει μετατρέπεται σε σπινθηρισμούς, δηλαδή αποδιεγέρσεις ηλεκτρονίων στις οπτικές στοιβάδες των ατόμων και παραγωγή ορατών φωτονίων. Από την αλληλεπίδραση κάθε προσπίπτοντος φωτονίου παράγεται ένα σύνολο ορατών φωτονίων στο ορατό ή στο εγγύς υπεριώδες δηλαδή ένας διακριτός παλμός φωτός, που είναι ανάλογος του ποσού ενέργειας του προσπίπτοντος φωτονίου που απορροφήθηκε στον κρύσταλλο κατά την αλληλεπίδραση.

Ο σπινθηριστής συνδέεται οπτικά με έναν ή περισσότερους φωτοπολλαπλασιαστές (photomultiplier). Κάθε φωτοπολλαπλασιαστής αποτελείται από δύο υπομονάδες, την φωτοευαίσθητη φωτοκάθοδο και την multiplicator tube, όπου τα ηλεκτρόνια πολλαπλασιάζονται με δευτερογενείς εκπομπές από τις δυνόδους. Τα φωτόνια ενέργειας μερικών eV που παράγονται στον σπινθηριστή διεγείρουν την φωτοκάθοδο του φωτοπολλαπλασιαστή απελευθερώνοντας φωτοηλεκτρόνια. Με την συνεισφορά του ηλεκτρικού πεδίου τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται από την φωτοκάθοδο κατευθύνονται αρχικά στην πρώτη δύνοδο. Τα επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια οδηγούν σε δευτερογενή εκπομπή ηλεκτρονίων στην πρώτη δύνοδο από την οποία το ηλεκτρικό πεδίο ευνοεί την διαφυγή τους προς την δεύτερη δύνοδο. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται σε όλες τις δυνόδους. Δέκα με δεκατέσσερις συνεχόμενες δύνοδοι αυξάνουν τον αριθμό των ηλεκτρονίων συνήθως κατά έναν παράγοντα περίπου $10^6 - 10^8$ (C.E.Grouthamel, 1960). Καθώς τα εκπεμπόμενα από την φωτοκάθοδο ηλεκτρόνια πολλαπλασιάζονται στις δυνόδους, κάθε μεμονωμένη αλληλεπίδραση ιοντίζοντος φωτονίου που αποδίδεται στην έξοδο του φωτοπολλαπλασιαστή οδηγεί σε έναν ενισχυμένο σε σχέση με τον αρχικό ηλεκτρικό παλμό. Το ύψος του παλμού είναι πρακτικά ανάλογο της ενέργειας που εναποτέθηκε στον κρύσταλλο από το φωτόνιο.



Εικόνα 1: Μονάδες του ανιχνευτικού συστήματος (Π. Δημητρίου, 2010)

A.3 Χαρακτηριστικά των σπινθηριστών NaI(Tl)

Οι σπινθηριστές NaI που είναι οι περισσότερο εύχρηστοι είναι συνήθως ενεργοποιημένοι με θάλιο (Tl) ώστε να σπινθηρίζουν σε θερμοκρασία δωματίου (Π. Δημητρίου, 2010).

A.3.1 Φυσικές Ιδιότητες ανιχνευτών NaI(Tl)

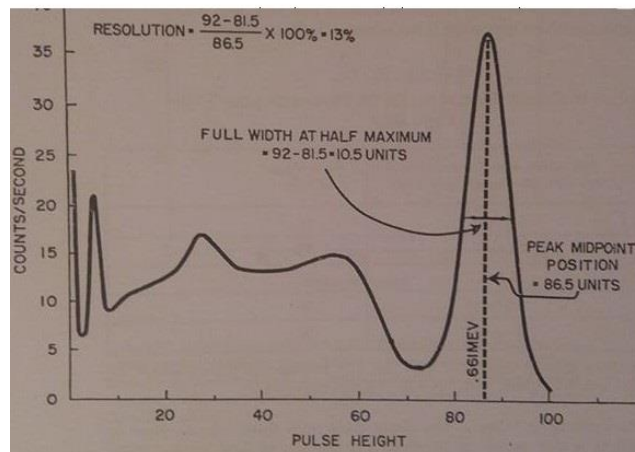
- Σχετικά μεγάλο ποσοστό της ενέργειας που απορροφούν το εκπέμπουν σαν φως σε μικρά μήκη κύματος.
- Παρουσιάζουν ικανοποιητική μηχανική αντοχή, που τους επιτρέπει να κατασκευάζονται μονοκρύσταλλοι σε επιθυμητό σχήμα (π.χ. τύπου φρέατος, με κυκλική ή ορθογώνια επιφάνεια, αλλά μικρού πάχους στις γ-κάμερες).
- Έχουν πυκνότητα 3.67g/cm^3 , που σε συνδυασμό με το μεγάλο ατομικό αριθμό του Ιωδίου ($Z=53$) δημιουργούν έναν απορροφητή για χαμηλής και μέσης ενέργειας φωτόνια.
- Δίνουν πληροφορίες τόσο για τον ρυθμό όσο και για την ενέργεια των προσπιπτόντων φωτονίων-γ.

A.3.2 Ενεργειακή Διακριτική Ικανότητα

Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα ενός ανιχνευτή χαρακτηρίζει την ικανότητα του να διακρίνει φωτόνια τα οποία δεν διαφέρουν πολύ ως προς την ενέργειά τους. Επομένως, ορίζεται ως ο λόγος του πλήρους εύρους στο μέγιστο ύψος της φωτοκορυφής. (Full Width at Half Maximum, FWHM), προς την ενέργεια της φωτοκορυφής και δίνεται από την σχέση:

$$R\% = \frac{\Delta E}{E} \cdot 100$$

Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα εξαρτάται από την ποιότητα κατασκευής, το μέγεθος και την γεωμετρία του κρυστάλλου, την απόδοση του φωτοπολλαπλασιαστή και την απόδοση των υπολοίπων μονάδων του ανιχνευτικού συστήματος. Όσο ευρύτερη είναι η φωτοκορυφή τόσο μικρότερη είναι η σχετική διακριτική ικανότητα και αντίστροφα (Π. Δημητρίου, 2010).



Εικόνα 2: Full Width at Half Maximum (Harshaw, 1969)

Η σχετική διακριτική ικανότητα είναι συνάρτηση της ενέργειας που εναποτίθεται σε έναν ανιχνευτή και συνήθως βελτιώνεται με την αύξηση της ενέργειας.

Στην περίπτωση που η φωτοκορυφή ακολουθεί κανονική κατανομή, η ενεργειακή εξάρτηση της διακριτικής ικανότητας προκύπτει θεωρητικά από την σχέση:

$$R = 2,35 \cdot \frac{\sigma}{j}$$

Όπου σ η διασπορά του αριθμού των ιοντισμών για δεδομένη ενέργεια και J ο αριθμός των ιοντισμών για δεδομένη ενέργεια που δίνεται από τον τύπο:

$$J = \frac{E}{w}$$

Όπου J είναι ο μέσος αριθμός ιοντισμών που προκύπτει και F ο παράγοντας Fano, που λαμβάνει υπόψη του όλους τους στοιχειώδεις μηχανισμούς που μπορούν να οδηγήσουν σε απόδοση της ενέργειας στον ανιχνευτή και εξαρτάται αποκλειστικά από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο ανιχνευτής. Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει:

$$R = 2,35 \cdot \frac{\sqrt{F \cdot J}}{J} = 2,35 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot w}{E}}$$

Συνήθως στους σπινθηριστές $F=1.0$ (οπότε η διασπορά δίνεται για κατανομή Poisson, δηλαδή $\sigma^2=J$) (Milbrath et al, 2008).

A.3.3 Ανιχνευτική Απόδοση

Οι ακτίνες γ μπορούν να διασχίσουν μεγάλες αποστάσεις μέσα στον κρύσταλλο χωρίς να αλληλεπιδράσουν με αυτόν ή να εναποθέσουν σε αυτόν μόνο ένα ποσοστό της ενέργειά τους. Άρα έχουν απόδοση μικρότερη από 100%. Η απόδοση είναι το μέγεθος που συσχετίζει τον αριθμό παλμών που μετρούνται με τον αριθμό των προσπιπτόντων φωτονίων στον ανιχνευτή.

Η απόλυτη απόδοση ενός ανιχνευτή ορίζεται ως:

$$\varepsilon_{abs} = \frac{\text{αριθμός των παλμών που καταγράφηκαν}}{\text{αριθμός κβάντων ακτινοβολίας που εκπέμφθηκαν από την πηγή}}$$

και εξαρτάται όχι μόνο από τις ιδιότητες του ανιχνευτή αλλά και από την γεωμετρία μέτρησης, κυρίως από την απόσταση της πηγής από τον ανιχνευτή. Η εσωτερική απόδοση ορίζεται ως:

$$\varepsilon_{int} = \frac{\text{αριθμός παλμών που καταγράφηκαν}}{\text{αριθμός κβάντων ακτινοβολίας που εισήλθαν στον ανιχνευτή}}$$

και δεν εξαρτάται από την στερεά γωνία μεταξύ της πηγής και του ανιχνευτή. Οι δύο αποδόσεις σχετίζονται, για ισοτροπικές πηγές σε μέσο που αλληλεπιδρά με την ακτινοβολία, με την σχέση:

$$\varepsilon_{int} = \varepsilon_{abs} \cdot \frac{4\pi}{\Omega}$$

όπου Ω είναι η στερεά γωνία ανάμεσα στον ανιχνευτή και την πηγή. Η ενδογενής απόδοση του ανιχνευτή συχνά εξαρτάται από το υλικό του (π.χ. από τον γραμμικό του συντελεστή εξασθένησης), την ενέργεια της ακτινοβολίας και τις διαστάσεις του ενεργού όγκου του ανιχνευτή στην κατεύθυνση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

A.3.4 Χρόνος απόσβεσης

Χρόνος απόσβεσης οπτικού παλμού (decay time) ενός σπινθηριστή είναι ο χρόνος στον οποίο παράχθηκε το 67% του συνόλου των σπινθηρισμών ανά αλληλεπίδραση και είναι για τον κρύσταλλο NaI(Tl) της τάξης των 0.25 μ s.

A.3.5 Νεκρός Χρόνος

Σε όλα τα ανιχνευτικά συστήματα υπάρχει συγκεκριμένος ελάχιστος χρόνος ώστε δύο γεγονότα που συμβαίνουν το ένα μετά το άλλο, να διακρίνονται και να καταγράφονται ως ξεχωριστοί παλμοί. Αυτός ο χρόνος είναι ο νεκρός χρόνος (dead time) του ανιχνευτικού συστήματος. Πάντα υπάρχει περίπτωση ένα πραγματικό γεγονός να μην καταγραφεί επειδή συνέβη πολύ γρήγορα σε σχέση με το προηγούμενο, ή το σύστημα να μην μπορεί να ξεχωρίσει δυο παλμούς με πολύ μικρή χρονική διαφορά στην έναρξή τους. Το φαινόμενο αυτό ενδέχεται να είναι σοβαρό σε περίπτωση που μετράται υψηλός ρυθμός σωματιδίων που προσπίπτουν στον ενεργό όγκο για αυτό και απαιτείται η προσθήκη διόρθωσης του νεκρού χρόνου (G.F.Knoll).

A.4 Πυρηνικά Ηλεκτρονικά του ΜΟΑ

Η κύρια χρήση των πυρηνικών ηλεκτρονικών ενός ΜΟΑ είναι η επεξεργασία και διαμόρφωση του σήματος των ανιχνευτών. Το ηλεκτρικό σήμα που παράγεται από την αλληλεπίδραση ακτίνων γ με τους ανιχνευτές υπόκειται σε κατάλληλη επεξεργασία από τις διάφορες μονάδες ηλεκτρονικών, ώστε αφού διαμορφωθούν και ενισχυθούν

κατάλληλα να ταξινομηθούν οι παλμοί, με την βοήθεια προγράμματος φασματοσκοπίας. Η επεξεργασία και διαμόρφωση του σήματος γίνεται σε μια σειρά από βαθμίδες πριν καταλήξει στον Η/Υ. Κάθε βαθμίδα αποτελεί και μια αυτόνομη ηλεκτρονική μονάδα που μπορεί να προέρχεται και από διαφορετικό κατασκευαστή. Όλες μαζί όμως πρέπει συνήθως να είναι συμβατές με το πρωτόκολλο NIM TID-20893. Αυτό καθορίζει τις στάνταρ τάσεις τροφοδοσίας των μονάδων, ώστε να μπορούν να συνδέονται όλες μαζί σε κοινό σύστημα τροφοδοσίας. Επίσης καθορίζει ότι τα μέγιστα πλάτη παλμών στην έξοδο είναι 10 V. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των μονάδων αυτών είναι η ευαισθησία σε οποιαδήποτε μεταβολή του σήματος και ο χαμηλός λόγος σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio, SNR). Στο δεύτερο συνεισφέρουν τόσο τα παθητικά, όσο και τα ενεργητικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά (Σουψανάς, 2004).

A.4.1 Προενισχυτής

Η βασική λειτουργία του προενισχυτή είναι να μετατρέπει το ηλεκτρικό φορτίο που παράγεται στον μεταλλάκτη, σε παλμό τάσης κατάλληλης μορφής και να τον ενισχύει, έτσι ώστε να μπορεί να μεταφερθεί διαμέσου ομοαξονικών καλωδίων στις υπόλοιπες μονάδες επεξεργασίας, οι οποίες βρίσκονται συχνά σε μεγάλη απόσταση από τον ανιχνευτή. Επειδή το σήμα εισόδου είναι πολύ ασθενές, ο προενισχυτής τοποθετείται πολύ κοντά στον ανιχνευτή, ώστε να μην υπάρχει περαιτέρω αλλοίωση από τα διάφορα ηλεκτρομαγνητικά πεδία και τις παράσιτες χωρητικότητες των γραμμών μεταφοράς, ώστε να ελαχιστοποιείται ο λόγος θόρυβος προς σήμα.

A.4.2 Ενισχυτής

Οι ενισχυτές χρησιμοποιούνται για δύο λόγους:

- 1) την ενίσχυση του σήματος εξόδου του προενισχυτή
- 2) τη διαμόρφωση του παλμού, ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω επεξεργασία του (pulse shaping).

Και στις δύο περιπτώσεις το σήμα εξόδου του ενισχυτή θα πρέπει να διατηρεί την αρχική πληροφορία. Εάν η πληροφορία βρίσκεται στο ύψος του παλμού, τότε ο ενισχυτής θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο γραμμικός, ώστε να διατηρεί την αναλογικότητα μεταξύ εισόδου-εξόδου. Η κυριότερη χρήση τους, κυρίως αυτών που χρησιμοποιούνται για φασματοσκοπία, είναι η διαμόρφωση και η επεξεργασία του παλμού εισόδου. Το σήμα στην είσοδο του ενισχυτή είναι συνήθως εκθετικής μορφής με "ουρά" στο τέλος του, σταθεράς χρόνου τ , συνήθως στην περιοχή 1 μ s -100 μ s. Εάν ένας δεύτερος παλμός έρθει χωρίς να έχει τελειώσει ο προηγούμενος, δημιουργείται το φαινόμενο υπέρθεσης παλμού (pile-up), όπου συμβαίνει αλλοίωση του πλάτους. Για να αποφύγουμε την εμφάνιση του φαινομένου ή πρέπει να μειωθεί η περίοδος των κρούσεων ανά μονάδα χρόνου ή να μικρύνει η "ουρά" των παλμών με κατάλληλη επεξεργασία, μέσω ειδικών ηλεκτρονικών διατάξεων. Η δεύτερη περίπτωση είναι και η ιδανικότερη, αφού συχνά δεν είναι πρακτικό να μικρύνει το τ . Ένας δεύτερος λόγος που γίνεται η επεξεργασία του παλμού είναι η βελτιστοποίηση του λόγου S/N, αφού ο θόρυβος, N, εμφανίζεται ακόμα και όταν η σταθερά χρόνου τ είναι μικρή. Για αυτό το λόγο συχνά το σήμα διαμορφώνεται ώστε να προσεγγίζει την κανονική κατανομή.

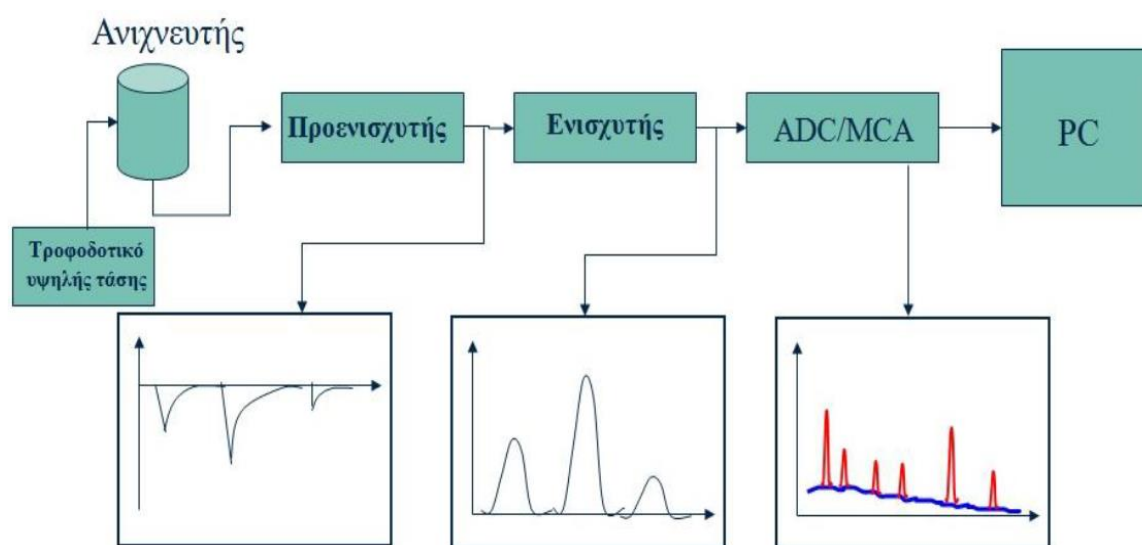
A.4.3 Μονάδα μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC)

Μετά την ηλεκτρονική επεξεργασία το σήμα οδηγείται σε ειδική μονάδα μετατροπής του σε ψηφιακή μορφή για την τελική διοχέτευσή του σε ψηφιακή μονάδα όπως ο ηλεκτρονικός υπολογιστής (H/Y). Μία τέτοια μονάδα είναι ο μετατροπέας αναλογικού παλμού σε ψηφιακό ή μονάδα ADC (Analog to Digital Converter). Για αναλογικούς παλμούς με μέγιστο πλάτος σε μία περιοχή δυναμικού η μονάδα ADC παράγει ένα ακέραιο αριθμό μεταξύ 0 και N, ανάλογο προς το μέγιστο πλάτος κάθε παλμού. Ο αριθμός αυτός χρησιμοποιείται τότε ως διεύθυνση για τον προσδιορισμό μιας θέσης στη μνήμη του H/Y. Για παράδειγμα εάν η μονάδα ADC λειτουργεί στην περιοχή 0 έως 10 V, με ευχέρεια παράγει ψηφία από 0 έως 1000, τότε ένας παλμός 2.5 V που θα αφιχθεί στη μονάδα θα μετατραπεί στον αριθμό 250. Ο αριθμός αυτός διοχετευόμενος στον H/Y, θα αυξήσει κατά μία μονάδα τον αριθμό που βρίσκεται αποθηκευμένος στη διεύθυνση (κανάλι) 250. Η διεργασία αυτή οδηγεί σε φάσμα ύψους παλμών με μορφή ιστογράμματος.

Η μονάδα ADC όπως και οι άλλες ηλεκτρονικές μονάδες μπορεί να παραμείνει αδρανής για ένα χρονικό διάστημα Δt , που απαιτείται για τη μετατροπή του αντίστοιχου αναλογικού παλμού σε ψηφιακό. Ο χρόνος αυτός που είναι γνωστός ως ανενεργός χρόνος (dead time) σε περίπτωση υψηλού ρυθμού γεγονότων μπορεί να μην είναι αμελητέος. Έτσι η επιλογή ενός ADC σε ένα συγκεκριμένο πείραμα πρέπει να βασίζεται και στον ανενεργό χρόνο που παρουσιάζει.

A.4.4 Αναλυτής Πολλαπλών Καναλιών

Ένας αναλυτής πολλών καναλιών ή μονάδα MCA (Multi Channel Analyzer) προκύπτει με τον συνδυασμό ενός ADC και μιας ηλεκτρονικής μνήμης. Το πλήθος των καναλιών που μπορεί να περιέχει μια παρόμοια διάταξη εξαρτάται από τον μέγιστο ακέραιο αριθμό που έχει τη δυνατότητα να σχηματίσει η μονάδα ADC. Για ADC με N θέσεις (λέξη με N ψηφία στο δυαδικό σύστημα) το πλήθος των διαύλων που μπορεί να εξυπηρετηθεί είναι 2N. Έτσι μονάδες MCA είναι δυνατόν να διαθέτουν 1024, 2048, 4096, 8192 κανάλια. Οι παλαιότερες μονάδες MCA διαθέτουν οθόνη καθοδικού παλμογράφου, όπου σε κάθε στιγμή εμφανίζεται το περιεχόμενο της μνήμης υπό μορφή ιστογράμματος με οριζόντιο άξονα αριθμό καναλιών και κατακόρυφο το πλήθος των γεγονότων ανά κανάλι.



Εικόνα 3: Αναπαράσταση των ηλεκτρονικών μονάδων του MOA (Ποτηριάδης, 2015)

A.5 Κάλιο (K)

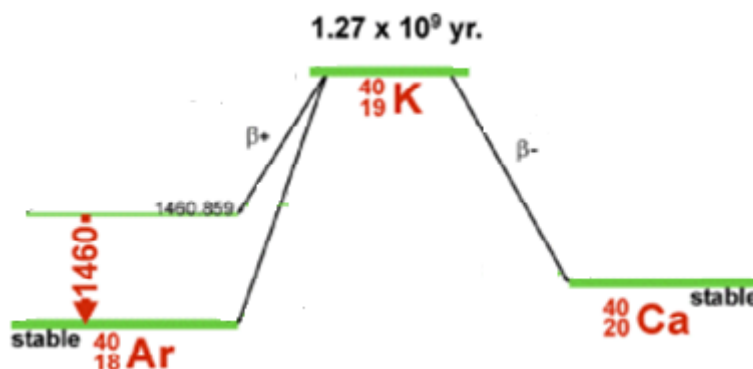
A.5.1 Το κάλιο και τα ισότοπα του στην φύση

Το κάλιο είναι ένα από τα οκτώ πιο άφθονα στοιχεία στον γήινο φλοιό. Ανήκει στην 1A ομάδα του περιοδικού πίνακα, τα αλκάλια, που έχουν ένα ηλεκτρόνιο στην εξωτερική τους στοιβάδα. Το κάλιο στην φύση είναι μίγμα τριών ισotόπων: ^{39}K , ^{40}K και ^{41}K με ισοτοπική αφθονία 93.08%, 0.0117% και 6.19% αντίστοιχα.

Το ^{40}K διασπάται με τρεις διαφορετικούς μηχανισμούς.

- 1) Διάσπαση β^- (εκπομπή ηλεκτρονίου): $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + \beta^- + \bar{\nu} + Q$
- 2) Διάσπαση β^+ (εκπομπή ποζιτρονίου): $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar} + \beta^+ + \nu + Q$
- 3) Διάσπαση με σύλληψη ηλεκτρονίου: $^{40}\text{K} + e^- \rightarrow ^{40}\text{Ar} + \nu + Q$

Το ^{40}K διασπάται σε ^{40}Ca με πιθανότητα 89.25% εκπέμποντας ακτινοβολία β^- μέγιστης κινητικής ενέργειας 1311.1 keV και ένα αντιστρίνιο ηλεκτρονίου. Ένα μικρό ποσοστό της τάξεως του 0.001% των πυρήνων ^{40}K διασπάται σε ^{40}Ar με διάσπαση β^+ εκπέμποντας ένα ποζιτρόνιο μέγιστης κινητικής ενέργειας 482.9 keV με συνέπεια να παράγονται κατά την αλληλεπίδρασή τους με την ύλη και φωτόνια ενέργειας 511 keV με πιθανότητα 0.002%. Τέλος, περίπου το 10.55% των πυρήνων ^{40}K διασπάται με σύλληψη ηλεκτρονίου σε ^{40}Ar , το οποίο είναι διεγερμένο στην 1^η διεγερμένη στάθμη του, την 2^+ . Κατά την αποδιέγερση του ^{40}Ar εκπέμπονται με χρόνο ημιζωής $\sim 1\text{ps}$ φωτόνια ενέργειας 1460.82 keV, που είναι αυτά που ανιχνεύονται με φασματοσκοπία $-\gamma$ για τον προσδιορισμό του ολόσωμου καλίου στον οργανισμό. Επομένως, η ραδιενεργή διάσπαση του ^{40}K είναι διακλαδιζόμενη (branched decay) και οδηγεί σε δύο διαφορετικά σταθερά θυγατρικά, το ^{40}K και το ^{40}Ar όπως φαίνεται στην εικόνα 4 (Ντάλλα E., 2014). Ποσοστό 0.2% των αποδιεγέρσεων αντιστοιχεί στην ακτινοβολία πέδησης των β^- μέγιστης και μέσης κινητικής ενέργειας 1311.1keV και 508keV αντίστοιχα.



Εικόνα 4: Διάσπαση του ^{40}K σε ασβέστιο, ^{40}Ca και αργό, ^{40}Ar

Το ^{40}K έχει ιδιαίτερα μεγάλο χρόνο ημιζωής (1.250×10^9 y) και παρουσιάζεται σε ανιχνεύσιμες ποσότητες στο περιβάλλον. Για αυτόν τον λόγο το ανθρώπινο σώμα είναι αναγκαίο να απομονώνεται από πηγές καλίου όπως το χώμα, το σκυρόδεμα και άλλα άτομα όταν πραγματοποιείται μέτρηση για τον προσδιορισμό της ολόσωμης ποσότητας καλίου σε αυτό.

Υπολογίστηκε ότι κάθε γραμμάριο φυσικού καλίου εκπέμπει κατά μέσο όρο 3.31 φωτόνια ανά δευτερόλεπτο ενέργειας 1460.8 keV λόγω αποδιέγερσης του ^{40}K (ICRP 23, 1975). Τα φωτόνια αυτά είναι που ανιχνεύονται από τον μετρητή ολόσωμης ακτινοβολίας ώστε να προσδιοριστεί η ολόσωμη ποσότητα καλίου στον εξεταζόμενο. Το ^{40}K έχει μεγάλο χρόνο ημιζωής (1.277×10^9 γ) και υπάρχει σε ανιχνεύσιμες ποσότητες στο περιβάλλον. Για αυτόν τον λόγο κατά τις μετρήσεις ενεργότητας μέσα στο ανθρώπινο σώμα, είναι αναγκαίο να απομονώνεται από πηγές καλίου όπως το χώμα, το σκυρόδεμα και τα άλλα άτομα.

A.5.2 Το κάλιο στον ανθρώπινο οργανισμό

Το κάλιο είναι απαραίτητο χημικό στοιχείο για τη ζωή και παίζει πρωτεύοντα ρόλο σε μεταβολικές δραστηριότητες, όπως στη βιοκατάλυση, στη μυϊκή σύσπαση, στη μετάδοση νευρικών παλμών κ.α.

Το μεγαλύτερο ποσοστό του ολόσωμου καλίου βρίσκεται στα κύτταρα του μυϊκού ιστού, ενώ σχετικά μικρή ποσότητα περιέχεται στα οστά και στον λιπώδη ιστό (ICRP 23, 1975). Στον πίνακα 1 παρουσιάζεται η κατανομή στους ιστούς και τα όργανα των 140 g καλίου που περιέχονται στον «μέσο» ενήλικα άντρα μάζας 70 kg.

Όργανο ή ιστός	Μάζα (g)	Μάζα καλίου σε ιστό-όργανο(g)	Μάζα καλίου/μάζα ιστού-οργάνου	Ποσοστό K σε όργανο ή ιστό (%)
Όλο το σώμα	70000	140	0.002	100
Σύνολο μαλακού ιστού	60000	120	0.002	85.7
Λιπώδης ιστός	15000	4.8	0.00032	3.4
Αίμα (συνολικό)	5500	8.8	0.0016	6.3
πλάσμα	3100	0.5	0.00016	3.36
Ερυθρά αιμοσφαίρια	2400	8.3	0.0035	5.9
Κεντρικό νευρικό σύστημα	1430	4.2	0.0029	0.03
Γαστρεντερικό σύστημα	1200	1.5	0.00125	1.07
Καρδιά	330	0.72	0.0022	0.51
νεφρά	310	0.59	0.0019	0.42
ήπαρ	1800	4.5	0.0025	3.2
πνεύμονες	1000	1.9	0.0019	1.36
Σκελετικοί μύες	28000	84	0.003	60
Σκελετός	10000	15	0.0015	11
Δέρμα	2600	2.2	0.00085	1.6
Συνδετικός ιστός	3400	-	-	-

Πίνακας 1: Κατανομή του K στα όργανα και τους ιστούς μέσου ενήλικα άντρα (ICRP 23, 1975)

Στα κύτταρα το κάλιο απαντάται ως κατιόν, το 95% του οποίου βρίσκεται στον ενδοκυττάριο χώρο. Μέσα και έξω από το κύτταρο επικρατεί ανισορροπία μεταξύ φορτισμένων σωματιδίων (κυρίως K^+ , Na^+ και Cl^-) που οδηγεί σε δημιουργία αρνητικής φόρτισης στο εσωτερικό του κυττάρου σε αντίθεση με το εξωτερικό του. Έτσι το K^+ και άλλα κατιόντα ωθούνται μέσα στο κύτταρο (R.W.Leggett, 1983). Ως εκ τούτου, οι απόλυτες ποσότητες του καλίου και του νατρίου σχετίζονται με τον όγκο του ενδοκυττάριου και εξωκυττάριου χώρου αντίστοιχα.

Το κάλιο διατηρείται μέσα στο κύτταρο από μια διαδικασία ενεργής μεταφοράς κατά την οποία το νάτριο μεταφέρεται προς τα έξω και το κάλιο προς τα μέσα. Η σωστή εκτίμηση της φυσιολογίας του καλίου στον οργανισμό είναι απαραίτητο να περιλαμβάνει και την εκτίμηση του μηχανισμού αυτού.

Υπάρχουν δύο διακριτές περιπτώσεις έλλειψης καλίου που οδηγούν σε μειωμένη συγκέντρωση του στον ενδοκυττάριο χώρο. Η πρώτη αφορά την δημιουργία αρνητικής ισορροπίας στο κύτταρο που προκαλείται από σοβαρή διάρροια, ενώ η δεύτερη οφείλεται σε αλλοιωμένη διαπερατότητα της κυτταρικής μεμβράνης ή διαταραγμένη λειτουργία του μηχανισμού εναλλαγής νατρίου-καλίου που έχει ως αποτέλεσμα την ανικανότητα του κυττάρου να διατηρήσει το κάλιο στο εσωτερικό του. Τέλος, η μείωση της μυϊκής μάζας του σώματος (lean body mass, LBM) μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του καλίου χωρίς απαραίτητα να μειωθεί η συγκέντρωση του στον ενδοκυττάριο χώρο (Patrick J., 1997).

Η κατανόηση του μηχανισμού που προκαλεί σαρκοπενία, δηλαδή μείωση της μυϊκής μάζας με την ηλικία, μπορεί να βοηθήσει στην εύρεση τρόπων διατήρησης του μυϊκού ιστού και της λειτουργικής του ικανότητας ώστε να παραμείνει καλή η ποιότητα ζωής των ηλικιωμένων. Η μείωση του καλίου με την αύξηση της ηλικίας οφείλεται στην μείωση της κυτταρικής μάζας εξαιτίας ανεπαρκούς αντικατάστασης των κυττάρων ή εξαιτίας αλλαγής της ενδοκυτταρικής συγκέντρωσης του, που σημαίνει αλλαγή στην λειτουργία της κυτταρικής μεμβράνης.

Εκτός από την ηλικία τα επίπεδα ^{40}K εξαρτώνται από το φύλο (η συγκέντρωση καλίου είναι μεγαλύτερη στο σώμα των αντρών από ότι των γυναικών) και την μάζα σώματος, ενώ άλλοι παράγοντες που οδηγούν σε μείωση της ολόσωμης ποσότητας καλίου είναι συγκεκριμένες δίαιτες, ο υποσιτισμός, κάποιες ασθένειες όπως χρόνια νεφρική ανεπάρκεια, η κίρρωση ήπατος, ιατρικές επεμβάσεις, η ακτινοθεραπεία και η χημειοθεραπεία σε ορισμένες μορφές καρκίνου (Keyahias et al, 1997).

Στα υγιή άτομα τα νεφρά βοηθούν στην διατήρηση της ισορροπίας του καλίου στο σώμα με την απελευθέρωση στα ούρα του μεγαλύτερου πλεονάζοντος ποσοστού του. Μικρή ποσότητα καλίου αποβάλλεται μέσω των κοπράνων και του ιδρώτα.

Ο βιολογικός χρόνος ημιζωής του K δίνεται από την σχέση:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\frac{n}{A}} = \frac{A \cdot \ln 2}{n} \text{ days}$$

όπου A (g) είναι η ολόσωμη ποσότητα K και n (g) η ημερήσια πρόσληψη καλίου (R.W.Leggett, 1983). Για παράδειγμα, για έναν ενήλικα άνδρα που έχει 140 g K στο σώμα του και δέχεται 3.33g K/d, ο βιολογικός χρόνος ημιζωής είναι περίπου 30 d (ICRP 23, 1975).

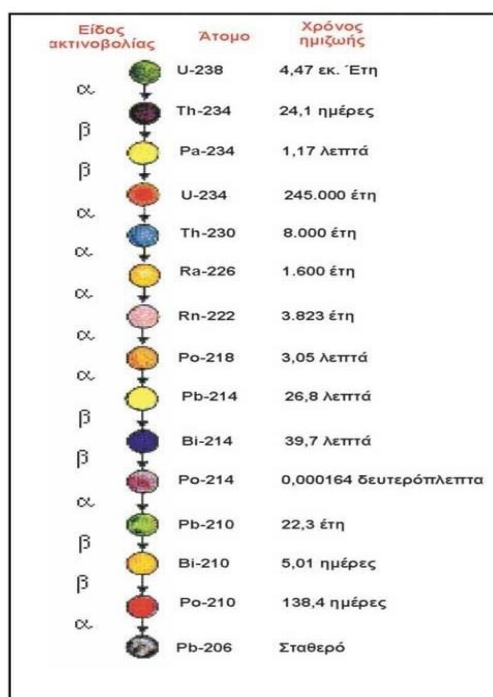
A.6 Ραδόνιο (Rn)

Το ραδόνιο είναι μια σημαντική πηγή έκθεσης του κοινού σε ακτινοβολία και σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να είναι και η κύρια πηγή έκθεσης κατά την ώρες εργασίας.

A.6.1 Ραδόνιο στην φύση

Το ραδόνιο είναι ένα αδρανές αέριο, συναντάται όμως και διαλυμένο συνήθως στο νερό. Τα τρία ισότοπα του ραδονίου είναι το ^{222}Rn , το ^{220}Rn και το ^{219}Rn και αποτελούν προϊόντα διάσπασης του ραδίου, ^{226}Ra , του ^{224}Ra και του ^{223}Ra αντίστοιχα, που προέρχονται από τις

ραδιενεργές σειρές διάσπασης του ουρανίου (^{238}U), του θορίου (^{232}Th) και του (^{235}U) αντίστοιχα. Η ραδιενεργή σειρά διάσπασης του ^{238}U δίνεται στην εικόνα 5.



Εικόνα 5: Σειρά αποδιέγερσης U-238

Το ουράνιο βρίσκεται στο χώμα και στα πετρώματα παρέχοντας μια συνεχή πηγή έκλυσης ραδονίου. Το ραδόνιο δραπετεύει από τον φλοιό της γης με μοριακή διάχυση ή διάδοση και ως συνέπεια παρουσιάζεται στον ατμοσφαιρικό αέρα αλλά και στο εσωτερικό των κτιρίων. Το ^{220}Rn και το ^{222}Rn είναι οι κύριες πηγές έκθεσης σε ιοντίζουσα ακτινοβολία που οφείλεται στο φυσικό περιβάλλον. Το ^{220}Rn έχει μικρό χρόνο ημιζωής (56s) επομένως είναι λιγότερο ικανό να διαφύγει από το σημείο του εδάφους στο οποίο δημιουργείται. Αντίθετα, το ραδόνιο ^{222}Rn έχει χρόνο ημιζωής 3.8 μέρες και μπορεί να διαχυθεί στο χώμα σε απόσταση μεγαλύτερη από ένα μέτρο από το σημείο που δημιουργείται. Ως αποτέλεσμα τα κτίρια που βρίσκονται κάτω ή στην επιφάνεια του εδάφους εμφανίζουν μεγαλύτερη συγκέντρωση ραδονίου στο εσωτερικό τους.

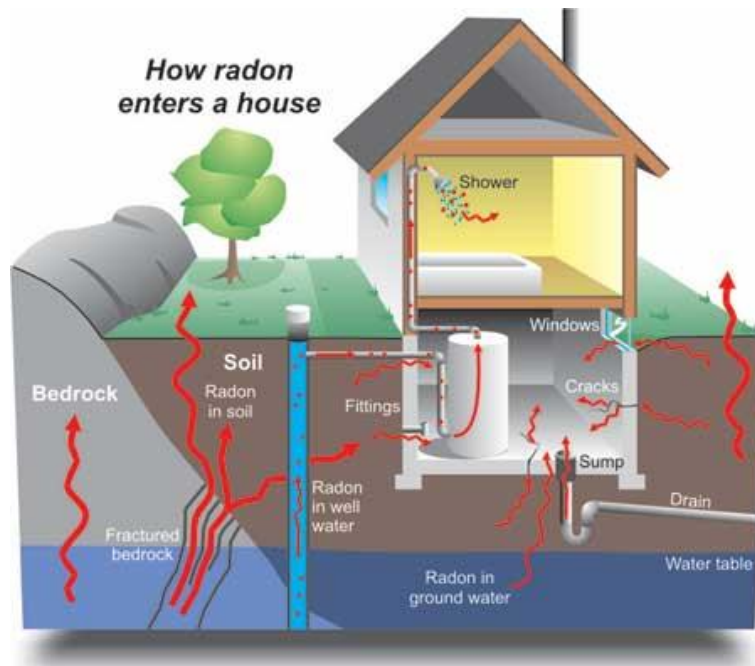
Η συγκέντρωση του ραδονίου στην ατμόσφαιρα έχει βρεθεί ότι είναι υψηλότερη κατά τους χειμερινούς μήνες σε σύγκριση με τους καλοκαιρινούς και κατά τις βραδινές και πρώτες πρωινές ώρες όσον αφορά τα διαστήματα της ημέρας (Momcilovic et al, 2007).

A.6.2 Ραδόνιο σε εσωτερικούς χώρους

Το ραδόνιο που εκλύεται από το έδαφος έχει πολλές οδούς εισόδου σε ένα κτίριο:

- τις μικρορωγμές που υπάρχουν στο τσιμεντένιο δάπεδο
- τα κενά ή ρωγμές που υπάρχουν στους τοίχους
- τα κενά στα σημεία σύνδεσης τοίχου δαπέδου
- τα διάκενα στα ξύλινα πατώματα
- τα κενά στα σημεία εισόδου των σωλήνων ύδρευσης και αποχέτευσης
- τα διάκενα στις πόρτες και τα παράθυρα
- την παροχή νερού

(www.eeae.gr)



Εικόνα 6: Τρόποι εισόδου ραδονίου στο εσωτερικό του σπιτιού (www.eeae.gr)

Η συγκέντρωση του ραδονίου και των θυγατρικών του σε κλειστούς χώρους αυξάνει την έκθεση του κοινού σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Το γεγονός αυτό είναι εντονότερο στα ορυχεία, τα σπήλαια και τις ιαματικές πηγές/λουτρά, όπου το νερό εμφανίζει μεγάλη συγκέντρωση ραδονίου.

Η συγκέντρωση του ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί είναι:

- Η γεωλογία της περιοχής και κατά επέκταση ο ρυθμός εκροής ραδονίου από το έδαφος
- Οι καιρικές συνθήκες
- Το είδος θεμελίωσης του κτιρίου πάνω στο έδαφος
- Το ύψος της κατοικίας ή του χώρου εργασίας
- Η εκροή του ραδονίου από τα οικοδομικά υλικά και μάλιστα από τις εσωτερικές επιφάνειες
- Ο εξαερισμός του κτιρίου, η ύπαρξη ή μη κλιματιστικών μηχανημάτων και αφυγραντήρων
- Η διαφορά πίεσης ανάμεσα στον εσωτερικό και εξωτερικό χώρο
- Οι συνήθειες των ατόμων (π.χ. κάπνισμα)

(www.eeae.gr)

A.6.3 Ραδόνιο στον ανθρώπινο οργανισμό

Το ραδόνιο αποτελεί αιτία πρόκλησης καρκίνου του πνεύμονα στον άνθρωπο. Το ραδόνιο διασπάται σε στερεά βραχύβια ραδιονουκλίδια τα οποία αντιδρούν με τα υπόλοιπα αέρια και τους υδρατμούς που υπάρχουν στον χώρο δημιουργώντας συμπλέγματα και σχηματίζοντας σωματίδια μεγέθους περίπου 1nm. Στην συνέχεια τα σωματίδια αυτά δεσμεύονται από τα σωματίδια της ατμόσφαιρας δημιουργώντας δεσμευμένα θυγατρικά του ραδονίου.

Ως συνέπεια η εισπνοή αυτών των βραχύβιων θυγατρικών από τον άνθρωπο οδηγεί σε εναπόθεση τους στην αναπνευστική οδό. Εξαιτίας του μικρού χρόνου ημιζωής τους

(<30min) οι περισσότερες αποδιεγέρσεις τους λαμβάνουν χώρα στους πνεύμονες συνεισφέροντας σημαντικά στην ενεργό δόση του οργάνου. (ICRP 115)

Ακόμη τα βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου που υπάρχουν στον περιβάλλοντα αέρα εναποτίθενται και στις επιφάνειες, όπως στο ανθρώπινο δέρμα. Τα σωματίδια α που εκπέμπονται επιδρούν στα εξωτερικά στρώματα του δέρματος σε επιφάνειες που εκτίθενται στην ατμόσφαιρα όπως ο λαιμός και το πρόσωπο. Το ποσοστό των θυγατρικών που εναποτίθεται στο δέρμα για συγκεκριμένη συγκέντρωση ραδονίου στον αέρα εξαρτάται από την ταχύτητα εναπόθεσης, που επηρεάζεται από το μέγεθος των σωματιδίων και την κίνηση του αέρα. Το μέγεθος των σωματιδίων έχει αποδειχθεί ότι αυξάνεται σε περιβάλλον αυξημένης υγρασίας.

Η ποσοτικοποίηση του ραδονίου σε in vivo μετρήσεις γίνεται μέσω της μέτρησης του ^{214}Bi το οποίο είναι ένα από τα θυγατρικά του ραδονίου με χρόνο ημιζωής 19.9min. Αποδιεγείρεται εκπέμποντας ακτινοβολία γ στα 609.3keV με πιθανότητα 46.3% και στα 1764keV με πιθανότητα 15.8%.

A.7 Ραδιοϊσότοπα στην Πυρηνική Ιατρική

Εκτός από τα φυσικά ραδιονουκλίδια που βρίσκονται στον ανθρώπινο οργανισμό (^{40}K , ^{214}Bi κ.α.) οι εργαζόμενοι σε τμήματα πυρηνικής ιατρικής είναι πιθανό να εκτεθούν και σε άλλα ραδιοϊσότοπα όπως το ^{131}I και το $^{99\text{m}}\text{Tc}$ τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στα τμήματα αυτά σε διαγνωστικές και θεραπευτικές εφαρμογές.

Το ιώδιο είναι βασικό συστατικό των ορμονών του θυρεοειδή, της θυροξίνης (T_4) και της τριιωδοθυρονίνης (T_3), που ρυθμίζουν τις μεταβολικές διαδικασίες της ανάπτυξης. Έτσι το ισότοπο ^{131}I που είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο ραδιονουκλίδιο στην διάγνωση και θεραπεία των παθήσεων του θυρεοειδή αδένος, κατά την είσοδο του στον οργανισμό εγκαθίσταται κατά κύριο λόγο στον αδένα αυτό αλλά και στους σιελογόνους αδένες, το στομάχι και την κύστη. Ο φυσικός χρόνος ημιζωής του είναι 8.02 μέρες και εκπέμπει γ -ακτινοβολία ενέργειας 364.5keV με πιθανότητα 81.2% (IAEA, 2014).

Το τεχνητό από την άλλη πλευρά είναι ένα τεχνητό στοιχείο που δημιουργείται από τον βομβαρδισμό του μολυβδενίου με νετρόνια. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται 21 ισότοπα του τεχνητίου που είναι όλα ραδιενεργά. Το $^{99\text{m}}\text{Tc}$ είναι το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο ισότοπο στις διαγνωστικές εφαρμογές της πυρηνικής ιατρικής καθώς με αυτό είναι δυνατό να γίνει επισήμανση πολλών ουσιών για την σύνθεση διαφορετικών ραδιοφαρμάκων που απορροφώνται από διαφορετικά τμήματα του οργανισμού. Το τεχνητό είναι εκπομπός ακτινών γ ενέργειας 140keV και ο φυσικός χρόνος ημιζωής του είναι 6.02 ώρες.

Κάθε δραστηριότητα που πραγματοποιείται στα τμήματα Πυρηνικής Ιατρικής είναι πιθανό να συνεισφέρει στην έκθεση των εργαζομένων. Ιδιαίτερα όταν οι δραστηριότητες αυτές σχετίζονται με την διαχείριση μη θωρακισμένων πηγών κατά την οποία ο εργαζόμενος ενδέχεται να εκτεθεί είτε σε εξωτερική είτε σε εσωτερική ακτινοβολή, με την είσοδο ραδιενεργών ουσιών στο σώμα του. Οι δραστηριότητες που καλείται να φέρει εις πέρας το προσωπικό του εργαστηρίου (ιατροί, τεχνολόγοι, ακτινοφυσικοί, νοσηλεύτες) της πυρηνικής ιατρικής είναι το άνοιγμα των συσκευασιών των ραδιενεργών υλικών, η αποθήκευση των πηγών, η ετοιμασία των ραδιοφαρμάκων, η εξέταση και διαχείριση των ασθενών και η διαχείριση των ραδιενεργών αποβλήτων.

Η πρόσληψη ραδιενεργών ουσιών μπορεί να συμβεί με διαφορετικούς τρόπους. Όσον αφορά τους επαγγελματικά εκτιθέμενους η κύρια οδός πρόσληψης είναι μέσω της εισπνοής καθώς κάποιες ραδιενεργές ουσίες είναι πτητικές όπως για παράδειγμα το ^{131}I .

Επίσης σπανιότερα ενδέχεται η πρόσληψη να συμβεί μέσω έγχυσης στο δέρμα ή μέσω τραυμάτων και ανοιχτών πληγών σε αυτό, γεγονός που δύναται να οδηγήσει σε εξαιρετικά υψηλή τοπική ισοδύναμη δόση. Άλλες δίοδοι έκθεσης είναι πιθανό να προκύψουν λόγω ατυχήματος στον εργασιακό χώρο κατά την διαχείριση των ραδιενεργών υλικών και για αυτόν τον λόγο δεν μπορούν να προβλεφθούν εκ των προτέρων. Επομένως οι εργαζόμενοι χρειάζεται να ελέγχονται για πιθανές εξωτερικές ή εσωτερικές μολύνσεις που είναι πιθανό να επιφέρει η ενασχόληση τους με ραδιενεργά ισότοπα (Lecture Notes, IAEA 2014).

A.8 Αντικείμενο της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν ο προσδιορισμός της ολόσωμης ποσότητας καλίου στο σώμα ενήλικων εξεταζόμενων καθώς και ο προσδιορισμός της ολόσωμης ποσότητας βισμούθιου, ώστε να συσχετιστεί με τα επίπεδα ραδονίου του χώρου στον οποίο βρίσκονταν οι εξεταζόμενοι πριν την μέτρηση. Ακόμη διενεργήθηκαν μετρήσεις σε εργαζομένους του τμήματος Πυρηνικής Ιατρικής του Πανεπιστημιακού Γενικού Νοσοκομείου Ιωαννίνων (ΠΓΝΙ) για την μελέτη τυχόν επαγγελματικών εκθέσεων τους από τα ραδιενεργά υλικά που διαχειρίζονται, όπως το ^{99m}Tc και το ^{131}I .

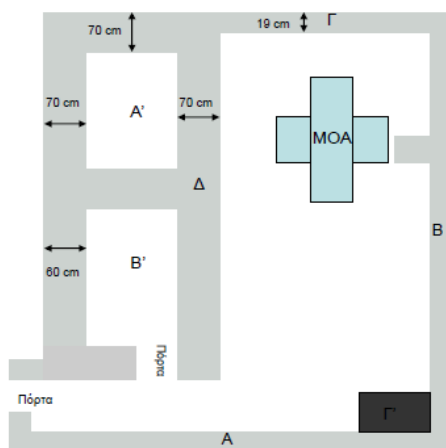
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Β. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Β.1 Μετρητικό σύστημα

Ο μετρητής ολόσωμης ακτινοβολίας του εργαστηρίου Ιατρικής Φυσικής-Ακτινοφυσικής της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων είναι εγκατεστημένος στο ισόγειο του κτιρίου (δεν υπάρχει υπόγειο) σε υψόμετρο 510m από την επιφάνεια της θάλασσας σε μικρή απόσταση από το κέντρο της πόλης των Ιωαννίνων (10-15min με μεταφορικό μέσο) (Kalef-Ezra et al, 2014 και Βαλάκης 2006).

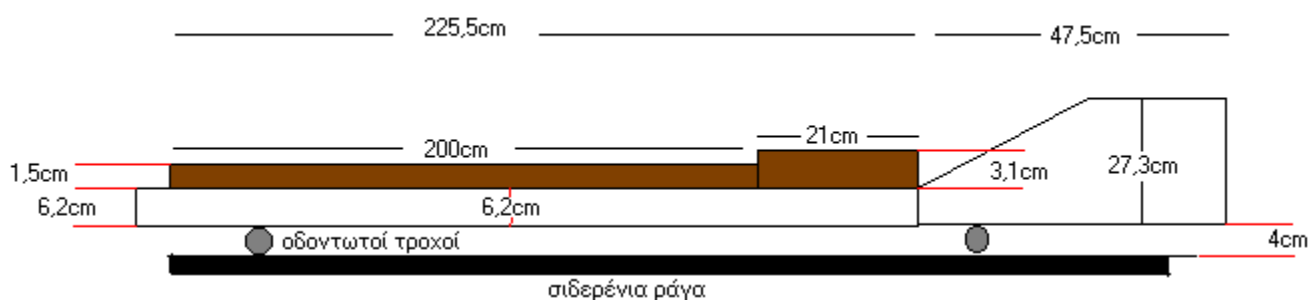
Οι διαστάσεις της αίθουσας είναι 3.9m x 10.7m και διαθέτει προθάλαμο 2.1m x 4.5m. Η αίθουσα χωρίζεται από τον πρώτο όροφο με πλάκα από σκυρόδεμα πάχους 30cm σε ύψος 7m από το δάπεδο. Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται η διάταξη της αίθουσας.



Εικόνα 7: Θέση τοποθέτησης του MOA στην αίθουσα του εργαστηρίου (Βαλάκης, 2006)

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 60cm σκυροδέματος. Στον χώρο Β' αποθηκεύονται εκτός των άλλων, μια πηγή βαθμονόμησης ^{137}Cs (661.7 keV) και ποσότητα KCl, που χρησιμοποιούνται καθημερινά για την βαθμονόμηση του μετρητικού συστήματος.

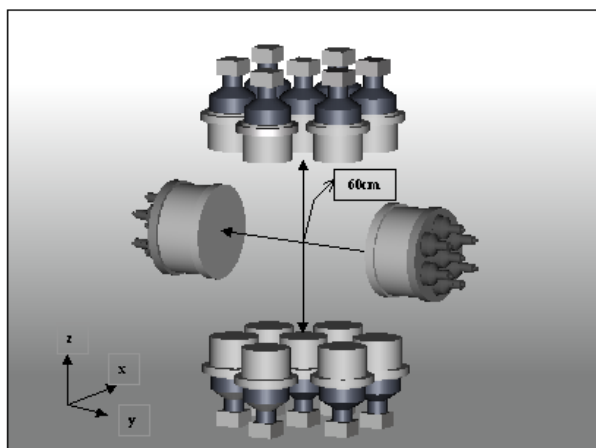
Το μετρητικό σύστημα είναι τύπου εγγύς θωρακίσεως με σάρωση κλίνης. Το σύστημα αποτελείται από μια σήραγγα μήκους 201.3 cm, πλάτους 60cm και ύψους 48.4 cm. Η σήραγγα είναι κατασκευασμένη από μολύβδινα τούβλα πάχους 10cm. Ο εξεταζόμενος τοποθετείται σε ύπτια θέση πάνω σε μια μεταλλική κλίνη η οποία διέρχεται με σταθερή ταχύτητα διαμέσου της σήραγγας κατά την διάρκεια της μέτρησης. (Kalef-Ezra et al, 2014). Η κλίνη έχει μήκος 273 cm και χωρίζεται σε δύο τμήματα. Στο πρώτο τμήμα της, μήκους 47.5cm και ύψους 27.3cm 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 220V (AC) με συχνότητα 50Hz. Το δεύτερο τμήμα έχει μήκος 225.5cm, πλάτος 57.2 cm και πάχος 6.2 cm και αποτελεί την περιοχή τοποθέτησης του εξεταζόμενου πάνω σε ειδικά σχεδιασμένο στρώμα (Σουψάνας, 2004).



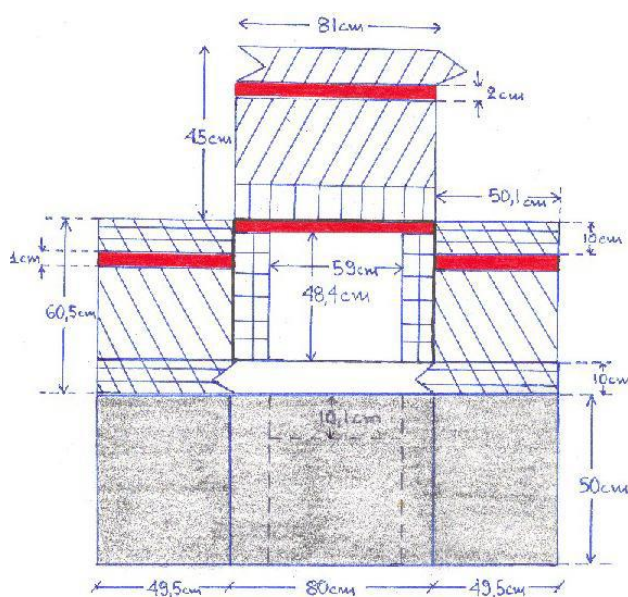
Εικόνα 8: Σχέδιο (Σουψανάς, 2004) και φωτογραφία της εξεταστικής κλίνης 2016

Ο χρόνος σάρωσης για μια μέτρηση είτε του εξεταζόμενου είτε του υποστρώματος είναι ~ 35 min και αποτελείται από τρεις ορθές και τρεις ανάστροφες κινήσεις της εξεταστικής κλίνης. Η επαναληψιμότητα ως προς τον χρόνο σάρωσης στην διάρκεια της ημέρας κυμαίνεται από 0.28% έως 0.43% έχει βρεθεί όμως ότι αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της μάζας του εξεταζόμενου. Το εύρημα αυτό μπορεί να αποδοθεί στην επιβάρυνση της λειτουργίας του κινητήρα όταν αυξάνεται η μάζα (Βαλάκης, 2006).

Το ανιχνευτικό σύστημα αποτελείται από δεκαέξι (16) ανιχνευτές NaI(Tl) κατασκευής της εταιρίας Harshaw (Solon, Ohio) σε καθορισμένες θέσεις στο κέντρο της σήραγγας. Δεκατέσσερις (14) από αυτούς είναι ονομαστικών διαστάσεων $15.7\text{cm} \times 5.0\text{cm}$ (τύπου A1) και είναι τοποθετημένοι σε ομάδες των επτά πάνω και κάτω από την εξεταστική κλίνη σε απόσταση 58.5cm μεταξύ τους. Οι άλλοι δύο έχουν διαστάσεις $29.2\text{cm} \times 10.2\text{cm}$ (τύπου A2) και είναι τοποθετημένοι δεξιά και αριστερά του άξονα κίνησης της εξεταστικής κλίνης σε απόσταση 58.9cm μεταξύ τους. Οι ανιχνευτές περιβάλλονται από τούβλα μολύβδου χαμηλής ραδιενέργειας. Ο μολύβδος από τον οποίο είναι κατασκευασμένα τα τούβλα προέρχεται από καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος που χρησιμοποιούνταν πριν τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο ώστε να είναι υψηλής καθαρότητας (Kalef-Ezra et al, 2014). Στόχος της θωράκισης είναι η μείωση της επίδρασης της ακτινοβολίας υποστρώματος που προέρχεται από τη φυσική ραδιενέργεια των οικοδομικών υλικών, των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένος ο ΜΟΑ, του εδάφους και από την κοσμική ακτινοβολία.



Εικόνα 9: Σχετική θέση ανιχνευτών MOA (Τζίμα, 2003) και φωτογραφία των ανιχνευτών 2016



Εικόνα 10: Πρόσοψη του MOA (Σουψανάς, 2004)

B.2 Ενεργειακή βαθμονόμηση μετρητικού συστήματος

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 MCA. 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 αντιστοίχιση των καναλιών με τιμές ενέργειας εκφράζεται μαθηματικά συνήθως με μια γραμμική σχέση της μορφής:

$$\text{Energy} = a + b * \text{channel} \quad (\text{B.1})$$

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 200-2000keV 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. Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται με πηγή ^{137}Cs που εκπέμπει στα 662keV και με διάλυμα KCl που περιέχει το ισότοπο ^{40}K που εκπέμπει κυρίως στα 1460keV. Οι μονάδες ενίσχυσης σήματος (coarse gain, fine gain) ρυθμίζονται έτσι ώστε η κορυφή των 1460 keV του ^{40}K να βρίσκεται στο κανάλι 200 ± 1 και η κορυφή των 662keV του ^{137}Cs περίπου στο κανάλι 93 ± 1 (Βαλάκης, 2010).

B.3 Περιγραφή ομοιωμάτων

Για την δημιουργία ανθρωπόμορφων ομοιωμάτων χρησιμοποιήθηκαν ομοιώματα αποτελούμενα από ορθογώνια παραλληλεπίπεδα μπουκάλια, από μεγάλης πυκνότητας πολυαιθυλένιο. Τα μπουκάλια είναι δύο κατηγοριών, (M) και (μ), ως προς τη μάζα και το μέγεθος τους με ονομαστική τιμή μάζας 2293g και 1128g αντίστοιχα. Τα ομοιώματα που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνται από δοχεία που περιείχαν απιονισμένο νερό και διάλυμα ^{40}K . Η τοποθέτηση τους στην κλίνη είναι ανάλογη του ύψους και της μάζας της προσομοίωσης που πρέπει να επιτευχθεί. Για τον μέσο άντρα το ομοίωμα είναι 73 kg μάζα και 177 cm ύψος. Τα δοχεία του απιονισμένου νερού χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό υποστρώματος πριν ή μετά την κύρια μέτρηση. Αυτό γίνεται ώστε οι ανιχνευτές να θωρακίζονται με τον ίδιο τρόπο από τα ομοιώματα και οι συνθήκες μέτρησης να είναι συγκρίσιμες.



Εικόνα 11: Ομοίωμα μέσου ενήλικα άντρα

B.4 Εξαερισμός και θέρμανση αίθουσας

Στην αίθουσα του MOA βρίσκονται τοποθετημένοι δύο ανεμιστήρες Vortice Vario 300/12'' εξωτερικών διαστάσεων 39.0 cm x 39.9 cm x 18.0 cm με συχνότητα περιστροφής ~20 Hz σύμφωνα με τον κατασκευαστή τους. Όταν λειτουργούν σε πλήρη ισχύ (75W) εισάγουν 920m³/h αέρα ή εξαγάγουν 1650m³/h αέρα. Οι δύο ανεμιστήρες βρίσκονται σε λειτουργία εξαναγκασμένης εισαγωγής αέρα από το περιβάλλον καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας ώστε να μειώνονται τα επίπεδα του ραδονίου και των θυγατρικών του στην αίθουσα. Η αίθουσα θερμαίνεται με ένα κλιματιστικό μηχάνημα (air-condition) και ένα ηλεκτρικό σώμα. Από τα τέλη Νοεμβρίου τέθηκε σε λειτουργία και η κεντρική θέρμανση του κτιρίου κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες.

B.5 In vivo μετρήσεις

Μετρήθηκαν στους εθελοντές που συμμετείχαν στην έρευνα τα ισότοπα του ^{40}K και του ^{214}Bi που είναι θυγατρικό του ραδονίου ^{222}Rn . Το ^{214}Bi επιδρά στο ενεργειακό παράθυρο του ^{40}K (1372-1548keV) για αυτό το λόγο έγινε διόρθωση για τον υπολογισμό της ενεργότητας του ^{40}K σύμφωνα με τον τύπο:

$$N_{K-40(\text{cor})} = N_{K-40} - aN_{\text{Bi}-214} \quad (\text{B.2})$$

Όπου $N_{K-40(\text{cor})}$ είναι οι διορθωμένοι παλμοί του ^{40}K . N_{K-40} είναι οι παλμοί του ^{40}K στο ενεργειακό παράθυρο κεντρικής ενέργειας 1460keV ενώ $N_{\text{Bi}-214}$ είναι οι παλμοί στο ενεργειακό παράθυρο του ^{214}Bi κεντρικής ενέργειας 1764keV. Ο παράγοντας a εκφράζει τον αριθμό των καταγεγραμμένων γεγονότων στο παράθυρο του ^{40}K ανά μονάδα γεγονότων που καταγράφονται στο παράθυρο του ^{214}Bi στην ενεργειακή περιοχή των 1.76MeV.

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας διενεργήθηκαν μετρήσεις σε εργαζόμενους του τμήματος Πυρηνικής Ιατρικής του Πανεπιστημιακού Γενικού Νοσοκομείου Ιωαννίνων (ΠΓΝΙ), ώστε να μελετηθούν και να ποσοτικοποιηθούν ενδεχόμενες εσωτερικές μολύνσεις εξαιτίας της ενασχόλησης τους με την παρασκευή, τη χορήγηση και τη διαχείριση των ραδιοφαρμάκων και των ραδιενεργών αποβλήτων. Σκοπός αυτών των μετρήσεων ήταν να μελετηθεί η αναγκαιότητα εφαρμογής ενός προγράμματος εσωτερικής δοσιμετρίας του προσωπικού του τμήματος παράλληλα με το πρόγραμμα εξωτερικής δοσιμετρίας που ήδη εφαρμόζεται.

B.6 Ελάχιστη ανιχνεύσιμη ενεργότητα

Η Ελάχιστη Ανιχνεύσιμη Ενεργότητα (Minimum Detectable Activity, MDA) είναι η ποσότητα ενός ραδιονουκλιδίου που θα ανιχνευτεί στο σώμα με πιθανότητα 95% έναντι 5% πιθανότητας να προκύψει ψευδώς θετικό ή ψευδώς αρνητικό σφάλμα (Curie, 1968). Υπολογίζεται από την σχέση:

$$MDA = 4,65 \cdot \sigma_{\beta} \cdot f$$

Όπου σ_{β} είναι η τυπική απόκλιση της μέτρησης του ομοιώματος υποστρώματος και f ο συντελεστής βαθμονόμησης του συστήματος για συγκεκριμένο ραδιονουκλίδιο.

Το ελάχιστο όριο ανίχνευσης μπορεί να βελτιωθεί αυξάνοντας την απόδοση ανίχνευσης, μειώνοντας το υπόστρωμα ή αυξάνοντας τον χρόνο συλλογής ή το μέγεθος του δείγματος.

B.7 Επίπεδα ραδονίου στα Ιωάννινα

Η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) με την διενέργεια δειγματοληπτικών μετρήσεων του ραδονίου σε σπίτια αρκετών νομών της Ελλάδας έχει δημιουργήσει έναν χάρτη απεικόνισης των επιπέδων ραδονίου στον ελλαδικό χώρο. Στον νομό Ιωαννίνων η μέση τιμή της συγκέντρωσης ραδονίου στον αέρα των κατοικιών ισούται με 124.9 Bq/m^3 , ενώ στον δήμο Ιωαννιτών ειδικότερα ισούται με 90.4 Bq/m^3 .

B.8 Dual energy X-ray absorptiometry (DXA)

Η απορροφησιομετρία διπλής ενεργειακής δέσμης (DXA) είναι μια τεχνική απεικόνισης χρήσιμη στην ποσοτικοποίηση της σύστασης του σώματος του εξεταζόμενου. Ο τρόπος προσδιορισμού της σύστασης στηρίζεται στο γεγονός ότι κάθε υλικό παρουσιάζει διαφορετική εξασθένηση σε διαφορετικές ενέργειες. Η αρχή λειτουργίας του επομένως βασίζεται σε δύο εικόνες που προκύπτουν από εξασθένηση δύο δεσμών ακτίνων -Χ, μιας χαμηλής ενέργειας και μιας υψηλής ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να ποσοτικοποιηθούν η οστική μάζα, η μη λιπώδης μάζα (Fat Free Mass-FFM) δηλαδή, η μυϊκή μάζα και ο λιπώδης ιστός στο σώμα του εξεταζόμενου (IAEA, 2014). Η μη λιπώδης μάζα συνδέεται με την ολόσωμη ποσότητα καλίου στο σώμα του εξεταζόμενου. Σε ορισμένους από τους εξετασθέντες διενεργήθηκε και εξέταση με DXA στο ΠΓΝΙ με μηχάνημα τύπου Discovery W, κατασκευής Hologic, για να συγκριθούν τα ευρήματα από το συγκεκριμένο μηχάνημα με τις μετρήσεις που διενεργήθηκαν στον ΜΟΑ.

Η συσχέτιση της ολόσωμης μάζας καλίου (TBK) με την μη λιπώδη μάζα (FFM) γίνεται μέσω εμπειρικών εξισώσεων που σχετίζουν το πηλίκο TBK/FFM με το φύλο και την ηλικία υγιών ενηλίκων (Kehayias et al, 1997).

- $\frac{TBK(g)}{FFM(kg)} = 2.615 - 0,00671 \cdot (\eta\lambda\iota\kappa\acute{\iota}\alpha) , R^2=0.957, n=92$ άντρες ηλικίας 20-89y
- $\frac{TBK(g)}{FFM(kg)} = 2,49875 - 0,00725 \cdot (\eta\lambda\iota\kappa\acute{\iota}\alpha) , R^2=0.842 , n=96$ γυναίκες ηλικίας 20-89y

B.9 Εργαλεία Στατιστικής Ανάλυσης

Για την διενέργεια των στατιστικών ελέγχων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα IBM SPSS

Τεστ κανονικότητας (Shapiro – Wilk test)

Το τεστ κανονικότητας Shapiro-Wilk χρησιμοποιείται ώστε να προσδιοριστεί αν ένα τυχαίο δείγμα δεδομένων ακολουθεί ή όχι κανονική κατανομή. Άλλα αντίστοιχα τεστ βασίζονται στο γεγονός ότι το δείγμα προέρχεται από κανονική κατανομή, δηλαδή έχει δεδομένη μέση τιμή και διακύμανση, για να παράγουν στατιστικά αποτελέσματα κάτι που δεν είναι απαραίτητο στο τεστ Shapiro-Wilk, για αυτό καθίσταται ως ένα ιδιαίτερα ισχυρό τεστ. Θεωρείται κατάλληλο για δείγματα 3 έως 5000 δεδομένων.

Αρχικά ορίζεται η μηδενική υπόθεση και στην συνέχεια ελέγχεται η αποδοχή ή απόρριψη όσον αφορά το συγκεκριμένο δείγμα. Στην προκειμένη περίπτωση η μηδενική υπόθεση αντιστοιχεί στην παραδοχή ότι το δείγμα ακολουθεί κανονική κατανομή. Η εναλλακτική υπόθεση είναι ότι το δείγμα δεν ακολουθεί κανονική κατανομή.

Το πρόγραμμα IBM SPSS που χρησιμοποιήθηκε υπολογίζει την τιμή P-value για κάθε δείγμα. Συγκρίνοντας αυτήν την τιμή με το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας προσδιορίζουμε αν το δείγμα ακολουθεί ή όχι κανονική κατανομή.

Θεωρήθηκε ότι αν:

P-value > 0.05 Η μηδενική υπόθεση δεν μπορεί να αγνοηθεί και το δείγμα ενδέχεται να ακολουθεί κανονική κατανομή

$P\text{-value} < 0.05$ Η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται και μπορούμε να θεωρήσουμε με βεβαιότητα της τάξης του 95% ότι τα δεδομένα δεν είναι κανονικά καταναμεμένα.

Paired sample t-test

Χρησιμοποιείται για να διαπιστωθεί αν η διαφορά των μέσων τιμών δύο δειγμάτων παρατηρήσεων είναι ίση με μηδέν. Τα δεδομένα αφορούν διπλές μετρήσεις στον ίδιο πληθυσμό.

Μηδενική υπόθεση: Η διαφορά των μέσων τιμών των δύο δειγμάτων είναι μηδενική ($X_1 - X_2 = 0$).

$P\text{-value} > 0.05$ Η μηδενική υπόθεση δεν μπορεί να απορριφθεί και επομένως οι διπλές μετρήσεις στον πληθυσμό ενδέχεται να μην διαφέρουν μεταξύ τους.

$P\text{-value} < 0.05$ Η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται και μπορούμε να θεωρήσουμε με βεβαιότητα της τάξης του 95% ότι τα ζεύγη των μετρήσεων διαφέρουν στατιστικά σημαντικά.

Independent sample t-test

Τα δεδομένα μπορεί να προέρχονται από διαφορετικούς πληθυσμούς οπότε διενεργείται το εν λόγω στατιστικό τεστ για να διαπιστωθεί αν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ τους.

Μηδενική υπόθεση: Οι δύο μέσες τιμές είναι ίσες ($X_1 = X_2$)

$P\text{-value} > 0.05$ Η μηδενική υπόθεση δεν μπορεί να απορριφθεί και τα δύο δείγματα ενδέχεται να μην διαφέρουν μεταξύ τους.

$P\text{-value} < 0.05$ Η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται και μπορούμε να θεωρήσουμε με βεβαιότητα της τάξης του 95% ότι οι δύο ομάδες δεδομένων διαφέρουν στατιστικά σημαντικά.

Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson

Ο συντελεστής του Pearson είναι συντελεστής γραμμικής συσχέτισης συμβολίζεται με r και παίρνει τιμές από -1 έως 1 ($-1 \leq r \leq 1$)

Μηδενική υπόθεση H_0 : Δεν υπάρχει συσχέτιση (ο συντελεστής συσχέτισης είναι μηδενικός).

Εναλλακτική υπόθεση H_1 : Υπάρχει συσχέτιση (ο συντελεστής συσχέτισης δεν είναι μηδενικός)

$P\text{-value} > 0.05$ δεν μπορεί να απορριφθεί η μηδενική υπόθεση H_0

$P\text{-value} < 0.05$ γίνεται δεκτή η εναλλακτική υπόθεση H_1

B.10 Στατιστικά Δεδομένα Εξεταζόμενων

Διενεργήθηκαν 63 μετρήσεις σε 21 ενήλικες εθελοντές κατοίκους του λεκανοπέδιου Ιωαννίνων (7 άντρες, 14 γυναίκες) στη διάρκεια ενός πεντάμηνου (11/10/2016 – 9/3/2017) κατά τις οποίες από τα νουκλίδια που εντοπίστηκαν, ποσοτικοποιήθηκε το ^{40}K και το ^{214}Bi . Επίσης μετρήθηκαν επτά εργαζόμενοι του τμήματος Πυρηνικής Ιατρικής του ΠΓΝΙ (5 άνδρες, 2 γυναίκες) για τη μελέτη τυχόν μολύνσεων τους με εκπομπούς ακτινοβολίας, ενέργειας τουλάχιστον 100 keV, όπως το $^{99\text{m}}\text{Tc}$ και ^{131}I . Σημειώνεται ότι στο εν λόγω Τμήμα έγιναν κατά το 2016, 3327 σπινθηρογραφικές πράξεις με $^{99\text{m}}\text{Tc}$ και 149

πράξεις με ^{131}I (οι τελευταίες ήταν πρακτικά ισομοιρασμένες με σπινθηρογραφικές απεικονίσεις και θεραπευτικές πράξεις).

Τα στατιστικά δεδομένα των εξετασθέντων παρουσιάζονται στους πίνακες 2,3,4 και 5.

Εθελοντής	Ηλικία (y)	Μάζα (kg)	Ύψος (m)	# Μετρήσεων
Ε.Μ (Γ)	61	110,0	1,60	1
Κ.Τ (Α)	65	96,5	1,65	12
Κ.Ε (Γ)	30	70,0	1,55	1
Τ.Ε (Α)	24	102,0	1,87	1
Σ.Χ. (Γ)	24	58,0	1,58	1
Ν.Κ. (Γ)	28	52,6	1,57	30
Π.Ε (Γ)	59	64,0	1,61	1
Β.Ι (Γ)	22	61,0	1,72	1
Ζ.Γ (Γ)	23	50,0	1,55	1
Κ.Ε (Γ)	34	57,0	1,56	1
Π.Β. (Γ)	71	78,0	1,53	1
Κ.Α. (Γ)	72	66,0	1,60	1
Μ.Β. (Γ)	22	60,0	1,72	1
Φ.Α. (Γ)	22	59,0	1,56	1
Μ.Δ. (Α)	26	69,0	1,70	1
Φ.Μ. (Γ)	48	82,0	1,60	1
Κ.Β. (Α)	51	76,0	1,76	1
Σ.Χ. (Γ)	45	69,5	1,63	2
Δ.Δ. (Α)	46	115,0	1,88	1
Π.Α. (Α)	46	86,0	1,78	2
Σ.Κ. (Α)	48	75,0	1,78	1

Πίνακας 2: Συγκεντρωτικά στατιστικά στοιχεία των εξεταζόμενων

Άντρες	Ηλικία (y)	Μάζα (kg)	Ύψος (m)
Μέση τιμή	43,7	88,5	1,77
Τυπική απόκλιση	14,4	18,3	0,09
Μέγιστη τιμή	65	115	1,88
Ελάχιστη τιμή	24	69	1,65

Πίνακας 3: Στατιστικά στοιχεία ανδρών (n=7)

Γυναίκες	Ηλικία (y)	Μάζα (kg)	Ύψος (m)
Μέση τιμή	40,1	66,9	1,60
Τυπική απόκλιση	19,0	15,3	0,06
Μέγιστη τιμή	72	110	1,72
Ελάχιστη τιμή	22	50	1,53

Πίνακας 4: Στατιστικά στοιχεία γυναικών (n=14)

Επαγγελματικά εκτιθέμενοι	Ηλικία (γ)	Μάζα (kg)	Ύψος (m)	Επάγγελμα
Κ.Τ. (Α)	65	96,5	1,65	Ακτινοφυσικός
Δ.Δ. (Α)	46	115,0	1,88	Ακτινοφυσικός
Π.Α. (Α)	46	86,0	1,78	Ακτινοφυσικός
Φ.Μ. (Γ)	48	82,0	1,60	Νοσηλεύτρια
Κ.Β. (Α)	51	76,0	1,76	Νοσηλεύτης
Σ.Χ. (Γ)	45	69,5	1,63	Πυρηνική Γιατρός
Σ.Κ. (Α)	48	75,0	1,78	Πυρηνικός Γιατρός

Πίνακας 5: Στατιστικά στοιχεία επαγγελματικά εκτιθέμενων εξεταζόμενων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Γ. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΑΝΑΛΥΣΗ

Οι *in vivo* μετρήσεις που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3 πραγματοποιήθηκαν με δώδεκα από τους δεκαέξι ανιχνευτές NaI(Tl) του ΜΟΑ σε λειτουργία. Και οι τέσσερις ανιχνευτές που βρίσκονταν εκτός λειτουργίας, ήταν τύπου Α1, δηλαδή ανιχνευτές με ονομαστικό ενεργό όγκο 15.7 x 5.0 cm. Από αυτούς οι ανιχνευτές 5 και 14 βρίσκονται στην οροφή του ΜΟΑ και οι 2 και 9 στην κάτω πλευρά της θωρακισμένης σήραγγας. Οι μετρήσεις διήρκησαν περίπου 35 min, εκτός αν αναφέρεται κάτι διαφορετικό, και έγιναν σε συνθήκες εξαναγκασμένης εισαγωγής αέρα στην αίθουσα του ΜΟΑ με δυο ανεμιστήρες και ενώ βρισκόταν σε λειτουργία το ένα από τα δύο κλιματιστικά μηχανήματα (air-condition), που διαθέτει η αίθουσα, η θερμοκρασία στην αίθουσα του ΜΟΑ κυμαίνονταν από 10°C έως 20°C.

Γ.1 In vivo μετρήσεις ^{40}K

Γ.1.1 In vivo μετρήσεις ^{40}K σε ενήλικη γυναίκα

Αρχικά μελετήθηκε η ειδική ενεργότητα του ^{40}K στο σώμα εθελόντριας γυναίκας Ν.Κ. ηλικίας 28 γ (μάζα σώματος: 52.6 kg και ύψος: 157 cm). Πραγματοποιήθηκαν συνολικά τριάντα μετρήσεις κατά το χρονικό διάστημα σχεδόν δυο μηνών (από 11/10/2016 έως 8/12/2016) ανά δέκα σε διαφορετικό χρόνο της ημέρας. Ως ομοίωμα υποστρώματος χρησιμοποιήθηκαν 14 μεγάλα δοχεία με απιονισμένο νερό όγκου 2000 ± 18 ml (Μ) το καθένα και 18 μικρά δοχεία των 1000 ± 9 ml (μ), συνολικής μάζας 50.6 kg και ύψους 142 cm.

Στον πίνακα 6 παρουσιάζονται τα δεδομένα των τριάντα μετρήσεων του ολόσωμου καλίου της εξεταζόμενης. Οι πρώτες δύο στήλες αφορούν τον αριθμό των cps που καταγράφηκαν κατά την κύρια μέτρηση στις περιοχές ενδιαφέροντος του ^{40}K και του ^{214}Bi , ενώ οι δύο επόμενες στήλες αφορούν τις αντίστοιχες τιμές από την μέτρηση του ομοιώματος υποστρώματος. Στην πέμπτη στήλη του πίνακα παρουσιάζεται ο καθαρός ρυθμός παλμών ^{40}K που προέκυψε από την αφαίρεση του ρυθμού κρούσεων υποστρώματος από τον κύριο ρυθμό κρούσεων, $N_{40\text{K}}$, ενώ στην επόμενη στήλη παρουσιάζεται ο διορθωμένος ρυθμός παλμών του ^{40}K ως προς το ^{214}Bi , $N_{40\text{K}}(\text{cor})$ που υπολογίστηκε με χρήση της σχέσης:

$$N_{40\text{K}}(\text{cor}) = N_{40\text{K}} - 1,046 \times N_{214\text{Bi}} \quad (\text{Γ.1})$$

Η τυπική απόκλιση υπολογίζεται από τον τύπο

$$sd = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2}$$

Βρέθηκε ότι οι συντελεστές μεταβλητότητας του $N_{40\text{K}}$ και του $N_{40\text{K}}(\text{cor})$ των μετρήσεων που έγιναν σε διάστημα δυο μηνών, είναι ίσοι με 9.3% και 8.5%, αντίστοιχα, τιμές περίπου διπλάσιες από ότι αναμενόταν θεωρητικά δεδομένου ότι το σφάλμα της τυπικής απόκλισης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$sd_{\theta} = \frac{sd}{\sqrt{2 \cdot (N-1)}}$$

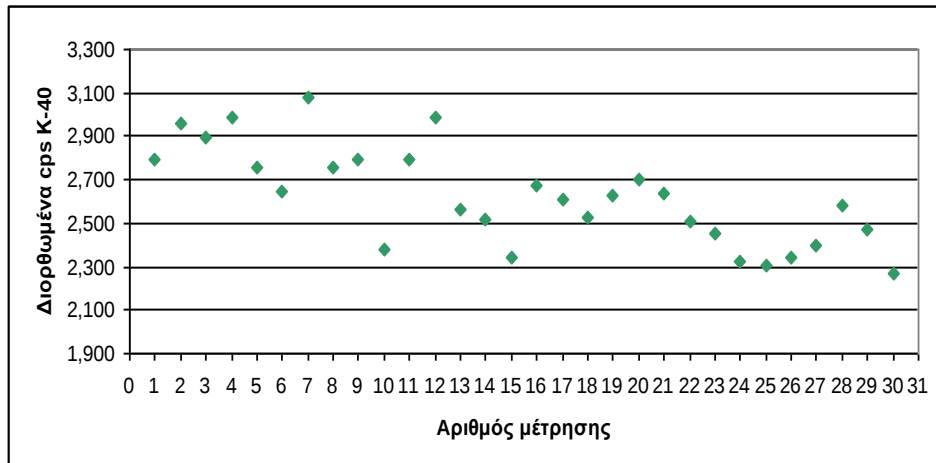
Επομένως οι συντελεστές επαναληπτικότητας είναι $9.3 \pm 1.2\%$ και $8.5 \pm 1.1\%$. Διενεργώντας paired t-test βρέθηκε τιμή $p\text{-value}=0,000$ γεγονός που δείχνει ότι η διόρθωση για το ^{214}Bi οδηγεί σε στατιστικά σημαντική διαφορά ανάμεσα στις δύο ομάδες μετρήσεων, χωρίς διόρθωση και με διόρθωση για το ^{214}Bi .

a/a	Gross Main ^{40}K / Live Time	Gross Main ^{214}Bi / Live Time	Gross Bg ^{40}K / Live Time	Gross Bg ^{214}Bi / Live Time	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ^{40}K	Διορθωμένος καθαρός ρυθμός κρούσεων ^{40}K	<Live Time> (s)
1	14,510	2,520	11,339	2,160	3,171	2,795	1734
2	14,129	2,165	11,110	2,109	3,018	2,960	1702
3	14,133	2,234	11,073	2,072	3,061	2,892	1717
4	14,128	2,211	11,010	2,081	3,118	2,982	1720
5	13,941	2,138	11,071	2,032	2,870	2,759	1717
6	13,694	2,105	10,976	2,033	2,718	2,643	1701
7	14,579	2,594	11,132	2,237	3,447	3,074	1644
8	14,215	2,419	11,161	2,137	3,054	2,759	1750
9	13,934	2,175	10,994	2,034	2,940	2,792	1743
10	14,084	2,650	11,312	2,275	2,772	2,380	1669
11	13,949	2,365	10,821	2,044	3,129	2,793	1705
12	13,941	2,184	10,866	2,095	3,075	2,983	1729
13	13,740	2,343	10,954	2,127	2,786	2,560	1705
14	13,302	2,166	10,594	1,979	2,708	2,513	1587
15	13,137	2,059	10,662	1,936	2,475	2,346	1605
16	13,650	2,231	10,696	1,964	2,954	2,675	1748
17	13,715	2,472	10,800	2,184	2,914	2,613	1619
18	13,438	2,215	10,783	2,095	2,655	2,530	1723
19	13,402	2,151	10,617	2,004	2,785	2,631	1750
20	14,057	2,438	11,148	2,240	2,909	2,703	1644
21	13,552	2,226	10,788	2,102	2,764	2,634	1798
22	13,721	2,297	10,952	2,049	2,768	2,508	1681
23	13,616	2,189	11,005	2,038	2,611	2,453	1606
24	13,452	2,004	11,006	1,890	2,446	2,327	1755
25	13,723	2,085	11,355	2,025	2,368	2,306	1703
26	13,598	2,197	11,173	2,120	2,426	2,345	1730
27	13,448	2,197	10,935	2,085	2,512	2,395	1787
28	13,777	2,139	11,100	2,048	2,677	2,582	1848
29	13,780	2,126	11,175	1,996	2,605	2,469	1701
30	13,443	2,193	11,005	2,026	2,439	2,264	1717
Mean value	13,793	2,249	10,987	2,074	2,806	2,622	1708
sd	0,341	0,158	0,203	0,088	0,262	0,224	
cv	0,025	0,070	0,019	0,042	0,093	0,085	
CV_{Poisson}	0,007	0,016	0,007	0,017	0,043	0,041	

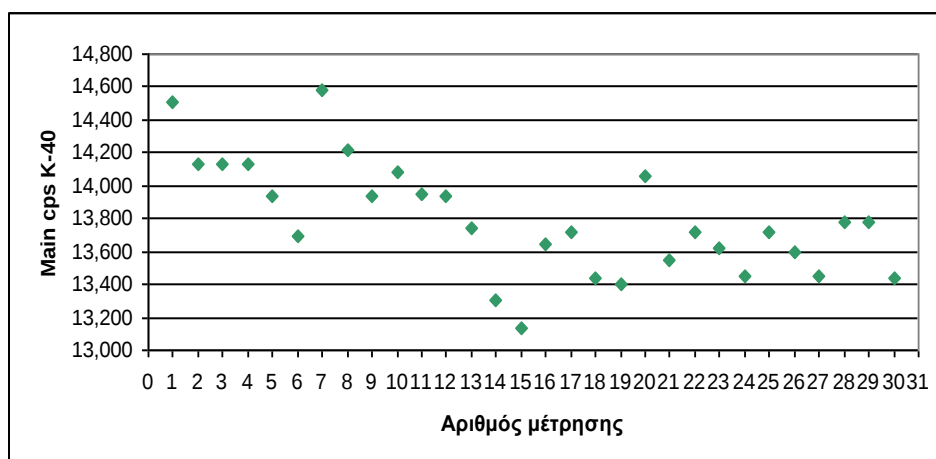
Πίνακας 6: Συνολικές μετρήσεις ^{40}K στην εξεταζόμενη

Τα σφάλμα επαναληπτικότητας 8.5% , που βρέθηκε ήταν περίπου διπλάσιο από το αναμενόμενο με βάση προηγούμενες μελέτες, ως εκ τούτου διερευνήθηκαν ορισμένα πιθανά αίτια, όπως η χρόνος μέτρηση και η ώρα της ημέρας (κυρκόδιος κύκλος). Στην γραφική παράσταση 1 των διορθωμένων cps του ^{40}K ως προς τον αριθμό μέτρησης παρατηρήθηκε μια πιθανή μείωση με το πέρασμα του χρόνου. Για τον λόγο αυτό διενεργήθηκε t-test μεταξύ των πρώτων δεκαπέντε και των επόμενων δεκαπέντε μετρήσεων. Η τιμή $p\text{-value}$ είναι ίση με $0.001 < 0.05$, που σημαίνει ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στις δυο ομάδες μετρήσεων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το εν λόγω εύρημα δεν ήταν αναμενόμενο, έγινε περαιτέρω ανάλυση. Τα δεδομένα $N_{40\text{K}}(\text{cor})$ συσχετίστηκαν γραμμικά με την ημερομηνία μέτρησης τόσο ως σύνολο, όσο και ανά ομάδα (πρωινές μετρήσεις, μεσημεριανές και απογευματινές). Η τάση μείωσης με το χρόνο που βρέθηκε στην ποσότητα $N_{40\text{K}}(\text{cor})$ βρέθηκε και στα cps της κύριας μέτρησης

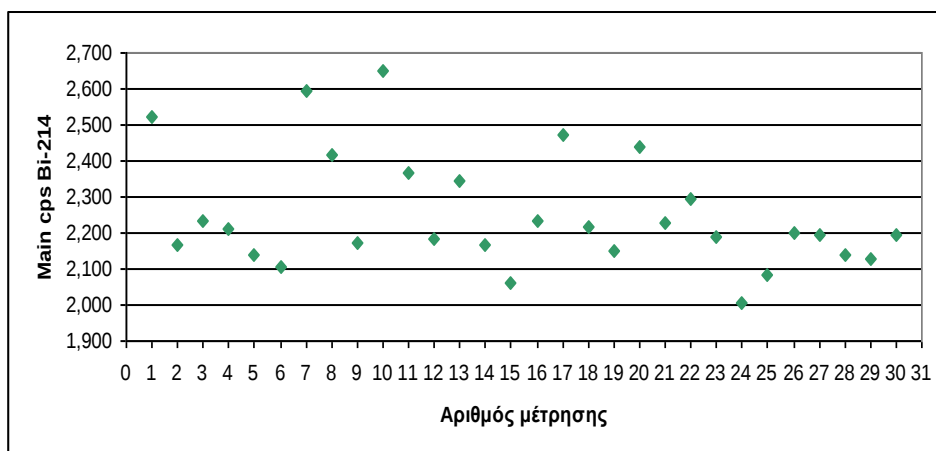
Gross main ^{40}K ($p=0.005$), γραφική παράσταση 2. Αντίθετα, δεν βρέθηκε παρόμοια εξάρτηση (γράφημα 4) των cps του ^{40}K στη μέτρηση του ομοιώματος υποστρώματος ($p=0.64$) ούτε στα cps του ^{214}Bi της κύριας μέτρησης ($p=0.184$) και της μέτρησης υποστρώματος ($p=0.322$). Επομένως η μείωση που παρατηρήθηκε δεν αποδίδεται σε αλλαγή στην λειτουργία του μηχανήματος καθώς θα εμφανίζονταν παρόμοια τάση σε όλες τις μετρήσεις και πιθανώς να σχετίζεται με βιολογική μεταβολή.



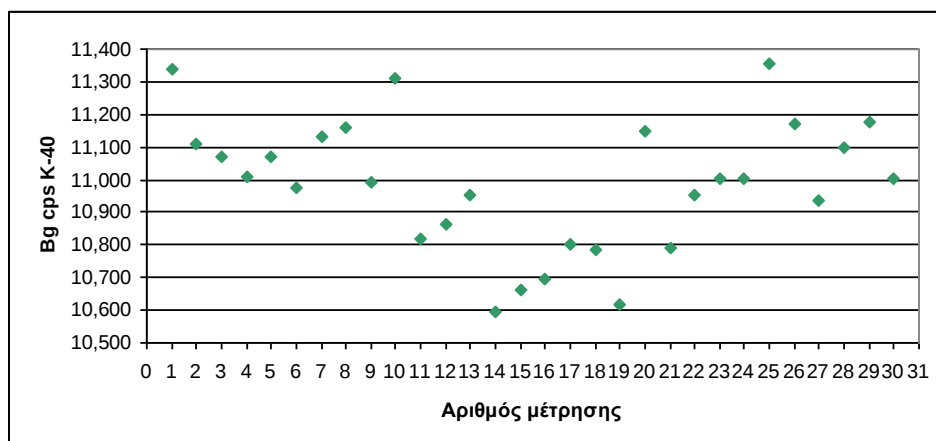
Γράφημα 1:
Διορθωμένος ρυθμός
παλμών ^{40}K ($p = 0.001$).



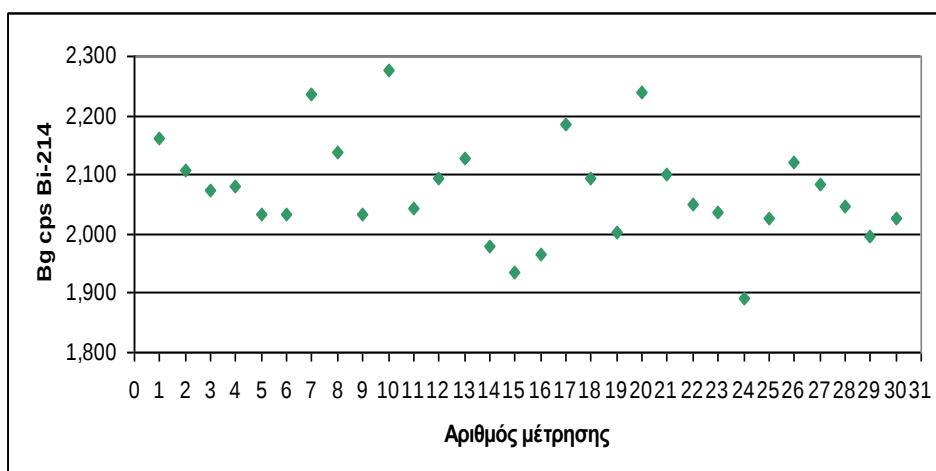
Γράφημα 2:
Ρυθμός παλμών ^{40}K
κύριας μέτρησης
($p = 0.005$).



Γράφημα 3:
Ρυθμός παλμών ^{214}Bi
κύριας μέτρησης
($p = 0.184$).



Γράφημα 4:
Ρυθμός παλμών ^{40}K
μέτρησης
υποστρώματος
($p = 0.64$).



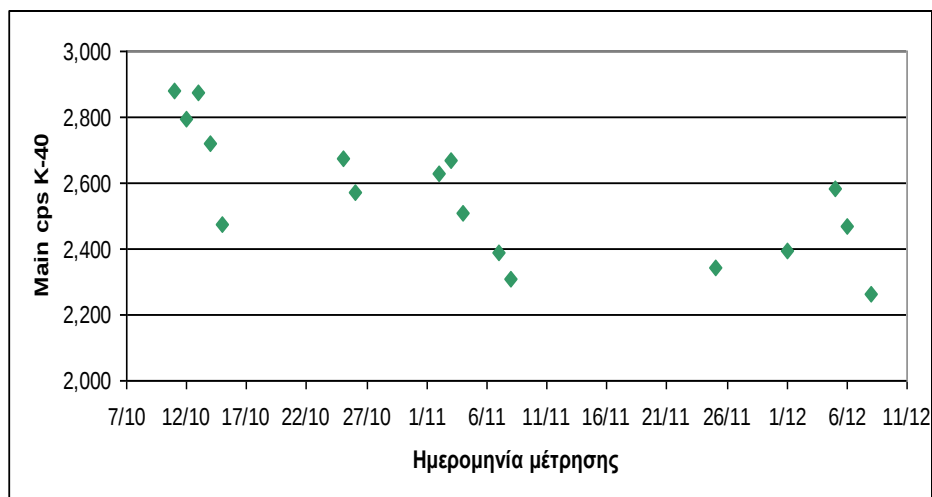
Γράφημα 5:
Ρυθμός παλμών ^{214}Bi
μέτρησης
υποστρώματος
($p=0.322$).

Για να διαπιστωθεί αν υπάρχει μεταβολή των μετρήσεων λόγω βιολογικών παραμέτρων της εξεταζόμενης σε 17 διαφορετικές ημέρες κατά την διάρκεια των δυο μηνών που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, έγινε συσχετισμός του καθαρού ρυθμού counts, $N_{40\text{K}}(\text{cor})$, με την ημερομηνία μέτρησης (Γράφημα 6). Για τις ημέρες κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκαν περισσότερες από μία μετρήσεις παρουσιάζεται η μέση τιμή αυτών στον πίνακα 7.

Βρέθηκε τάση μείωσης του ^{40}K στην εξεταζόμενη κατά την διάρκεια των δύο μηνών που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, αλλά χωρίς κάποιον προφανή λόγο ($r=-0.752$, $p=0.000$)

Ημερομηνία	Gross Main ⁴⁰ K / Live Time	Gross Bg ⁴⁰ K / Live Time	Διορθωμένος καθαρός ρυθμός κρούσεων ⁴⁰ K
11/10/2016	14,257	11,174	2,882
12/10/2016	13,921	11,019	2,795
13/10/2016	14,243	11,096	2,875
14/10/2016	13,992	11,000	2,719
15/10/2016	13,393	10,737	2,473
25/10/2016	13,650	10,696	2,675
26/10/2016	13,576	10,792	2,571
2/11/2016	13,402	10,617	2,631
3/11/2016	13,804	10,968	2,668
4/11/2016	13,721	10,952	2,508
7/11/2016	13,534	11,005	2,390
8/11/2016	13,723	11,355	2,306
25/11/2016	13,598	11,173	2,345
1/12/2016	13,448	10,935	2,395
5/12/2016	13,777	11,100	2,582
6/12/2016	13,780	11,175	2,469
8/12/2016	13,443	11,005	2,264

Πίνακας 7: Συσχετισμός μετρήσεων ⁴⁰K με την ημέρα μέτρησης



Γράφημα 6: Cps ⁴⁰K συναρτήσει της ημερομηνίας μέτρησης

Στους πίνακες 8, 9 και 10 παρουσιάζονται οι μετρήσεις του ⁴⁰K ομαδοποιημένες ως προς την ώρα της ημέρας που έγιναν (ή τόπο παραμονής της εξεταζόμενης πριν από την μέτρηση). Και στις τρεις περιπτώσεις οι πειραματικοί συντελεστές μεταβλητότητας είναι περίπου διπλάσιοι από τους θεωρητικούς, όπως και στο σύνολο των μετρήσεων. Διενεργήθηκε independent t-test μεταξύ των διορθωμένων μετρήσεων, ως προς το ²¹⁴Bi, του ⁴⁰K ανά ομάδες. Οι τιμές p-value και για τους τρεις στατιστικούς ελέγχους ήταν αρκετά μεγαλύτερες από 0.05 (Πίνακας 11), οπότε δεν βρέθηκε να επηρεάζεται η ολόσωμη ποσότητα ⁴⁰K από τις συνθήκες του περιβάλλοντος ή/και την ώρα μέτρησης, όπως και ήταν αναμενόμενο.

Στον πίνακα 12 παρουσιάζονται και οι τιμές p-value του μη διορθωμένου ρυθμού παλμών στην περιοχή του ^{40}K . Οι τιμές p-value είναι μεγαλύτερες από 0.05 και στις τρεις περιπτώσεις επομένως, παρόλο που δεν έχει γίνει διόρθωση για το ^{214}Bi και σε αυτήν την περίπτωση δεν παρατηρείται εμφανής εξάρτηση των μετρήσεων από τις συνθήκες του περιβάλλοντος ή/και την ώρα μέτρησης. Ως εκ τούτου και ο παράγοντας αυτός δεν μπορεί να εξηγήσει το εύρημα του αυξημένου συντελεστή μεταβλητότητας.

a/a	Gross Main ^{40}K / Live Time	Gross Main ^{214}Bi / Live Time	Gross Bg ^{40}K / Live Time	Gross Bg ^{214}Bi / Live Time	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ^{40}K	Διορθωμένος καθαρός ρυθμός κρούσεων ^{40}K	<Live Time> (s)
1	14,510	2,520	11,339	2,160	3,171	2,795	1734
4	14,128	2,211	11,010	2,081	3,118	2,982	1720
7	14,579	2,594	11,132	2,237	3,447	3,074	1644
10	14,084	2,650	11,312	2,275	2,772	2,380	1669
13	13,740	2,343	10,954	2,127	2,786	2,560	1705
17	13,715	2,472	10,800	2,184	2,914	2,613	1619
20	14,057	2,438	11,148	2,240	2,909	2,703	1644
22	13,721	2,297	10,952	2,049	2,768	2,508	1681
23	13,616	2,189	11,005	2,038	2,611	2,453	1606
25	13,723	2,085	11,355	2,025	2,368	2,306	1703
Mean value	13,987	2,380	11,101	2,142	2,886	2,637	1672
sd	0,345	0,186	0,189	0,092	0,304	0,224	
cv	0,025	0,078	0,017	0,043	0,105	0,085	
CV _{poisson}	0,007	0,016	0,007	0,017	0,042	0,042	

Πίνακας 8: Μετρήσεις από την οικία (πρώι)

a/a	Gross Main ^{40}K / Live Time	Gross Main ^{214}Bi / Live Time	Gross Bg ^{40}K / Live Time	Gross Bg ^{214}Bi / Live Time	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ^{40}K	Διορθωμένος καθαρός ρυθμός κρούσεων ^{40}K	<Live Time> (s)
2	14,129	2,165	11,110	2,109	3,018	2,960	1702
5	13,941	2,138	11,071	2,032	2,870	2,759	1717
8	14,215	2,419	11,161	2,137	3,054	2,759	1750
11	13,949	2,365	10,821	2,044	3,129	2,793	1705
14	13,302	2,166	10,594	1,979	2,708	2,513	1587
16	13,650	2,231	10,696	1,964	2,954	2,675	1748
18	13,438	2,215	10,783	2,095	2,655	2,530	1723
21	13,552	2,226	10,788	2,102	2,764	2,634	1798
28	13,777	2,139	11,100	2,048	2,677	2,582	1848
30	13,443	2,193	11,005	2,026	2,439	2,264	1717
Mean value	13,740	2,226	10,913	2,054	2,827	2,647	1730
sd	0,312	0,094	0,199	0,057	0,216	0,191	
cv	0,023	0,042	0,018	0,028	0,076	0,072	
CV _{poisson}	0,006	0,016	0,007	0,017	0,042	0,041	

Πίνακας 9: Μετρήσεις από το γραφείο (μεσημέρι)

a/a	Gross Main ⁴⁰ K / Live Time	Gross Main ²¹⁴ Bi / Live Time	Gross Bg ⁴⁰ K / Live Time	Gross Bg ²¹⁴ Bi / Live Time	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ⁴⁰ K	Διορθωμένος καθαρός ρυθμός κρούσεων ⁴⁰ K	<Live Time> (s)
3	14,133	2,234	11,073	2,072	3,061	2,892	1717
6	13,694	2,105	10,976	2,033	2,718	2,643	1701
9	13,934	2,175	10,994	2,034	2,940	2,792	1743
12	13,941	2,184	10,866	2,095	3,075	2,983	1729
15	13,137	2,059	10,662	1,936	2,475	2,346	1605
19	13,402	2,151	10,617	2,004	2,785	2,631	1750
24	13,452	2,004	11,006	1,890	2,446	2,327	1755
26	13,598	2,197	11,173	2,120	2,426	2,345	1730
27	13,448	2,197	10,935	2,085	2,512	2,395	1787
29	13,780	2,126	11,175	1,996	2,605	2,469	1701
Mean value	13,652	2,143	10,948	2,026	2,704	2,582	1722
sd	0,303	0,071	0,189	0,073	0,252	0,243	
cv	0,022	0,033	0,017	0,036	0,093	0,094	
CV poisson	0,007	0,016	0,007	0,017	0,044	0,042	

Πίνακας 10: Μετρήσεις από την αίθουσα του MOA (απόγευμα)

Χρόνος	⁴⁰ K cps±sd		p-value
Σπίτι	2,637±0,224	Σπίτι-Γραφείο	0,925
Γραφείο	2,647±0,191	Σπίτι-MOA	0,625
MOA	2,582±0,243	Γραφείο-MOA	0,527

Πίνακας 11: p-values για διορθωμένους καθαρούς ρυθμούς παλμών ⁴⁰K

Χρόνος	⁴⁰ K cps±sd		p-value
Σπίτι	2,886±0,304	Σπίτι-Γραφείο	0,619
Γραφείο	2,827±0,216	Σπίτι-MOA	0,162
MOA	2,704±0,252	Γραφείο-MOA	0,258

Πίνακας 12: p-values για καθαρούς ρυθμούς παλμών ⁴⁰K

Για τη μέτρηση της ολόσωμης μάζας καλίου είναι απαραίτητη η γνώση εκτός των άλλων της ανιχνευτικής απόδοσης της διάταξης σε φωτόνια ενέργειας 1.46 MeV που εκπέμπονται πρακτικά ομοιόμορφα από το σώμα της εξεταζόμενης. Η ανιχνευτική απόδοση του συστήματος στην περιοχή του ⁴⁰K είναι ίση με $1.095 \cdot 10^{-2}$ σύμφωνα με τους υπολογισμούς Monte Carlo των Σ. Βαλάκη και Τ. Καλεφ-Εζρά για το συγκεκριμένο σωματότυπο, που η ακρίβειά τους ελέγχθηκε και πειραματικά. Η τιμή όμως αυτή έχει ισχύ όταν είναι σε λειτουργία και οι δεκαέξι ανιχνευτές του MOA, για αυτό το λόγο από την συνολική απόδοση έγινε αφαίρεση της απόδοσης των τεσσάρων ανιχνευτών που δεν συμμετείχαν στις μετρήσεις. Το ποσοστό της συνεισφοράς τους στη συνολική απόδοση υπολογίστηκε ότι είναι ίσο με 17% από τον πίνακα απόδοσης του ομοιώματος No6 που μοντελοποιήθηκε από τον Σ. Βαλάκη (2011) και ήταν πιο κοντά στα χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης με συνέπεια η ανιχνευτική απόδοση να είναι $0.909 \cdot 10^{-2}$.

$$\text{Απόδοση} = z_o + a \cdot \text{μήκος} + b \cdot \text{μάζα} + c \cdot \text{μήκος}^2 + d \cdot \text{μάζα}^2 + f \cdot \text{μήκος} \cdot \text{μάζα} \quad (\Gamma.2)$$

παράμετρος	Τιμή	Σφάλμα
zo	-0,01117	0,00425
a	3,38849E-04	6,32652E-05
b	-1,937E-07	3,54616E-08
c	-1,21795E-06	2,27389E-07
d	-1,33407E-13	7,22788E-14
f	1,15081E-09	2,22705E-10

Ο μέσος ρυθμός εκπομπής φωτονίων ενέργειας 1.46 MeV ανά g καλίου ισούται με 3.3077 ανά s. Ως εκ τούτου υπολογίστηκε η μάζα καλίου στο σώμα της εξεταζόμενης με χρήση της σχέσης:

$$M_{\kappa} = \frac{Rate}{\alpha\pi\delta\omicron\sigma\eta \cdot 3,3077} \quad (\Gamma.3)$$

όπου Rate είναι ο μέσος διορθωμένος καθαρός ρυθμός παλμών ^{40}K των 30 μετρήσεων της εξεταζόμενης που είναι ίσος με 2.622 cps με σφάλμα 0.224 cps.

Με αυτόν τον τρόπο βρέθηκε ότι η συνολική μάζα καλίου στο σώμα της εξεταζόμενης ήταν κατά μέσο όρο 87.2 ± 7.4 g (SEM=1.4g), με βάση μετρήσεις που έγιναν σε διάστημα δυο μηνών σε διαφορετικές ώρες της ημέρας, η δε συγκέντρωσή καλίου στο σώμα της ήταν 1.66 ± 0.14 g/kg (SEM=0.02g/kg), τιμή που είναι συμβατή με αυτήν άλλων υγείων ελληνίδων παρόμοιας ηλικίας (βλέπε Γ.1.3).

Σημειώνεται ότι σε μελέτη του Cheryl J. Cohen, 1973, υποστηρίζεται ότι η έμμηνος ρύση στις γυναίκες μπορεί να προκαλεί μεγαλύτερες μεταβολές της ολόσωμης ποσότητας ^{40}K από τις μεταβολές στους άντρες. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τον ασταθή κύκλο έμμηνου ρύσης της συγκεκριμένης εξεταζόμενης (διάρκειας κατά μέσο όρο περίπου 15 ημερών) και τα ευρήματα της ενότητας Γ.1.2 που ακολουθούν ενδέχεται να εξηγεί τη μεγάλη τιμή του συντελεστή επαναληπτικότητας της ολόσωμης ποσότητας καλίου που βρέθηκε. Αντίθετα, οι Paul Lijnen et al, 1990 που μελέτησαν τις μεταβολές του καλίου στα ερυθροκύτταρα κατά την διάρκεια του κύκλου της εμμήνου ρύσης δεν παρατήρησαν αλλαγές στην συγκέντρωση του στον ενδοκυττάριο χώρο.

Γ.1.2 In vivo μετρήσεις ^{40}K σε ενήλικα άντρα

Την περίοδο από τις 26/10/2016 έως τις 13/2/2017 πραγματοποιήθηκαν δώδεκα in vivo μετρήσεις σε επαγγελματικά εκτιθέμενο σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες άνδρα, ηλικίας 65 γ, μάζας σώματος 96.5 kg και ύψους 165 cm, για τη μελέτη της επαναληπτικότητας των μετρήσεων ενεργότητας στο σώμα του διαφορετικές ημέρες. Οι δώδεκα μετρήσεις χωρίστηκαν σε δυο ομάδες των έξι μετρήσεων η κάθε μια, στην πρώτη ομάδα, που έγινε από 26/10/2016 έως 2/2/2017, οι ανιχνευτές τροφοδοτήθηκαν με τάση 950 V, ενώ στη δεύτερη ομάδα που ακολούθησε, η τάση ήταν ίση με 985 V με αντίστοιχη μεταβολή στον παράγοντα ενίσχυσης των ενισχυτών. Το ομοίωμα υποστρώματος που χρησιμοποιήθηκε αποτελούνταν από 31 δοχεία με αποιονισμένο νερό όγκου 2000 ± 18 ml (M) το καθένα και 26 δοχεία των 1000 ± 9 ml (μ), συνολικής μάζας 96,8kg και συνολικού ύψους 171cm. Στον πίνακα 13 παρουσιάζονται τα δεδομένα των έξι πρώτων μετρήσεων ^{40}K του εξεταζόμενου. Οι πρώτες δύο στήλες αφορούν τον αριθμό των cps που καταγράφηκαν κατά την κύρια μέτρηση στις περιοχές ενδιαφέροντος του ^{40}K και του ^{214}Bi , ενώ οι δύο επόμενες στήλες τις αντίστοιχες τιμές από την μέτρηση του ομοιώματος. Στην πέμπτη στήλη του πίνακα παρουσιάζεται ο καθαρός ρυθμός παλμών ^{40}K που προέκυψε από την αφαίρεση του ρυθμού κρούσεων υποστρώματος από το κύριο ρυθμό κρούσεων, $N_{40\text{K}}$, ενώ στην επόμενη στήλη παρουσιάζεται ο διορθωμένος ρυθμός παλμών του ^{40}K ως προς το ^{214}Bi , $N_{40\text{K}}(\text{cor})$ που υπολογίστηκε με εφαρμογή του τύπου (Γ.1).

a/a	Gross Main ⁴⁰ K / Live Time	Gross Main ²¹⁴ Bi / Live Time	Gross Bg ⁴⁰ K / Live Time	Gross Bg ²¹⁴ Bi / Live Time	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ⁴⁰ K	Διορθωμένος καθαρός ρυθμός κρούσεων ⁴⁰ K	<Live Time> (s)
1	13,596	2,209	10,322	1,878	3,274	2,928	1758
2	13,577	2,085	10,831	2,015	2,747	2,673	1824
3	13,722	2,066	10,603	1,898	3,118	2,942	1821
4	13,865	2,096	10,895	1,900	2,970	2,765	1808
5	13,550	2,078	10,579	1,926	2,970	2,811	1770
6	13,626	2,058	10,880	1,908	2,746	2,590	1793
Mean value	13,656	2,099	10,685	1,921	2,971	2,785	1796
sd	0,118	0,056	0,225	0,049	0,207	0,139	
cv	0,009	0,027	0,021	0,025	0,070	0,050	
CV _{poisson}	0,006	0,016	0,007	0,017	0,039	0,038	

Πίνακας 13: Μετρήσεις ⁴⁰K στον εξεταζόμενο (τάση 950V)

Η μέση τιμή του διορθωμένου ρυθμού κρούσεων από το σώμα του εξεταζόμενου υπολογίστηκε ίση με 2.785 cps, οι δε συντελεστές μεταβλητότητας του ρυθμού κρούσεων πριν και μετά την διόρθωση για το ²¹⁴Bi είναι 7.0% και 5.0% αντίστοιχα. Το σφάλμα των συντελεστών μεταβλητότητας υπολογίστηκε από τη σχέση

$$sd_{\theta} = \frac{sd}{\sqrt{2 \cdot (N-1)}}$$

Ως εκ τούτου, οι συντελεστές επαναληπτικότητας είναι (7.0±2.2%) και (5.0±1.6%) και δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι διαφέρουν μεταξύ τους. Το σύνολο των μετρήσεων είναι αρκετά μικρό για αυτό το λόγο δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα για το αν η διόρθωση για το ²¹⁴Bi οδηγεί σε βελτίωση της επαναληπτικότητας των μετρήσεων.

Με χρήση της σχέσης (Γ.2) βρέθηκε ανιχνευτική απόδοση ίση με 0.009981. Το ποσοστό συνεισφοράς στην συνολική απόδοση των τεσσάρων ανιχνευτών που δεν βρισκόταν σε λειτουργία θεωρήθηκε ότι είναι ίσο με 16% από τον πίνακα απόδοσης του ομοιώματος No15 που μοντελοποιήθηκε από τον Σ. Βαλάκη (2011) και ήταν πιο κοντά στα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου. Επομένως η τιμή της απόδοσης ήταν 0.008384 και όχι 0.009981.

Με βάση τον ρυθμό των καθαρών παλμών που βρέθηκε, (2.785±0.139) cps και με χρήση της σχέσης (Γ.3) η ολόσωμη μάζα καλίου του εξεταζόμενου ήταν 100.4±5.0g (SEM=2.0g) η δε συγκέντρωσή του 1.04±0.05 g/kg (SEM=0.02g/kg).

Στις 2/2/2017 αυξήθηκε η τάση τροφοδοσίας των ανιχνευτών από 950V στα 985V. Για να διαπιστωθεί αν και κατά πόσο επηρεάστηκε η λειτουργία των ανιχνευτών και κατά επέκταση οι in vivo μετρήσεις, διενεργήθηκαν άλλες έξι μετρήσεις στον ίδιο άνδρα εθελοντή και μελετήθηκε εκ νέου η συγκέντρωση ⁴⁰K στο σώμα του.

Στον πίνακα 14 παρουσιάζονται τα δεδομένα των μετρήσεων του ⁴⁰K του εξεταζόμενου για τις μετρήσεις 7^η - 12^η.

a/a	Gross Main ⁴⁰ K / Live Time	Gross Main ²¹⁴ Bi / Live Time	Gross Bg ⁴⁰ K / Live Time	Gross Bg ²¹⁴ Bi / Live Time	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ⁴⁰ K	Διορθωμένος καθαρός ρυθμός κρούσεων ⁴⁰ K	<Live Time> (s)
7	14,067	2,304	10,878	2,046	3,189	2,919	1804
8	13,844	2,208	10,993	1,987	2,851	2,620	1774
9	13,828	2,316	10,790	2,033	3,038	2,741	1796
10	14,010	2,368	10,831	2,116	3,179	2,916	1785
11	14,168	2,276	10,641	1,546	3,527	2,762	1784
12	14,468	2,359	11,131	2,008	3,337	2,970	1787
Mean value	14,064	2,305	10,877	1,956	3,187	2,821	1788
sd	0,237	0,059	0,169	0,206	0,234	0,135	
cv	0,017	0,025	0,016	0,105	0,073	0,048	
CV _{poission}	0,006	0,016	0,007	0,017	0,037	0,038	

Πίνακας 14: Μετρήσεις ⁴⁰K στον εξεταζόμενο (τάση 985V)

Η μέση τιμή του διορθωμένου ρυθμού κρούσεων από το σώμα του εξεταζόμενου υπολογίστηκε ίση με (2.821 ± 0.135) cps, οι δε συντελεστές μεταβλητότητας του ρυθμού κρούσεων πριν και μετά την διόρθωση για το ²¹⁴Bi είναι $7.3 \pm 2.3\%$ και $4.8 \pm 1.5\%$, αντίστοιχα και φαίνεται να διαφέρουν σε σχέση με την πρώτη ομάδα μετρήσεων που οι τιμές αλληλεπικαλύπτονταν.

Όπως και στην πρώτη σειρά μετρήσεων θεωρήθηκε ότι η ανιχνευτική απόδοση όταν γίνεται χρήση των δώδεκα ανιχνευτών είναι $0.8384 \cdot 10^{-2}$, επομένως από τον ρυθμό των καθαρών παλμών που βρέθηκε, (2.821 ± 0.135) cps υπολογίστηκε η ολόσωμη μάζα καλίου του εξεταζόμενου ίση με 101.7 ± 4.9 g (SEM=2.0g) η δε συγκέντρωσή του ήταν 1.06 ± 0.05 g/kg (SEM=0.02g/kg).

Στην συνέχεια διενεργήθηκε independent t-test για να διαπιστωθεί αν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά ανάμεσα στις δύο ομάδες μετρήσεων καλίου δηλαδή, των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν όταν η τάση τροφοδοσίας των ανιχνευτών ήταν 950 V και αυτών που πραγματοποιήθηκαν όταν η τάση ήταν στα 985 V. Υπολογίστηκε τιμή p-value=0.654>0.05 επομένως δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά λόγω αλλαγής της τάσης τροφοδοσίας. Έτσι υπολογίστηκε η ολόσωμη ποσότητα καλίου για το σύνολο των δώδεκα μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στον εθελοντή εξεταζόμενο.

Τα συνολικά δεδομένα των δώδεκα μετρήσεων του ⁴⁰K στον εθελοντή που έγιναν σε διάστημα 3.5 μηνών παρουσιάζονται στον πίνακα 15.

a/a	Gross Main ⁴⁰ K / Live Time	Gross Main ²¹⁴ Bi / Live Time	Gross Bg ⁴⁰ K / Live Time	Gross Bg ²¹⁴ Bi / Live Time	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ⁴⁰ K	Διορθωμένος καθαρός ρυθμός κρούσεων ⁴⁰ K	<Live Time> (s)
1	13,596	2,209	10,322	1,878	3,274	2,928	1758
2	13,577	2,085	10,831	2,015	2,747	2,673	1824
3	13,722	2,066	10,603	1,898	3,118	2,942	1821
4	13,865	2,096	10,895	1,900	2,970	2,765	1808
5	13,550	2,078	10,579	1,926	2,970	2,811	1770
6	13,626	2,058	10,880	1,908	2,746	2,590	1793
7	14,067	2,304	10,878	2,046	3,189	2,919	1804
8	13,844	2,208	10,993	1,987	2,851	2,620	1774
9	13,828	2,316	10,790	2,033	3,038	2,741	1796
10	14,010	2,368	10,831	2,116	3,179	2,916	1785
11	14,168	2,276	10,641	1,546	3,527	2,762	1784
12	14,468	2,359	11,131	2,008	3,337	2,970	1787
Mean value	13,860	2,202	10,781	1,938	3,079	2,803	1792
sd	0,278	0,121	0,215	0,144	0,239	0,132	
cv	0,020	0,055	0,020	0,074	0,078	0,047	
CV _{poission}	0,006	0,016	0,007	0,017	0,038	0,038	

Πίνακας 15: Συνολικά οι δώδεκα μετρήσεις ⁴⁰K στον εξεταζόμενο

Η μέση τιμή του διορθωμένου ρυθμού κρούσεων από το σώμα του εξεταζόμενου υπολογίστηκε ίση με 2.803 cps, οι δε συντελεστές μεταβλητότητας του ρυθμού κρούσεων πριν και μετά την διόρθωση για το ²¹⁴Bi είναι $7.8 \pm 1.7\%$ και $4.7 \pm 1.0\%$, αντίστοιχα. Στις εν λόγω δώδεκα μετρήσεις στον ενήλικα άντρα φαίνεται να βελτιώνεται η επαναληπτικότητα όταν γίνεται διόρθωση για τους καταμετρημένους παλμούς του ²¹⁴Bi ενέργειας 1760 keV σε αντίθεση με τις μετρήσεις που είχαν γίνει σε ενήλικη γυναίκα, όπου λόγω κακής επαναληπτικότητας δεν είχε παρατηρηθεί το ίδιο αποτέλεσμα.

Όπως και στις προηγούμενες παραγράφους θεωρήθηκε ότι η ανιχνευτική απόδοση φωτονίων στην ενεργειακή περιοχή του 1.46 MeV όταν γίνεται χρήση των δώδεκα ανιχνευτών είναι 0.008384, και ότι ο μέσος ρυθμός εκπομπής φωτονίων ενέργειας 1.46 MeV ανά g καλίου ισούται με 3.3077 ανά s. Βρέθηκε μέσος ρυθμός καθαρών παλμών ίσος με 2.803 ± 0.132 cps, έτσι η ολόσωμη μάζα καλίου του εξεταζόμενου ήταν 101.1 ± 4.8 g (SEM=1.4g) και η συγκέντρωση στο σώμα του, 1.05 ± 0.05 g/kg (SEM=0.01g/kg).

Γ.1.3 In vivo μετρήσεις ⁴⁰K όλων των εθελοντών

Στον Πίνακα 16 παρουσιάζεται για κάθε έναν από τους 21 εθελοντές που συμμετείχαν στην έρευνα ο καθαρός ρυθμός παλμών στην περιοχή του ⁴⁰K, τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να υπολογιστεί η ολόσωμη ποσότητα καλίου (TBK_{WBC}) και κατά επέκταση η συγκέντρωση του στο σώμα. Στην πέμπτη στήλη του πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της απόδοσης που υπολογίστηκαν από την σχέση (Γ.2) και ενώ έγινε αφαίρεση του ποσοστού συνεισφοράς των τεσσάρων ανιχνευτών που δεν συμμετείχαν στις μετρήσεις. Η συνεισφορά αυτή βρέθηκε από τους πίνακες απόδοσης των ομοιωμάτων που μοντελοποιήθηκαν από τον Σ. Βαλάκη (2011) για κάθε εξεταζόμενο ξεχωριστά ανάλογα με το ομοίωμα που ήταν πιο κοντά στα χαρακτηριστικά του.

Εθελοντής	Ηλικία (y)	Μάζα (kg)	cps ⁴⁰ K	Απόδοση	TBK _{WBC} (g)	TBK _{WBC} /Μάζα (g/kg)
Ε.Μ. (Γ)	61	110	2,528	0,007727	98,9	0,90
Κ.Τ. (Α)	65	96,5	2,803	0,008384	101,1	1,05
Κ.Ε. (Γ)	30	70	2,069	0,008611	72,6	1,04
Τ.Ε. (Α)	24	102	5,105	0,008744	182,9	1,79
Σ.Χ. (Γ)	24	58	2,432	0,008996	81,7	1,41
Κ.Ν. (Γ)	28	52,6	2,622	0,009090	87,2	1,66
Π.Ε. (Γ)	59	64	2,277	0,009009	76,4	1,19
Β.Ι. (Γ)	22	61	2,574	0,008996	86,5	1,41
Ζ.Γ. (Γ)	23	50	2,211	0,008680	77,0	1,54
Κ.Ε. (Γ)	34	57	2,153	0,008971	72,6	1,27
Π.Β. (Γ)	71	78	1,650	0,007979	62,5	0,80
Κ.Α. (Γ)	72	66	1,912	0,008834	65,4	0,99
Μ.Β. (Γ)	22	60	2,849	0,009828	87,6	1,46
Φ.Α. (Γ)	22	59	2,238	0,008944	68,7	1,16
Μ.Δ. (Α)	26	69	3,227	0,008913	109,5	1,59
Φ.Μ. (Γ)	48	82	2,047	0,008555	72,3	0,88
Κ.Β. (Α)	51	76	3,864	0,008989	130,0	1,71
Σ.Χ. (Γ)	45	69,5	2,293	0,008827	82,8	1,19
Δ.Δ. (Α)	46	115	4,719	0,008676	164,4	1,43
Π.Α. (Α)	46	86	3,869	0,008857	132,0	1,53
Σ.Κ. (Α)	48	75	4,206	0,008992	141,4	1,88

Πίνακας 16: Ολόσωμη ποσότητα καλίου για όλους τους εθελοντές

Οι εθελοντές Π.Β., Κ.Α., Φ.Μ. κατά την λήψη του ιστορικού τους πριν την εξέταση ανέφεραν ότι λαμβάνουν φαρμακευτική αγωγή, η οποία ενδέχεται να επηρεάζει τις μετρήσεις του καλίου για αυτό και δεν συμπεριλαμβάνονται σε περαιτέρω υπολογισμούς. Η μέση τιμή του ολόσωμου καλίου για εξεταζόμενους που δεν λαμβάνουν φαρμακευτική αγωγή είναι 103.0 ± 33.7 g, ενώ η συγκέντρωση ισούται με 1.40 ± 0.28 g/kg.

Στους πίνακες 17 και 18 υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές του καλίου και της συγκέντρωσης του ξεχωριστά για τα δύο φύλα. Οι γυναίκες τείνουν να εμφανίζουν περισσότερο λιπώδη ιστό και λιγότερο μυϊκό από ότι οι άντρες για τον λόγο αυτό, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα, οι γυναίκες διαθέτουν μικρότερη ποσότητα καλίου στο σώμα τους. (Περαιτέρω ανάλυση των διαφορών μεταξύ δύο φύλων παρουσιάζεται στην ενότητα Δ.1)

Άντρες	TBK _{WBC} (g)	TBK _{WBC} /Μάζα (g/kg)
Μέση τιμή	137,3	1,57
sd	28,9	0,28
Μέγιστη τιμή	182,9	1,88
Ελάχιστη τιμή	109,5	1,05

Πίνακας 17: Μέση τιμή καλίου αντρών

Γυναίκες	TBK _{WBC} (g)	TBK _{WBC} /Μάζα (g/kg)
Μέση τιμή	81,1	1,29
sd	8,7	0,22
Μέγιστη τιμή	98,9	1,66
Ελάχιστη τιμή	68,7	0,90

Πίνακας 18: Μέση τιμή καλίου γυναικών

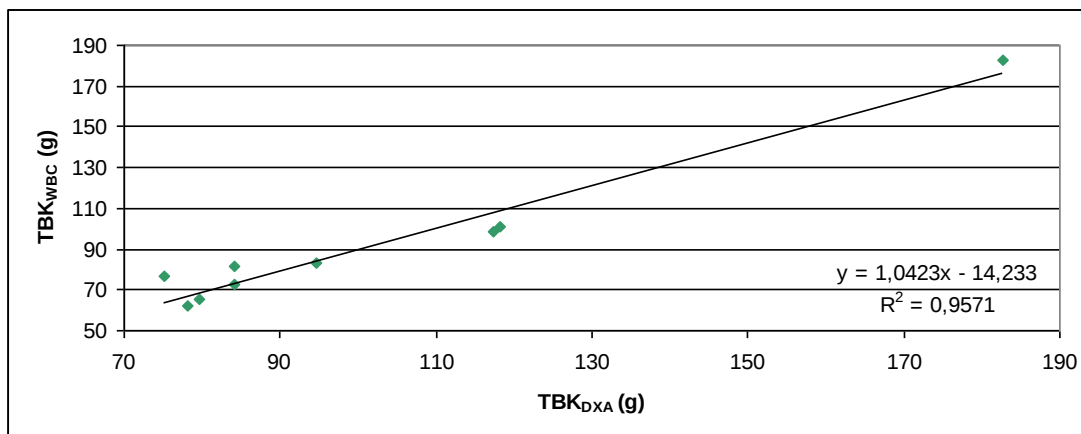
Εννέα από τους εθελοντές που μετρήθηκαν στον ΜΟΑ υποβλήθηκαν και σε εξέταση DXA στο ΠΓΝΙ, ώστε να συγκριθούν οι δύο ποσότητες ολόσωμου καλίου που προκύπτουν από

τις δύο εξετάσεις. Στον πίνακα 19 παρουσιάζονται οι τιμές του ολόσωμου καλίου από την μέτρηση στον ΜΟΑ (TBK_{WBC}) και από την μέτρηση με την μέθοδο DXA (TBK_{DXA}).

Εθελοντής	Ηλικία (γ)	Μάζα (kg)	Ύψος (m)	TBK_{WBC} (g)	TBK_{DXA} (g)
Ε.Μ. (Γ)	61	110	1,60	98,9	117,3
Κ.Τ. (Α)	65	96,5	1,65	101,1	118,2
Κ.Ε. (Γ)	30	70	1,55	72,6	84,2
Τ.Ε. (Α)	24	102	1,87	182,9	182,7
Σ.Χ. (Γ)	24	58	1,58	81,7	84,1
Ζ.Γ. (Γ)	23	50	1,55	77,0	75,2
Π.Β. (Γ)	71	78	1,53	62,5	78,2
Κ.Α. (Γ)	72	66	1,60	65,4	79,7
Σ.Χ. (Γ)	45	69,5	1,63	82,8	94,7

Πίνακας 19: Τιμές TBK_{WBC} και TBK_{DXA}

Από το γράφημα 7 διαπιστώνεται ότι οι τιμές που προκύπτουν από τους δύο τρόπους μέτρησης συσχετίζονται γραμμικά μέσω της σχέσης $y = 1.0423 \cdot x - 14.233$ ($R^2 = 0.96$).



Γράφημα 7: Συσχετισμός ολόσωμης ποσότητας καλίου από τις δύο τεχνικές

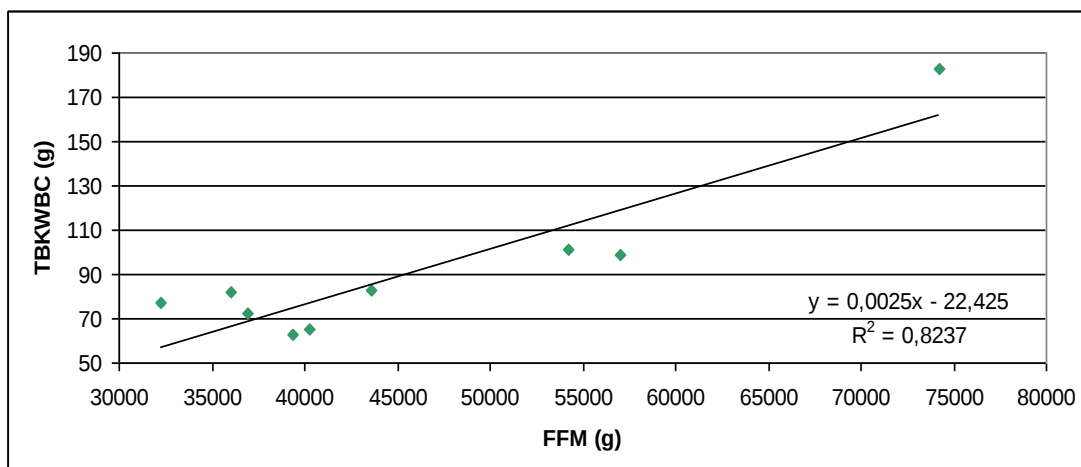
Στην συνέχεια έγινε συσχετισμός της ολόσωμης ποσότητας καλίου που μετρήθηκε με τον ΜΟΑ και της συνολικής μη λιπώδους μάζας (Fat Free Mass) που προέκυψε από την εξέταση DXA (πίνακας 20).

Τα δύο μεγέθη συσχετίζονται με την σχέση $y = 0.0025 \cdot x - 22.425$ ($R^2 = 0.82$).

Εθελοντής	Μάζα (kg)	Ύψος (m)	TBK_{WBC} (g)	FFM (g)
Ε.Μ. (Γ)	110	1,60	98,9	57040
Κ.Τ. (Α)	96,5	1,65	101,1	54252
Κ.Ε. (Γ)	70	1,55	72,6	36923
Τ.Ε. (Α)	102	1,87	182,9	74251
Σ.Χ. (Γ)	58	1,58	81,7	36074
Ζ.Γ. (Γ)	50	1,55	77,0	32234
Π.Β. (Γ)	78	1,53	62,5	39375
Κ.Α. (Γ)	66	1,60	65,4	40263
Σ.Χ. (Γ)	69,5	1,63	82,8	43605

Πίνακας 20: Τιμές TBK_{WBC} και FFM

Στην συνέχεια έγινε συσχετισμός της ολόσωμης ποσότητας καλίου ανά μονάδα μάζας με την ολόσωμη ποσότητα μη λιπώδους μάζας ανά μονάδα μάζας.

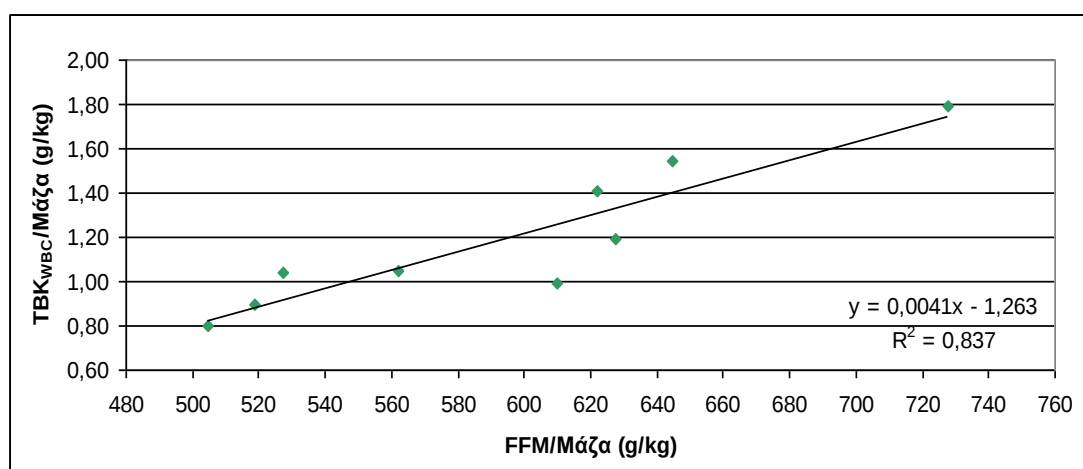


Γράφημα 8: Συσχετισμός TBK_{WBC} με την μη λιπώδη μάζα FFM

Εθελοντής	Μάζα (kg)	Ύψος (m)	$TBK_{WBC}/Μάζα$ (g/kg)	FFM/Μάζα (g/kg)
Ε.Μ. (Γ)	110	1,60	0,90	518,55
Κ.Τ. (Α)	96,5	1,65	1,05	562,20
Κ.Ε. (Γ)	70	1,55	1,04	527,47
Τ.Ε. (Α)	102	1,87	1,79	727,95
Σ.Χ. (Γ)	58	1,58	1,41	621,97
Ζ.Γ. (Γ)	50	1,55	1,54	644,68
Π.Β. (Γ)	78	1,53	0,80	504,81
Κ.Α. (Γ)	66	1,60	0,99	610,05
Σ.Χ. (Γ)	69,5	1,63	1,19	627,41

Πίνακας 21: Τιμές $TBK_{WBC}/μάζα$ και FFM/μάζα

Τα δύο μεγέθη σχετίζονται γραμμικά μέσω της σχέσης $y=0.0041 \cdot x - 1.263$ ($R^2=0.84$)



Γράφημα 9: Συσχετισμός $TBK_{WBC}/μάζα$ με FFM/μάζα

Ο συντελεστής R^2 είναι μικρότερος στις γραφικές παραστάσεις 8 ($R^2=0.82$) και 9 ($R^2=0.84$) από ότι στην 7 ($R^2=0.96$) γεγονός που σημαίνει ότι η συνάρτηση που αντιστοιχεί στο γράφημα 7 ταιριάζει καλύτερα στα δεδομένα. Αυτό οφείλεται στις τιμές από τις οποίες αποτελείται κάθε γραφική παράσταση καθώς και στον τρόπο με τον οποίο το πρόγραμμα προσαρμόζει και υπολογίζει την καλύτερη δυνατή συνάρτηση.

Γ.2 In vivo μετρήσεις ^{214}Bi

Γ.2.1 In vivo μετρήσεις ^{214}Bi σε ενήλικα άντρα

Την περίοδο από τις 26/10/2016 έως τις 13/2/2017 διενεργήθηκαν μετρήσεις ^{214}Bi στον άντρα εθελοντή ηλικίας 65 γ, μάζας σώματος 96,5 kg και ύψους 165 cm για την μελέτη της ειδικής ραδιενέργειας στο σώμα του. Ο εξεταζόμενος είναι μη καπνιστής, δεν αθλείται και είχε γευματίσει περίπου 3 h πριν από την έναρξη της κάθε μέτρησης. Ανάλογα με τις μετρήσεις ^{40}K και οι δώδεκα μετρήσεις του ^{214}Bi διαχωρίστηκαν σε δυο ομάδες των έξι μετρήσεων η κάθε μια. Στην πρώτη ομάδα, που έγινε από 26/10/2016 έως 2/2/2017, η τάση τροφοδοσίας των ανιχνευτών ήταν 950 V, ενώ στη δεύτερη ομάδα που ακολούθησε, η τάση ήταν ίση με 985 V. Χρησιμοποιήθηκε το ίδιο ομοίωμα όπως και στην παράγραφο (Γ.1.2) συνολικής μάζας 96.8 kg και συνολικού ύψους 171 cm.

Οι μετρήσεις ξεκινούσαν συνήθως στις 18:00, δηλαδή λίγο μετά τη δύση του ηλίου. Η θερμοκρασία στην αίθουσα ήταν σε όλες τις μετρήσεις σταθερή στους 20°C, ενώ η εξωτερική θερμοκρασία κυμαινόταν κατά του χρόνους μέτρησης συνήθως από 7°C έως 9°C. Οι μετρήσεις, με εξαίρεση την 11^η μέτρηση, πραγματοποιήθηκαν 0.5 ως 1.5 h μετά την προσέλευση του εξεταζόμενου στο γραφείο του, που βρίσκεται στον πρώτο όροφο του κτιρίου της Ιατρικής Φυσικής-Ακτινοφυσικής της Σχολής Επιστημών Υγείας του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, από την οικία του, όπου ήταν επί ~2.5 h (διαδρομές από και προς το Πανεπιστήμιο διάρκειας 15 min η κάθε μια). Παλαιότερες μετρήσεις έδειξαν ότι τα επίπεδα ραδονίου στο γραφείο και την οικία του εξεταζόμενου ήταν παρόμοια με συνέπεια να θεωρήσουμε ότι είχε σταθεροποιηθεί η ενεργότητα και η κατανομή των θυγατρικών στο σώμα του, αγνοώντας την μειωμένη συγκέντρωση στον αέρα κατά τη διάρκεια της επί 15 min μετακίνησής του από την οικία στο γραφείο του.

Στον πίνακα 22 παρουσιάζονται ο ρυθμός των καταμετρούμενων παλμών (cps) στην περιοχή ενδιαφέροντος του ^{214}Bi που χρησιμοποιήθηκε με κεντροειδές στα ~1.76 MeV στις πρώτες έξι μετρήσεις στον εξεταζόμενο και στο ομοίωμα υποστρώματος καθώς και ο καθαρός ρυθμός παλμών που προκύπτει από την αφαίρεση των δύο προηγούμενων τιμών.

a/a	Gross Main ²¹⁴ Bi / Live Time	Gross Bg ²¹⁴ Bi / Live Time	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ²¹⁴ Bi	<Live Time> (s)
1	2,209	1,878	0,331	1758
2	2,085	2,015	0,070	1824
3	2,066	1,898	0,168	1821
4	2,096	1,900	0,196	1808
5	2,078	1,926	0,152	1770
6	2,058	1,908	0,150	1793
Mean value	2,099	1,921	0,178	1796
sd	0,056	0,049	0,086	
cv	0,027	0,025	0,483	
CV _{poisson}	0,016	0,017	0,266	

Πίνακας 22: Μετρήσεις ²¹⁴Bi στον εξεταζόμενο (26/10/2016 – 2/2/2017)

Ο καθαρός μέσος ρυθμός κρούσεων στην περιοχή RoI του ²¹⁴Bi που έγιναν με τάση 950 V από τις 26/10/2016 έως 2/2/2017 ήταν 0.178 cps με τυπική απόκλιση sd=0.086. Ως εκ τούτου, ο πειραματικός συντελεστής μεταβλητότητας των έξι μετρήσεων, 48%, βρέθηκε σχεδόν διπλάσιος από τον αναμενόμενο θεωρητικό συντελεστή λόγω μεταβλητότητας Poisson στη στατιστική των παλμών και μόνο, που ήταν 27% (αγνοώντας τις πιθανές διαφορές στον όγκο και την ενεργότητα του εισπνεόμενου αέρα).

Για τον υπολογισμό της ολόσωμης ποσότητας ²¹⁴Bi χρησιμοποιήθηκε η σχέση Γ.4

$$TBBi = \frac{Rate^{214}Bi}{eff_{Bi}} \quad (\Gamma.4)$$

Η ανιχνευτική απόδοση ανά Bq ²¹⁴Bi υπολογίστηκε με βάση τη σχέση:

$$eff_{Bi} = 2,79923 \cdot 10^{-4} + 2,8692 \cdot 10^{-5} \cdot H - 2,2081 \cdot 10^{-8} \cdot M - 1,05 \cdot 10^{-7} \cdot H^2 + 8,4265 \cdot 10^{-15} \cdot M^2 + 1,0651 \cdot 10^{-10} \cdot H \cdot M \quad (\Gamma.5)$$

θεωρητική τιμή της απόδοσης όταν είναι σε λειτουργία και οι δεκαέξι ανιχνευτές του συστήματος και βρέθηκε ίση με $1.799 \cdot 10^{-3}$ cps/Bq. Το ποσοστό συνεισφοράς των τεσσάρων ανιχνευτών που δεν ήταν σε λειτουργία από τους πίνακες προσομοίωσης Monte Carlo για την περιοχή του ⁴⁰K από τον Σ. Βαλάκη, 2011 ήταν ίση με 16% για ομοίωμα μάζας 79.7kg (No15). Στη παρούσα εργασία θεωρήθηκε ότι η ποσοστιαία δεν διαφέρει σημαντικά ανάμεσα στους δύο σωματότυπους. Επομένως, η ανιχνευτική απόδοση του συστήματος για τον σωματότυπο του εξεταζόμενου όταν είναι ενεργοί οι δώδεκα από τους δεκαέξι ανιχνευτές θεωρήθηκε ίση με $1.511 \cdot 10^{-3}$ cps/Bq. Έτσι με βάση την πειραματική τιμή των (0.178 ± 0.086) cps υπολογίστηκε μέση ολόσωμη ποσότητα ²¹⁴Bi, TBBi στον εξεταζόμενο 118 ± 57 Bq (SEM=23 Bq) και ειδική ενεργότητα 1.22 ± 0.59 Bq/kg (SEM=0.24 Bq/kg).

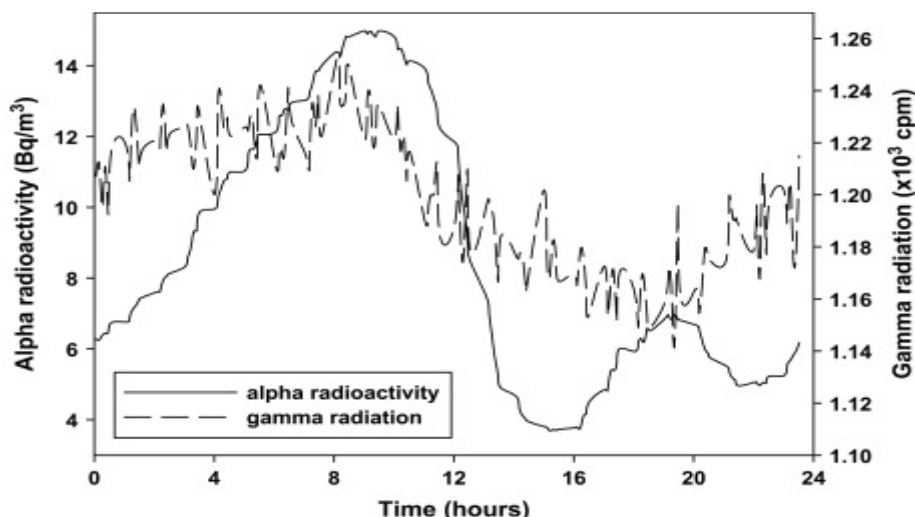
Στον πίνακα 23 παρουσιάζονται τα δεδομένα των έξι μετρήσεων ^{214}Bi κατά τις οποίες η τάση τροφοδοσίας των ανιχνευτών ήταν 985 V και έγιναν από 3/2/2017 έως 10/2/2017. Ο καθαρός μέσος ρυθμός κρούσεων στην περιοχή RoI του ^{214}Bi ήταν 0,349 cps με τυπική απόκλιση $sd=0.192$. Ο πειραματικός συντελεστής μεταβλητότητας, 55%, βρέθηκε σχεδόν τέσσερις φορές μεγαλύτερος από τον αναμενόμενο θεωρητικό συντελεστή λόγω τυχαιότητας Poisson στη στατιστική των παλμών και μόνο, που ήταν 14%. Θεωρώντας και σε αυτήν την περίπτωση ανιχνευτική απόδοση ίση με $1.511 \cdot 10^{-3}$ cps/Bq και με βάση την πειραματική τιμή των (0.349 ± 0.192) cps υπολογίστηκε μέση ολόσωμη ποσότητα TBBI στον εξεταζόμενο από τις εν λόγω έξι μετρήσεις 231 ± 127 Bq ($SEM=52$ Bq) και ειδική ενεργότητα 2.38 ± 1.32 Bq/kg ($SEM=0.54$ Bq/kg).

a/a	Gross Main ^{214}Bi / Live Time	Gross Bg ^{214}Bi / Live Time	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ^{214}Bi	<Live Time> (s)
7	2,304	2,046	0,258	1804
8	2,208	1,987	0,221	1774
9	2,316	2,033	0,284	1796
10	2,368	2,116	0,252	1785
11	2,276	1,546	0,731	1784
12	2,359	2,008	0,351	1787
Mean value	2,305	1,956	0,349	1788
sd	0,059	0,206	0,192	
cv	0,025	0,105	0,549	
CV _{Poisson}	0,016	0,017	0,140	

Πίνακας 23: Μετρήσεις ^{214}Bi στον εξεταζόμενο (3/2/2017 - 10/2/2017)

Παρατηρούμε στον Πίνακα 23 ότι η 11^η μέτρηση του εξετασθέντος έδειξε ιδιαίτερα αυξημένο καθαρό ρυθμό παλμών στην περιοχή RoI του ^{214}Bi (υπερδιπλάσια των υπολοίπων) που κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται στον χαμηλό ρυθμό παλμών στην περιοχή ^{214}Bi κατά την μέτρηση του ομοιώματος. Αυτή η μέτρηση πραγματοποιήθηκε στις 19:50-20:30, ενώ όλες οι υπόλοιπες μετρήσεις ομοιώματος πραγματοποιήθηκαν μεταξύ 17:00-19:00. Ενδέχεται τα επίπεδα ραδονίου και κατά επέκταση των θυγατρικών του την συγκεκριμένη χρονική περίοδο να είναι ακόμη χαμηλότερα σε σχέση με τις απογευματινές ώρες 17:00-19:00 (εικόνα 12). Λόγω του μικρού αριθμού μετρήσεων αυτή η μέτρηση είναι πιθανό να επηρεάζει την τιμή TBBI που υπολογίστηκε για τον εξεταζόμενο και βρέθηκε σχεδόν διπλάσια από την τιμή που προέκυψε από τις πρώτες έξι μετρήσεις με τάση τροφοδοσίας στα 950 V. Αφαιρώντας την τιμή αυτή η μέση τιμή του καθαρού ρυθμού κρούσεων των υπολοίπων πέντε μετρήσεων που έγιναν με τάση 985 V είναι 0.273 ± 0.05 cps και η ολόσωμη ποσότητα ^{214}Bi είναι 180 ± 32 Bq ($SEM=14$ Bq) και ειδική ενεργότητα 1.87 ± 0.33 Bq/kg ($SEM=0.15$ Bq/kg) έναντι 118 ± 57 Bq στην πρώτη σειρά των έξι μετρήσεων και 193 Bq σε μεμονωμένη μέτρηση που έγινε πριν από ~5.2 γ και για την οποία δεν διαθέτουμε δεδομένα της τοποθεσίας που βρισκόταν ο εξεταζόμενος πριν από τη μέτρηση.

Διενεργήθηκε t-test για τις μετρήσεις του ^{214}Bi υποστρώματος στις δυο ομάδες των 6 μετρήσεων. Με τιμή $p\text{-value}=0.692>0.05$ φαίνεται ότι δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στις μετρήσεις του ^{214}Bi εξαιτίας της αλλαγής της τάσης και της εποχής. Για τον λόγο αυτό υπολογίστηκε η ενεργότητα για το ^{214}Bi για το σύνολο των δώδεκα μετρήσεων όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 24.



Εικόνα 12: Μεταβολή ακτινοβολίας-γ και α κατά την διάρκεια της ημέρας στην Ξάνθη (Seftelis et.al, 2007).

Ο καθαρός μέσος ρυθμός κρούσεων στην περιοχή RoI του ^{214}Bi που βρέθηκε από τις συνολικά 12 μετρήσεις που έγιναν επί περίπου 110 ημέρες (μέσα Οκτωβρίου με μέσα Φεβρουαρίου του επόμενου έτους) ήταν 0.264 cps με τυπική απόκλιση $sd=0.168$. Ο πειραματικός συντελεστής μεταβλητότητας είναι ίσος με 63.6% αρκετά μεγαλύτερος από τον θεωρητικά αναμενόμενο αν η στατιστική διακύμανση οφείλονταν μόνο στη στατιστική των κρούσεων κατά Poisson, 18.2%. Με βάση την πειραματική τιμή των (0.264 ± 0.168) cps υπολογίστηκε όπως και στις προηγούμενες παραγράφους μέση τιμή του TB ^{214}Bi 175 ± 111 Bq , (SEM=32 Bq) με τον ίδιο τρόπο και ειδική ενεργότητα 1.81 ± 1.15 Bq/kg (SEM=0.33).

a/a	Gross Main ²¹⁴ Bi / Live Time	Gross Bg ²¹⁴ Bi / Live Time	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ²¹⁴ Bi	<Live Time> (s)
1	2,209	1,878	0,331	1758
2	2,085	2,015	0,070	1824
3	2,066	1,898	0,168	1821
4	2,096	1,900	0,196	1808
5	2,078	1,926	0,152	1770
6	2,058	1,908	0,150	1793
7	2,304	2,046	0,258	1804
8	2,208	1,987	0,221	1774
9	2,316	2,033	0,284	1796
10	2,368	2,116	0,252	1785
11	2,276	1,546	0,731	1784
12	2,359	2,008	0,351	1787
Mean value	2,202	1,938	0,264	1792
sd	0,121	0,144	0,168	
cv	0,055	0,074	0,636	
CV _{poisson}	0,016	0,017	0,182	

Πίνακας 24: Συνολικές μετρήσεις ²¹⁴Bi στον εξεταζόμενο

Λόγω της αμφιβολίας που υπήρξε όσον αφορά το κατά πόσο ήταν έγκυρη η 11^η μέτρηση διενεργήθηκε t-test για τις δύο ομάδες μετρήσεων του ²¹⁴Bi υποστρώματος θεωρώντας αυτήν την φορά ότι η δεύτερη ομάδα αποτελείται από 5 μετρήσεις και όχι 6. Στην περίπτωση αυτή η τιμή p-value βρέθηκε ίση με 0.033, γεγονός που δείχνει ότι παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά στις μετρήσεις που ενδέχεται να οφείλεται στις εποχιακές μεταβολές των θυγατρικών του ραδονίου στον αέρα αν και το δείγμα των μετρήσεων είναι μικρό.

Στον πίνακα 25 παρουσιάζονται εκ νέου ο ρυθμός των καταμετρούμενων παλμών (cps) στην περιοχή ενδιαφέροντος του ²¹⁴Bi στις in vivo μετρήσεις και στις μετρήσεις υποστρώματος συνοδευόμενες από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά την διάρκεια της μέτρησης ή λίγες ώρες πριν από τη μέτρηση (2-3h).

a/a	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ^{214}Bi	Gross Bg ^{214}Bi / Live Time	TBBi (Bg)	Καιρικές συνθήκες	Ημερομηνία
1	0,331	1,878	219	Ηλιοφάνεια	26/10/2016
2	0,070	2,015	46	Βροχή	4/11/2016
3	0,168	1,898	111	Ηλιοφάνεια	20/1/2017
4	0,196	1,900	130	Συννεφιά	25/1/2017
5	0,152	1,926	100	Συννεφιά	1/2/2107
6	0,150	1,908	99	Συννεφιά	2/2/2017
7	0,258	2,046	171	Βροχή	3/2/2017
8	0,221	1,987	146	Βροχή	6/2/2017
9	0,284	2,033	188	Βροχή	7/2/2017
10	0,252	2,116	167	Ηλιοφάνεια	8/2/2017
12	0,351	2,008	232	Ηλιοφάνεια	10/2/2017
Mean value	0,221	1,974	146		
sd	0,084	0,059	56		
cv	0,380	0,030			
CV _{poisson}	0,218	0,017			

Πίνακας 25: Καιρικές συνθήκες κατά την διάρκεια των μετρήσεων

Για να διαπιστωθεί αν οι καιρικές συνθήκες επηρεάζουν τις τιμές του ^{214}Bi τόσο στην αίθουσα του ΜΟΑ όσο και στο σώμα του εθελοντή διενεργήθηκε independent t-test μεταξύ των μετρήσεων κατά τις οποίες επικρατούσαν οι ίδιες καιρικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 26.

Καιρικές Συνθήκες	p-value	
	Καθαρά cps	Bg cps
Ηλιοφάνεια - Βροχή	0,330	0,454
Ηλιοφάνεια - Συννεφιά	0,084	0,332
Βροχή - Συννεφιά	0,499	0,001

Πίνακας 26: Τιμές p-value ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες

Καιρικές Συνθήκες	Καθαρά cps±sd	Bg cps±sd
Ηλιοφάνεια	0,275±0,083	1,975±0,110
Βροχή	0,208±0,095	2,020±0,025
Συννεφιά	0,166±0,026	1,911±0,013

Πίνακας 27: Μέσες τιμές cps ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες

Αν και εμφανίζονται διαφορές στις μέσες τιμές τόσο των καθαρών cps όσο και των cps του υποστρώματος, δεν παρατηρήθηκε από τα στατιστικά τεστ εξάρτηση των επιπέδων ^{214}Bi από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον πριν ή κατά την διάρκεια της μέτρησης τόσο στις μετρήσεις στον εξεταζόμενο όσο και στις μετρήσεις του ομοιώματος υποστρώματος εκτός από τις μετρήσεις όταν είχε βροχή και συννεφιά που η

τιμή p-value είναι μικρότερη από 0.05. Το δείγμα όμως είναι μικρό για να θεωρηθεί απολύτως σωστό το συμπέρασμα αυτό.

Γ.2.2 In vivo μετρήσεις ^{214}Bi σε ενήλικη γυναίκα

Παράλληλα με την μελέτη του καλίου στο σώμα της ενήλικης γυναίκας (παράγραφος Γ.1.1) πραγματοποιήθηκε και μελέτη του ολόσωμου ^{214}Bi για να διαπιστωθούν οι πιθανές μεταβολές του αναλόγως με την ώρα της ημέρας που διενεργήθηκε η κάθε μέτρηση, αλλά και την τοποθεσία παραμονής της εξεταζόμενης πριν από την μέτρηση.

Οι τριάντα μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά το ίδιο χρονικό διάστημα, από 11/10/2016 έως 8/12/2016 και χρησιμοποιήθηκε το ίδιο ομοίωμα υποστρώματος συνολικής μάζας 50.6 kg και ύψους 142 cm.

Κατά το δίμηνο των μετρήσεων ο καιρός ήταν γενικά αίθριος με μερικές βροχερές ημέρες και εξωτερική θερμοκρασία κατά το χρόνο των μετρήσεων που κυμαίνονταν από 8°C έως 25°C. Η θερμοκρασία στην αίθουσα του MOA κυμαίνονταν από 10°C έως 20°C. Η εξεταζόμενη είναι μη καπνίστρια και δεν αθλούνταν κατά το διάστημα των μετρήσεων. Αυτοί οι δύο παράγοντες θα μπορούσαν να επηρεάσουν τις μετρήσεις για αυτό το λόγο και αναφέρονται.

Η πρώτη ομάδα μετρήσεων έγινε πρωινές ώρες (11:00-13:00) και αφορούσε την μελέτη των επιπέδων ^{214}Bi στο σώμα της εξεταζόμενης, που σχετίζεται σε ένα βαθμό με την παραμονή της στην κατοικία της κατά την διάρκεια της προηγούμενης νύχτας. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν αμέσως μετά την προσέλευση της στην αίθουσα του MOA από το σπίτι της και ενώ είχε παρέλθει ~1.0 h από την στιγμή που έφυγε από αυτό. Κατά την διάρκεια αυτής της ώρας βρισκόταν στο ύπαιθρο ή σε λεωφορείο, το οποίο την μετέφερε από το κέντρο της πόλης των Ιωαννίνων στην Πανεπιστημιούπολη.

Η δεύτερη ομάδα μετρήσεων πραγματοποιήθηκε κατά τις μεσημβρινές ώρες (15:00-17:00) και αφού η εξεταζόμενη είχε παραμείνει τουλάχιστον 2.5 h ώρες στο γραφείο των μεταπτυχιακών φοιτητών, που βρίσκεται στον πρώτο όροφο του κτιρίου της Ιατρικής Φυσικής-Ακτινοφυσικής της Σχολής Επιστημών Υγείας του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Η τρίτη και τελευταία ομάδα μετρήσεων πραγματοποιήθηκε τις απογευματινές ώρες (18:00-20:00) μετά από παραμονή διάρκειας ~2.5 h της εξεταζόμενης στην αίθουσα του MOA. Ως εκ τούτου, ο χρόνος έναρξης των τριών μετρήσεων ήταν περίπου 1, 4 και 7 h μετά από την αναχώρηση της εξεταζόμενης από την κατοικία. Ανάμεσα στις μετρήσεις μεσολάβησαν ενίοτε μόνο ελαφριά γεύματα.

Ο ρυθμός των καταμετρούμενων παλμών (cps) στην περιοχή ενδιαφέροντος (RoI) του ^{214}Bi που χρησιμοποιήθηκε με κεντροειδές στα ~1.76 MeV στις in vivo μετρήσεις και στις μετρήσεις του υποστρώματος, παρουσιάζεται στον πίνακα 27. Ο καθαρός μέσος ρυθμός κρούσεων στο σύνολο των μετρήσεων ήταν (0.176 ± 0.094) cps. Ως εκ τούτου, ο συντελεστής μεταβλητότητας για το σύνολο των μετρήσεων ήταν 54%, ενώ ο αναμενόμενος θεωρητικός συντελεστής λόγω τυχαιότητας κατά Poisson και μόνο, ήταν 29%. Άρα βρέθηκε συντελεστής μεταβλητότητας σχεδόν διπλάσιος από τον θεωρητικό. Για τον λόγο αυτό διαχωρίστηκαν οι τριάντα μετρήσεις σε τρεις ομάδες, ανάλογα με τον τόπο παραμονής της εξεταζόμενης λίγες ώρες πριν από τη μέτρηση. Στους πίνακες 29, 30 και 31 παρουσιάζονται οι μετρήσεις ομαδοποιημένες ως προς την τοποθεσία παραμονής της εξεταζόμενης πριν από την μέτρηση, δηλαδή σε μετρήσεις όταν η εξεταζόμενη προσήλθε από την κατοικία της (πρωί), από το γραφείο στον πρώτο όροφο του Εργαστηρίου (μεσημέρι) και από την αίθουσα του MOA (απόγευμα), αντίστοιχα.

a/a	Gross Main ²¹⁴ Bi / Live Time	Gross Bg ²¹⁴ Bi / Live Time	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ²¹⁴ Bi	<Live Time> (s)
1	2,520	2,160	0,359	1734
2	2,165	2,109	0,056	1702
3	2,234	2,072	0,162	1717
4	2,211	2,081	0,130	1720
5	2,138	2,032	0,106	1717
6	2,105	2,033	0,071	1701
7	2,594	2,237	0,356	1644
8	2,419	2,137	0,282	1750
9	2,175	2,034	0,141	1743
10	2,650	2,275	0,375	1669
11	2,365	2,044	0,321	1705
12	2,184	2,095	0,088	1729
13	2,343	2,127	0,216	1705
14	2,166	1,979	0,187	1587
15	2,059	1,936	0,123	1605
16	2,231	1,964	0,267	1748
17	2,472	2,184	0,288	1619
18	2,215	2,095	0,120	1723
19	2,151	2,004	0,147	1750
20	2,438	2,240	0,197	1644
21	2,226	2,102	0,124	1798
22	2,297	2,049	0,248	1681
23	2,189	2,038	0,152	1606
24	2,004	1,890	0,114	1755
25	2,085	2,025	0,060	1703
26	2,197	2,120	0,077	1730
27	2,197	2,085	0,112	1787
28	2,139	2,048	0,091	1848
29	2,126	1,996	0,130	1701
30	2,193	2,026	0,167	1717
Mean value	2,249	2,074	0,176	1708
sd	0,158	0,088	0,094	
cv	0,070	0,042	0,538	
CV _{poisson}	0,016	0,017	0,287	

Πίνακας 28: Συνολικές μετρήσεις ²¹⁴Bi στην εξεταζόμενη

a/a	Gross Main ²¹⁴ Bi / Live Time	Gross Bg ²¹⁴ Bi / Live Time	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ²¹⁴ Bi	<Live Time> (s)
1	2,520	2,160	0,359	1734
4	2,211	2,081	0,130	1720
7	2,594	2,237	0,356	1644
10	2,650	2,275	0,375	1669
13	2,343	2,127	0,216	1705
17	2,472	2,184	0,288	1619
20	2,438	2,240	0,197	1644
22	2,297	2,049	0,248	1681
23	2,189	2,038	0,152	1606
25	2,085	2,025	0,060	1703
Mean value	2,380	2,142	0,238	1672
sd	0,186	0,092	0,107	
cv	0,078	0,043	0,450	
CV _{poisson}	0,016	0,017	0,218	

Πίνακας 29: Μετρήσεις από την οικία (πρωινές)

a/a	Gross Main ²¹⁴ Bi / Live Time	Gross Bg ²¹⁴ Bi / Live Time	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ²¹⁴ Bi	<Live Time> (s)
2	2,165	2,109	0,056	1702
5	2,138	2,032	0,106	1717
8	2,419	2,137	0,282	1750
11	2,365	2,044	0,321	1705
14	2,166	1,979	0,187	1587
16	2,231	1,964	0,267	1748
18	2,215	2,095	0,120	1723
21	2,226	2,102	0,124	1798
28	2,139	2,048	0,091	1848
30	2,193	2,026	0,167	1717
Mean value	2,226	2,054	0,172	1730
sd	0,094	0,057	0,090	
cv	0,042	0,028	0,523	
CV _{poisson}	0,016	0,017	0,289	

Πίνακας 30: Μετρήσεις από το γραφείο (μεσημβρινές)

a/a	Gross Main ²¹⁴ Bi / Live Time	Gross Bg ²¹⁴ Bi / Live Time	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ²¹⁴ Bi	<Live Time> (s)
3	2,234	2,072	0,162	1717
6	2,105	2,033	0,071	1701
9	2,175	2,034	0,141	1743
12	2,184	2,095	0,088	1729
15	2,059	1,936	0,123	1605
19	2,151	2,004	0,147	1750
24	2,004	1,890	0,114	1755
26	2,197	2,120	0,077	1730
27	2,197	2,085	0,112	1787
29	2,126	1,996	0,130	1701
Mean value	2,143	2,026	0,117	1722
sd	0,071	0,073	0,030	
cv	0,033	0,036	0,259	
CV _{poisson}	0,016	0,017	0,419	

Πίνακας 31: Μετρήσεις από την αίθουσα του MOA (απογευματινές)

Η ομαδοποίηση των μετρήσεων είχε ως αποτέλεσμα η τυπική απόκλιση των καθαρών παλμών να μειωθεί από 0.094 cps σε μέσο όρο 0.076 cps $((0.170+0.090+0.030)/3)$, άρα μειώθηκε κατά ~20%.

Για να ελεγχθεί αν η παρατηρηθείσα τάση μεταβολής της ολόσωμης ποσότητας ²¹⁴Bi στη διάρκεια της ημέρας ήταν στατιστικά σημαντική, έγιναν έλεγχοι με t-test ανάμεσα στις τρεις ομάδες (Πίνακας 32) με την υπόθεση ότι οι κατανομές τιμών στις τρεις ομάδες μετρήσεων δεν απείχαν πολύ από τη κανονική κατανομή. Η μέση τιμή του ρυθμού παλμών που καταγράφηκαν το πρωί περίπου 1.0 ως 1.5 h μετά την αναχώρηση από την κατοικία, (0.238±0.107) cps, δεν βρέθηκε να διαφέρει στατιστικά σημαντικά ($p=0.153>0.05$) από την αντίστοιχη τιμή το μεσημέρι, (0.172±0.090) cps, μετά από παραμονή στο γραφείο του 1^{ου} ορόφου, ήταν όμως μεγαλύτερη από αυτήν που βρέθηκε το απόγευμα, (0.117±0.030) cps μετά από παραμονή στην αίθουσα του MOA ($p=0.003<0.05$).

Χρόνος	²¹⁴ Bi cps±sd		p-value
Πρωί	0,238±0,107	πρωί - μεσημέρι	0,153
Μεσημέρι	0,172±0,090	μεσημέρι - απόγευμα	0,094
Απόγευμα	0,117±0,030	πρωί - απόγευμα	0,003

Πίνακας 32: Συγκεντρωτικές τιμές ²¹⁴Bi και p-values

Οι πρώτες δεκαπέντε μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ανά τρεις την ίδια μέρα για αυτό διενεργήθηκε paired t-test μεταξύ τους. Και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των πρωινών και των απογευματινών μετρήσεων ($p\text{-value}=0.015$), αλλά όχι μεταξύ των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν το πρωί και το μεσημέρι και μεταξύ των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν το μεσημέρι και το απόγευμα.

	p-value
πρωί - μεσημέρι	0,138
μεσημέρι - απόγευμα	0,264
πρωί - απόγευμα	0,015

Πίνακας 33: Τιμές p-value για τις πρώτες δεκαπέντε μετρήσεις

Στα ίδια συμπεράσματα θα κατέληγε προφανώς κανείς αν συνέκρινε και τις τιμές της ολόσωμης ποσότητας ^{214}Bi ανάλογα με το χρόνο της μέτρησης στη διάρκεια της ημέρας, που υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τη σχέση Γ.4 (η ανιχνευτική απόδοση υπολογίστηκε από την σχέση Γ.5) και βρέθηκε 0.0019378, όταν λειτουργούσαν και οι δεκαέξι ανιχνευτές του συστήματος. Όμως στη διάρκεια των μετρήσεων λειτουργούσαν μόνο δώδεκα ανιχνευτές για αυτό και έγινε αφαίρεση του ποσοστού συνεισφοράς τους όπως υπολογίστηκε από τους πίνακες προσομοίωσης Monte Carlo για την περιοχή του ^{40}K από τον Σ. Βαλάκη (2011). Θεωρώντας ότι η συνεισφορά των ανιχνευτών δεν διαφέρει σημαντικά στις δύο περιοχές ενεργειών υπολογίστηκε συνεισφορά ίση με 17%. Επομένως η απόδοση του συστήματος ανά Bq ^{214}Bi για τον συγκεκριμένο σωματότυπο είναι ίση με 0.001608 cps/Bq.

Στον πίνακα 34 δίνονται οι μέσες τιμές της μέσης ενεργότητας, της ειδικής ενεργότητας και τα τυπικά σφάλματα τους για το ^{214}Bi των τριών ομάδων μετρήσεων (πρωί, μεσημέρι, απόγευμα).

	TBBi (Bq)	Ειδική ενεργότητα (Bq/kg)
Κατοικία	148±21	2,81±1,26
Γραφείο	107±18	2,03±1,06
Αίθουσα ΜΟΑ	73±6	1,39±0,36

Πίνακας 34: Ολόσωμη ποσότητα ^{214}Bi της εξεταζόμενης ανάλογα με το χρόνο μέτρησης

Οι τιμές της μέσης ποσότητας ^{214}Bi που βρέθηκαν στο σώμα της εθελόντριας δεν θεωρούνται ποιοτικά απρόσμενες, διότι η ενεργότητα στο σώμα ενός ανθρώπου εξαρτάται και από την ποιότητα του αέρα που εισέπνευσε τις τελευταίες ώρες. Οι Kalef-Ezra και Valakis (2016) μέτρησαν σε 24 γυναίκες που κατοικούν στα Ιωάννινα μέση συγκέντρωση ^{214}Bi (1.5 ± 0.9 Bq/kg) κατά την ψυχρή περίοδο του έτους. Σε άλλη μελέτη (Valakis και Kalef-Ezra, 2014) που διενεργήθηκε με τοποθέτηση παθητικών ανιχνευτών ραδονίου σε διάφορους χώρους του εργαστηρίου επί αρκετούς μήνες, βρέθηκε ότι στο γραφείο των μεταπτυχιακών φοιτητών του 1^{ου} ορόφου η μέση συγκέντρωση ραδονίου στον αέρα ~ 62 Bq/m³ στη διάρκεια μερικών μηνών κατά την φθινοπωρινή και χειμερινή περίοδο, ήταν παρόμοια με αυτήν στην αίθουσα του ΜΟΑ, στον χώρο όπου βρισκόταν η εξεταζόμενη πριν τις μετρήσεις. Από την άλλη πλευρά, η μέση τιμή συγκέντρωσης ραδονίου σε διάφορα σπίτια στην πόλη των Ιωαννίνων ήταν 92 Bq/m³, με μεγάλη διασπορά τιμών, τιμή αρκετά μεγαλύτερη από τους δύο χώρους του εργαστηρίου.

Έχει βρεθεί εμπειρικά από τους Lykken et al, ότι κατά μέσο όρο αντιστοιχεί ειδική ραδιενέργεια ^{214}Bi 21 Bq/kg στο ανθρώπινο σώμα για κάθε 1 kBq/m³ ^{222}Rn στον αέρα. Υποθέτοντας ότι η συγκέντρωση ραδονίου στον αέρα του σπιτιού της εξεταζόμενης ήταν 100 Bq/m³ και ότι η πρώτη ομάδα μετρήσεων σχετιζόταν κυρίως με την έκθεσή στην ενεργότητα του αέρα της κατοικίας όπου παρέμεινε η εξεταζόμενη το βράδυ, σε περίπτωση ισορροπίας θα αναμενόταν ειδική ενεργότητα ~ 2.1 Bq/kg. Έστω ότι κατά την

μετακίνησή της από την κατοικία στο εργαστήριο η συγκέντρωση ραδονίου στο ύπαιθρο ήταν 10 Bq/m^3 , οπότε η θεωρητική τιμή ειδικής ενεργότητας σε περίπτωση ισορροπίας θα ήταν 0.21 Bq/kg . Ανάλογα με τη διάρκεια μετακίνησης και το μεταβολισμό της εξεταζόμενης, θα αναμένονταν με βάση τα εμπειρικά στοιχεία του Lykken και συν. να βρεθεί κατά την πρωινή μέτρηση ειδική ενεργότητα μεταξύ 0.2 και 2.1 Bq/kg , μετρήθηκε όμως μέση τιμή και τυπική απόκλιση (2.81 ± 1.26) Bq/kg .

Η συγκέντρωση ραδονίου στο γραφείο του πρώτου ορόφου και στην αίθουσα του ΜΟΑ που μετρήθηκε παλιότερα ήταν 62 Bq/m^3 , τιμή που αντιστοιχεί σε ειδική ενεργότητα 1.30 Bq/kg σε συνθήκες ισορροπίας. Οι απογευματινές μετρήσεις που έγιναν με πρακτικά σταθερές συνθήκες έδειξαν μέση τιμή $1.39 \pm 0.36 \text{ Bq/kg}$, τιμή κοντινή της αναμενόμενης. Οι τιμές των μεσημβρινών μετρήσεων αναμένονταν να είναι μεταξύ των πρωινών και των απογευματινών. Πράγματι βρέθηκε ειδική ενεργότητα $2.03 \pm 1.06 \text{ Bq/kg}$, τιμή μεταξύ της πρωινής, $2.81 \pm 1.26 \text{ Bq/kg}$ και της απογευματινής, $1.39 \pm 0.36 \text{ Bq/kg}$.

Οι συντελεστές επαναληπτικότητας των μετρήσεων ενεργότητας ^{214}Bi που έγιναν το πρωί και το μεσημέρι, ήταν διπλάσιοι από τους θεωρητικά αναμενόμενους. Ως εκ τούτου διερευνήθηκαν οι εξής παράγοντες που πιθανώς να συνέτειναν στο φαινόμενο αυτό.

α) αστάθεια στην ταχύτητα κίνησης της κλίνης στη διάρκεια της ημέρας, π.χ. λόγω αστάθειας του δικτύου ηλεκτρικής παροχής στο κινητήρα της κλίνης (ο κινητήρας δεν καλύπτεται από σταθεροποιητή τάσης όπως το υπόλοιπο σύστημα)

β) μεταβολές στην ανιχνευτική απόδοση της διάταξης στη διάρκεια της ημέρας (π.χ. στην ικανότητα ανάλυσης των παλμών που παράγονται κατά τον σπινθηρισμό)

γ) πραγματικές μεταβολές στην ενεργότητα ^{214}Bi στο σώμα της εξεταζόμενης που εξαρτώνται από μεταβολές στην ραδιενέργεια του ραδονίου και των θυγατρικών του στον αέρα της αίθουσας του ΜΟΑ, της κατοικίας της εξεταζόμενης και στον αέρα στο ύπαιθρο, και από μεταβολές στην θερμοκρασία στην αίθουσα μετρήσεων και τα εκάστοτε καιρικά φαινόμενα (βροχόπτωση).

α. Οι μέσοι πραγματικοί χρόνοι ανά μέτρηση (real time), κατά τις τρεις χρονικές περιόδους, δηλαδή οι χρόνοι ανάμεσα στη έναρξη και την διακοπή της μέτρησης της εξεταζόμενης ήταν 2013, 2019 και 2031 s, με συντελεστές μεταβλητότητας 0.5%, 0.7% και 0.7%, αντίστοιχα. Η μικρή διασπορά των τιμών δεν δικαιολογεί την αύξηση στις τιμές του συντελεστή μεταβλητότητας. Επιπλέον βρέθηκε ότι οι διαφορές ανάμεσα στις τρεις μέσες τιμές δεν ξεπερνούν το 1% και ότι οι χρόνοι το απόγευμα ήταν στατιστικά σημαντικά μεγαλύτεροι από ότι το πρωί ($p=0.003$ Πίνακας 36), πιθανώς δε και από το μεσημέρι ($p=0.054$), εύρημα που ενδέχεται να σχετίζεται με συχνά σημειούμενη μικρή πτώση της τάσης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω αυξημένου φόρτου αμέσως μετά τη δύση του ηλίου που συνεπάγεται χαμηλότερη ταχύτητα κίνησης της κλίνης.

	<Live time> (s)			<Real time> (s)		
a/a	Πρωί	Μεσημέρι	Απόγευμα	Πρωί	Μεσημέρι	Απόγευμα
1	1734	1702	1717	2009	2007	2012
2	1720	1717	1701	2012	2017	2017
3	1644	1750	1743	2005	2000	2015
4	1669	1705	1729	2014	2029	2051
5	1705	1587	1605	2022	2019	2046
6	1619	1748	1750	2022	2003	2027
7	1644	1723	1755	2027	2012	2026
8	1681	1798	1730	2007	2029	2037
9	1606	1848	1787	1999	2046	2042
10	1703	1717	1701	2015	2025	2044
Mean value	1672	1730	1722	2013	2019	2031
sd	43	68	49	9	14	15

Πίνακας 35: Μέσες τιμές Live time και Real time των *in vivo* μετρήσεων

	p-value
πρωί - μεσημέρι	0,306
μεσημέρι - απόγευμα	0,054
πρωί - απόγευμα	0,003

Πίνακας 36 Τιμές p-value real time (s)

β. Παρατηρήθηκε ότι ο μέσος νεκρός χρόνος των πρωινών μετρήσεων ήταν περίπου 17%, έναντι 14% και 15% κατά τις άλλες δυο ομάδες μετρήσεων, ως εκ τούτου συγκρίθηκαν και οι χρόνοι συλλογής δεδομένων (live time). Ο μέσος χρόνος των πρωινών μετρήσεων (1672 ± 43 s) ήταν στατιστικά σημαντικά μικρότερος από αυτόν των μεσημβρινών (1730 ± 68 s) και των απογευματινών (1722 ± 49 s) ($p=0.038$ και 0.028 αντίστοιχα), διαφορές που πλησιάζουν το 1.0 min (Πίνακας 35) και προφανώς δεν οφείλονται αποκλειστικά σε μεταβολές στην ταχύτητα κίνησης που συμβάλουν σε ποσοστιαία μεταβολή ~1% στην κατά 3% μεταβολή του χρόνου συλλογής δεδομένων.

	p-value
πρωί - μεσημέρι	0,038
μεσημέρι - απόγευμα	0,774
πρωί - απόγευμα	0,028

Πίνακας 37: Τιμές p-value live time (s)

Ένας άλλος παράγοντας που πιθανώς να επηρεάζει τη διαφορά των χρόνων συλλογής δεδομένων, άρα και το ποσοστό του νεκρού χρόνου, είναι η θερμοκρασία των σπινθηριστών, δεδομένου ότι εκτός των άλλων, η σταθερά του χρόνου αποδιέγερσης της κύριας συνιστώσας σπινθηρισμού του NaI(Tl) εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σπινθηριστή. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τον κατασκευαστή των ενισχυτών τύπου TC-247/Ortec που χρησιμοποιήθηκαν, ο χρόνος για το μέγιστο του παλμού εξόδου είναι 2.0 μ s και το ύψος του μειώνεται στο 1% σε χρόνο 5.6 μ s. Τις πρωινές ώρες η θερμοκρασία στην αίθουσα του MOA, 14-16°C, ήταν μικρότερη από ότι τις μεσημβρινές και τις

απογευματινές που ήταν 19-21°C. Όπως φαίνεται στην εικόνα 13 (Bicron) μια μεταβολή θερμοκρασίας από 15°C στους 20°C μπορεί να οδηγήσει σε μεταβολή του χρόνου αποδιέγερσης κατά ~7%, γεγονός που ενδέχεται να επηρεάζει τον αριθμό των καταγεγραμμένων παλμών χρησιμοποιώντας σταθερό χρόνο διαμόρφωσης του σήματος εξόδου (shaping time) των ενισχυτών. Η ενεργειακή βαθμονόμηση του MOA κατά τις πρωινές ώρες πιθανώς να έγινε σε ακόμη πιο χαμηλή θερμοκρασία. Σημειώνεται ότι λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας του μετρητή και της θέσης των ανιχνευτών στο τούνελ θωράκισης, η θερμοκρασία των ανιχνευτών πιθανώς να ήταν το πρωί ακόμα μικρότερη από αυτήν του αέρα εκτός του τούνελ θωράκισης (το βράδυ δεν θερμαίνεται η αίθουσα) επομένως, ενδέχεται η μεταβολή της θερμοκρασίας των σπινθηριστών στη διάρκεια της ημέρας να ξεπερνά τους 5°C.

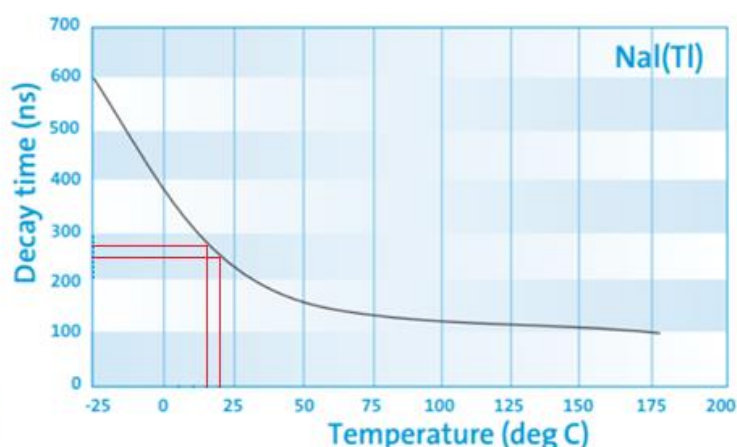


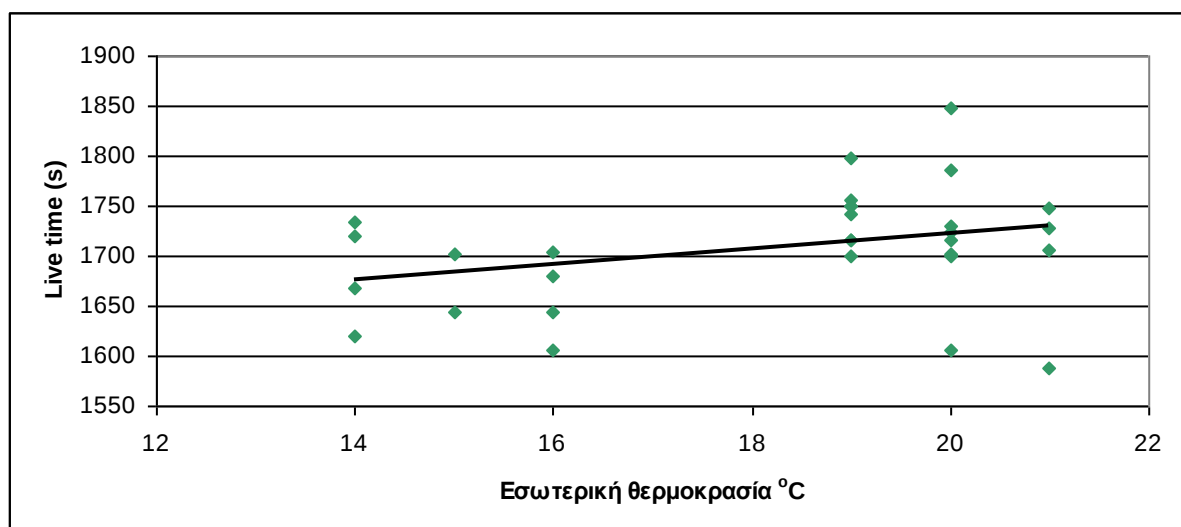
Figure 3. Temperature dependence of the decay time of NaI(Tl)

Εικόνα 13: Εξάρτηση σταθεράς χρόνου αποδιέγερσης από την θερμοκρασία

Για να διερευνηθεί αυτό το ενδεχόμενο μελετήθηκε η πιθανή επίδραση της θερμοκρασίας του δωματίου στο χρόνο συλλογής δεδομένων (Live time). Με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 38 και του Γραφήματος 10 δεν μπορεί να αποκλεισθεί η θερμοκρασία στην αίθουσα του MOA να έχει επίπτωση στην ανιχνευτική του απόδοση (ανιχνευτές και ηλεκτρονική επεξεργασία του σήματος). Για να βρεθεί αν υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ του χρόνου συλλογής και της θερμοκρασίας στην αίθουσα διενεργήθηκε test γραμμικής συσχέτισης Pearson από το οποίο βρέθηκε συντελεστής γραμμικής συσχέτισης $r=0.323$ και τιμή $p\text{-value}=0.082>0.05$ επομένως, δεν μπορεί να αποφασισθεί με βεβαιότητα αν υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών.

a/a	<Live time> (s)	Εσωτερική Θερμοκρασία
1	1734	14
4	1720	14
7	1644	15
10	1669	14
13	1705	16
17	1619	14
20	1644	16
22	1681	16
23	1606	16
25	1703	15
2	1702	20
5	1717	19
8	1750	19
11	1705	21
14	1587	21
16	1748	21
18	1723	20
21	1798	19
28	1848	20
30	1717	19
3	1717	20
6	1701	19
9	1743	19
12	1729	21
15	1605	20
19	1750	19
24	1755	19
26	1730	20
27	1787	20
29	1701	20

Πίνακας 38: Χρόνοι συλλογής των δεδομένων και θερμοκρασία αίθουσας MOA κατά την μέτρηση



Γράφημα 10: Live time ως προς την θερμοκρασία της αίθουσας του MOA

γ. Ένας παράγοντας που πιθανώς να συντέλινε ο συντελεστής μεταβλητότητας των καθαρών cps των *in vivo* μετρήσεων που έγιναν τις πρωινές και τις μεσημβρινές ώρες να είναι πολύ μεγαλύτερος από τη θεωρητική τιμή, μπορεί να είναι πιθανές μεταβολές στο σώμα της εξεταζόμενης, που εξαρτάται εκτός των άλλων από την ενεργότητα του ραδονίου και των θυγατρικών του στον εισπνεόμενο αέρα. Για παράδειγμα είναι γνωστό ότι η βροχή συνήθως οδηγεί σε μειωμένη συγκέντρωση ραδιενέργειας στο ύπαιθρο. Σε έξι από τις τριάντα μετρήσεις προηγήθηκε της μέτρησης βροχή ή έβρεχε κατά την διάρκεια τους (Πίνακας 38). Αρχικά διενεργήθηκε independent t-test των τιμών υποστρώματος στο RoI του ^{214}Bi μεταξύ των 6 τιμών (τέσσερις πρωινές και δυο απογευματινές) κατά τις οποίες υπήρχε βροχή στη διάρκεια της μέτρησης ή λίγο νωρίτερα και των υπολοίπων κατά την διάρκεια των οποίων δεν έβρεχε. Βρέθηκε $p\text{-value}=0.93$ γεγονός που δείχνει ότι δεν βρέθηκε να υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στα μετρούμενα επίπεδα ^{214}Bi στην αίθουσα του MOA κατά τις βροχερές και μη βροχερές ημέρες. Παρόμοιο ήταν το εύρημα και στους καθαρούς ρυθμούς της κύριας μέτρησης, άρα και στην ποσότητα ^{214}Bi στο σώμα της εξεταζόμενης ($p\text{-value}=0.94$) με βάση τα δεδομένα του μικρού μας στατιστικού δείγματος.

a/a	Gross Main ^{214}Bi / Live Time	Gross Bg ^{214}Bi / Live Time	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ^{214}Bi	Καιρικές συνθήκες
1	2,520	2,160	0,359	Ασθενής βροχή
3	2,234	2,072	0,162	Προηγήθηκε βροχή
20	2,438	2,240	0,197	Ασθενής βροχή
23	2,189	2,038	0,152	Βροχή
24	2,004	1,890	0,114	Προηγήθηκε βροχή
25	2,085	2,025	0,060	Ασθενής βροχή
Mean value	2,245	2,071	0,17	
sd	0,200	0,121	0,10	

Πίνακας 39: Μετρήσεις κατά τις οποίες έβρεχε

Η μέση τιμή του ρυθμού στην περιοχή του ^{214}Bi κατά τις ημέρες που εκδηλώθηκε βροχόπτωση είναι 2.24 ± 0.20 cps για την κύρια μέτρηση και 2.07 ± 0.12 cps για την μέτρηση υποστρώματος. Ενώ τις ημέρες που δεν έβρεχε η μέση τιμή του ρυθμού παλμών στην περιοχή του ^{214}Bi είναι 2.25 ± 0.15 cps και 2.07 ± 0.08 cps για την κύρια μέτρηση και την μέτρηση υποστρώματος αντίστοιχα. Επιπλέον από το t-test μεταξύ των τεσσάρων πρωινών μετρήσεων του υποστρώματος κατά τις οποίες έβρεχε και των έξι που δεν έβρεχε, δεν βρέθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά ($p\text{-value}=0.499$).

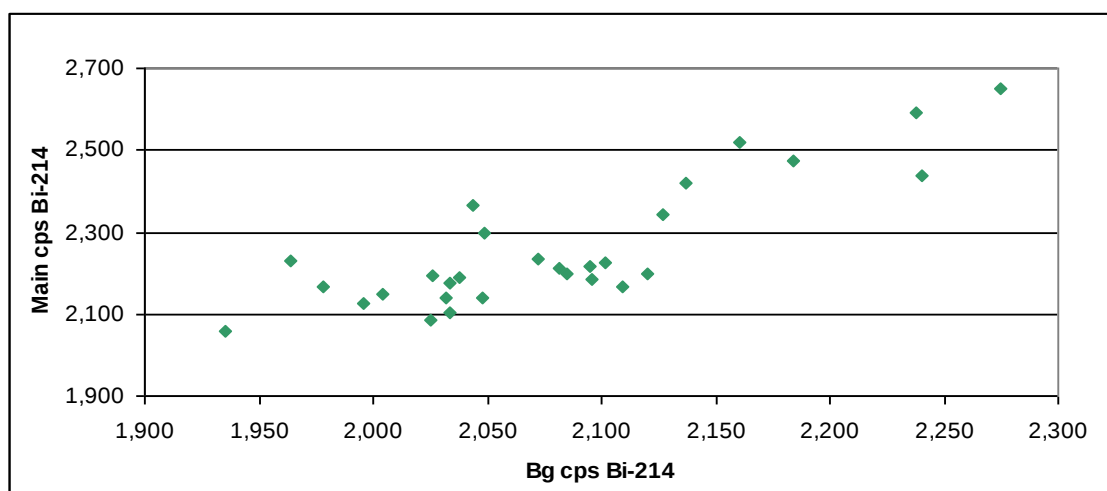
Ένας άλλο πιθανός παράγοντας είναι η ραδιενέργεια στην αίθουσα του MOA. Παρόλο που οι ανεμιστήρες στην αίθουσα του MOA παρέμεναν ανοιχτοί όλη την ημέρα σε λειτουργία εξαναγκασμένης εισαγωγής αέρα, από στατιστικό έλεγχο διαπιστώθηκε ότι οι τιμές του υποστρώματος ^{214}Bi κατά τις πρωινές μετρήσεις του ομοιώματος υποστρώματος, (2.142 ± 0.092) cps, ήταν υψηλότερες (πίνακες 29,30,31 και 40) σε σχέση με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν τις μεσημβρινές και απογευματινές ώρες, (2.054 ± 0.057) cps και (2.026 ± 0.073) cps, αντίστοιχα. Άρα κατά την παραμονή της εξεταζόμενης στην αίθουσα ο αέρας που ανέπνεε το πρωί είχε ενεργότητα μεγαλύτερη κατά ~5% από ότι το μεσημέρι ή το απόγευμα.

	p-value
πρωί - μεσημέρι	0,019
μεσημέρι - απόγευμα	0,364
πρωί - απόγευμα	0,006

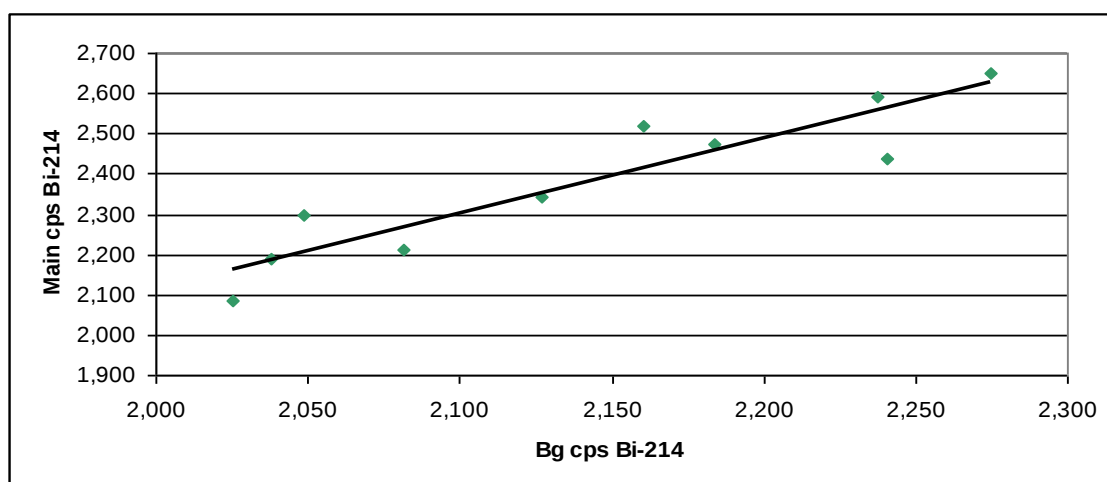
Πίνακας 40: Τιμές p-value ^{214}Bi υποστρώματος

Το γεγονός της μεταβολής της συγκέντρωσης των θυγατρικών του ραδονίου μέσα στην αίθουσα στη διάρκεια της ημέρας πιθανώς να σχετίζεται με το γεγονός ότι η πόρτα της αίθουσας του ΜΟΑ ήταν κλειστή συνεχώς επί ~15 h και στις ημερήσιες μεταβολές στην συγκέντρωση του ραδονίου στον αέρα εκτός κτηρίων, που εισάγεται στην αίθουσα, και κατ' επέκταση στις συγκεντρώσεις των θυγατρικών του κατά την διάρκεια της ημέρας.

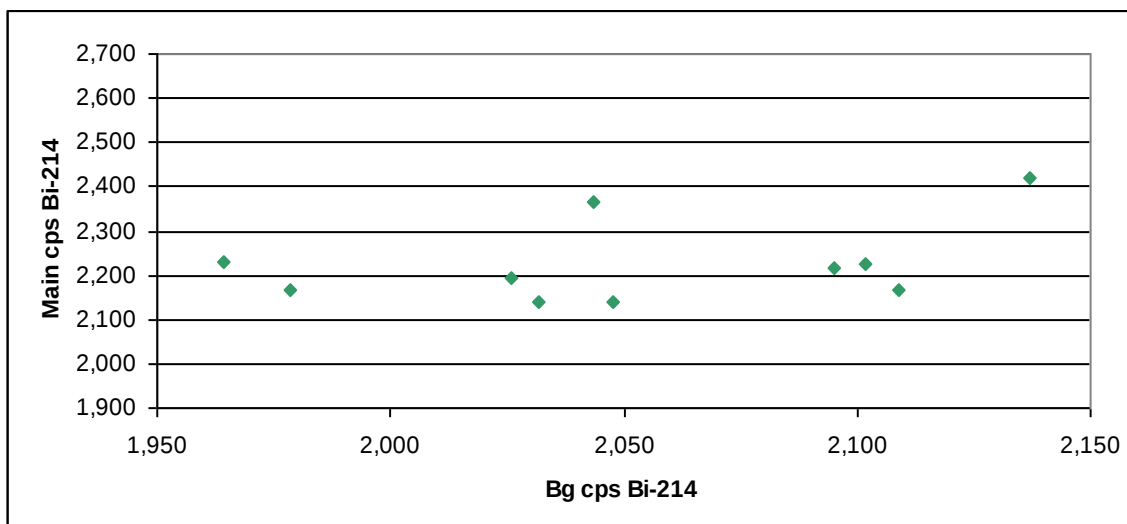
Οι στατιστικά σημαντικές διαφορές στις μετρήσεις του σήματος υποστρώματος στην περιοχή του ^{214}Bi πιθανώς να έχουν επίπτωση στις *in vivo* μετρήσεις, που η κάθε μια απαιτεί παραμονή του εξεταζομένου στην αίθουσα του ΜΟΑ διάρκειας περίπου 45 min, άρα και την εισπνοή αέρα που είναι στην αίθουσα, δηλαδή για χρόνο συγκρίσιμο με αυτόν του ενεργού χρόνου ημιζωής των θυγατρικών του ραδονίου στο ανθρώπινο σώμα. Ως εκ τούτου αρχικά συσχετίσθηκε ο συνολικός ρυθμός παλμών ^{214}Bi στην εξεταζόμενη με αυτόν στο ομοίωμα υποστρώματος (Γραφήματα 11-14). Θεωρήθηκε ότι υπάρχει γραμμική συσχέτιση των δεδομένων με εξαίρεση τις μεσημβρινές μετρήσεις.



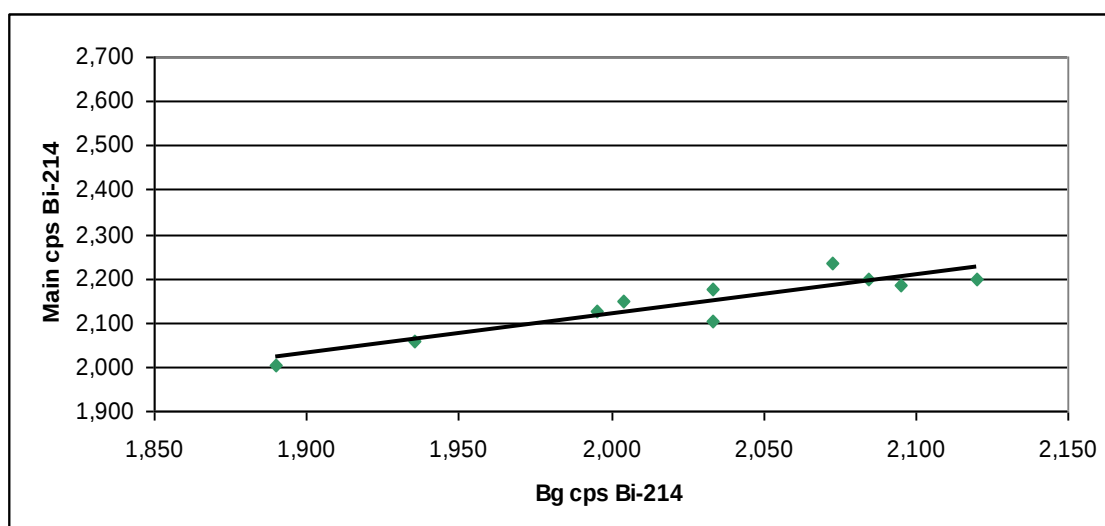
Γράφημα 11: Ρυθμός παλμών ^{214}Bi της κύριας μέτρησης ως συνάρτηση της μέτρησης υποστρώματος



Γράφημα 12: Ρυθμός παλμών στην RoI του ^{214}Bi της κύριας μέτρησης ως συνάρτηση της μέτρησης υποστρώματος των πρωινών μετρήσεων (από την οικία)

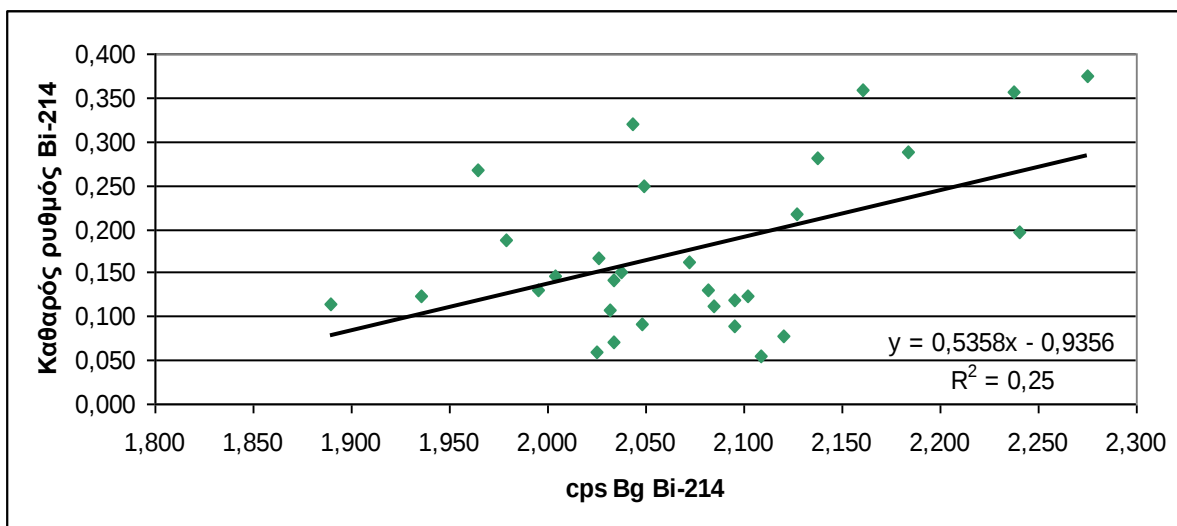


Γράφημα 13: Ρυθμός παλμών στην RoI του ^{214}Bi της κύριας μέτρησης ως συνάρτηση της μέτρησης υποστρώματος των μεσημβρινών μετρήσεων (από το γραφείο)



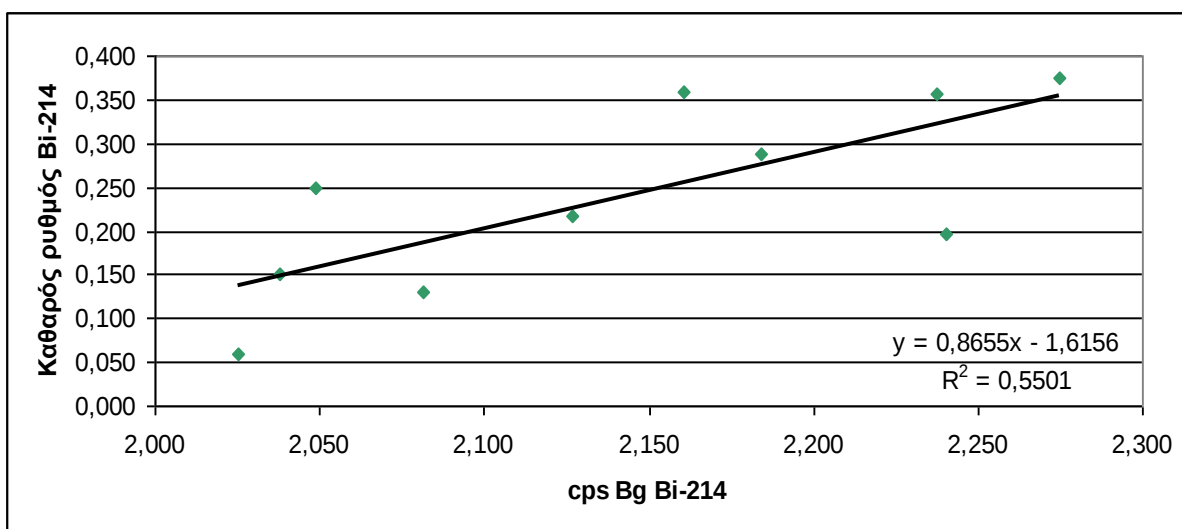
Γράφημα 14: Ρυθμός παλμών στην RoI του ^{214}Bi της κύριας μέτρησης ως συνάρτηση της μέτρησης υποστρώματος των απογευματινών μετρήσεων (από την αίθουσα του MOA)

Τέλος, μελετήθηκε η συσχέτιση των καθαρών κρούσεων από το σώμα της εξεταζόμενης σε σχέση με τις κρούσεις του υποστρώματος, ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο επηρεάζει το ^{214}Bi της ατμόσφαιρας των αριθμό των κρούσεων που ανιχνεύονται από το σώμα της εξεταζόμενης (Γραφήματα 15-18).



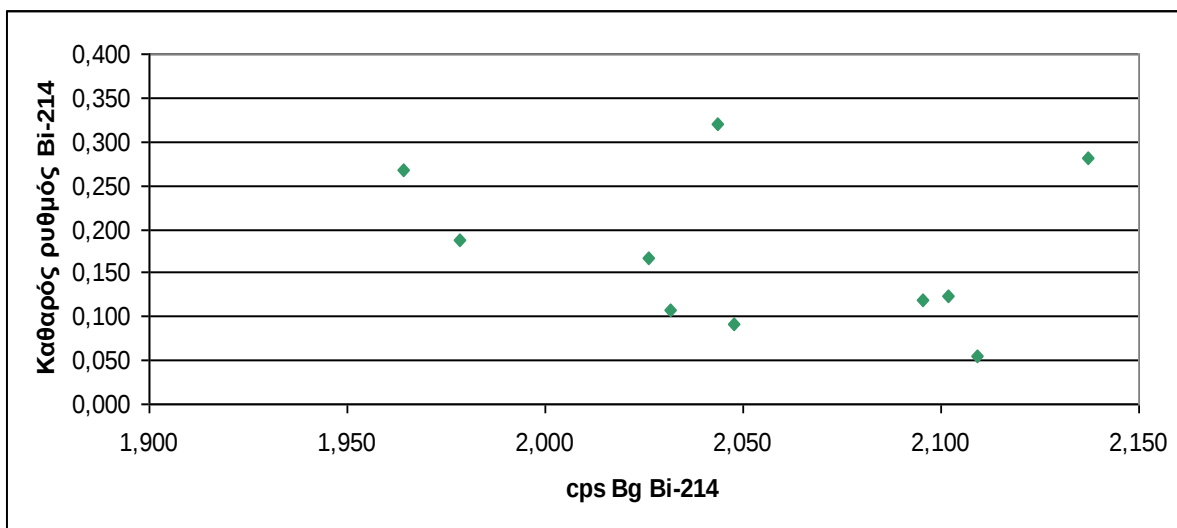
Γράφημα 15: Ρυθμός καθαρών παλμών ^{214}Bi στο σώμα της εξεταζόμενης ως συνάρτηση της μέτρησης υποστρώματος

Από το τεστ συσχέτισης Pearson υπολογίστηκε συντελεστής συσχέτισης $r=0.5$ και τιμή $p\text{-value}=0.005$. Επομένως υπάρχει θετική γραμμική συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού counts στο περιβάλλον και του καθαρού ρυθμού counts που ανιχνεύονται από το σώμα.

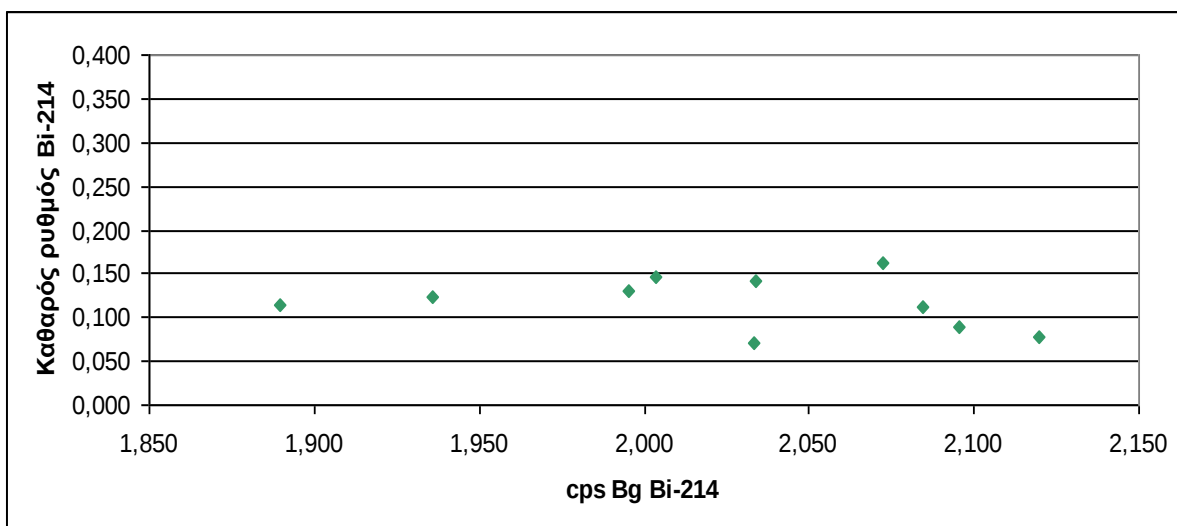


Γράφημα 16: Ρυθμός καθαρών παλμών ^{214}Bi στο σώμα της εξεταζόμενης ως συνάρτηση της μέτρησης υποστρώματος των πρωινών μετρήσεων (από την οικία της)

Ο συντελεστής συσχέτισης των πρωινών μετρήσεων βρέθηκε ίσος με $r=0.743$, ενώ η τιμή $p\text{-value}$ ίση με 0.01 οπότε ο ρυθμός παλμών ^{214}Bi στο σώμα της εξεταζόμενης κατά τις πρωινές μετρήσεις εξαρτάται γραμμικά από τα επίπεδα ^{214}Bi στο περιβάλλον.



Γράφημα 17: Ρυθμός καθαρών παλμών ^{214}Bi στο σώμα της εξεταζόμενης ως συνάρτηση της μέτρησης υποστρώματος των μεσημβρινών μετρήσεων (από το γραφείο)



Γράφημα 18: Ρυθμός καθαρών παλμών ^{214}Bi στο σώμα της εξεταζόμενης ως συνάρτηση της μέτρησης υποστρώματος των απογευματινών μετρήσεων (από την αίθουσα του ΜΟΑ)

Αντίθετα όσον αφορά τις μετρήσεις από το γραφείο και από την αίθουσα του ΜΟΑ οι συντελεστές συσχέτισης είναι αρνητικοί (-0.234 και -0.267 αντίστοιχα) και οι τιμές p-value βρέθηκαν ίσες με 0.515 και 0.455 αντίστοιχα. Επομένως όταν επέλθει ισορροπία του ραδονίου και των θυγατρικών του στο σώμα της εξεταζόμενης, μετά από παραμονή της σε συγκεκριμένο χώρο με τον περιβάλλοντα αέρα δεν μπορεί να θεωρηθεί με βεβαιότητα ότι υπάρχει εξάρτηση μεταξύ του ρυθμού παλμών υποστρώματος και του ρυθμού παλμών από το σώμα της εξεταζόμενης.

Το εύρημα αυτό δεν συμβαδίζει με το αναμενόμενο συμπέρασμα ότι δηλαδή όσο η εξεταζόμενη παρέμενε στον χώρο του ΜΟΑ ο καθαρός ρυθμός παλμών ^{214}Bi από το σώμα της θα βρισκόταν σε εξάρτηση με τους παλμούς του υποστρώματος και ότι δεν θα υπήρχε εξάρτηση των δύο ποσοτήτων κατά της πρωινές ώρες κατά τις οποίες η εξεταζόμενη ερχόταν στην αίθουσα του ΜΟΑ για μέτρηση κατευθείαν από την οικία της. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής επαναληπτικότητας των πρωινών μετρήσεων υποστρώματος βρέθηκε μεγαλύτερος από ότι στις άλλες δύο ομάδες μετρήσεων που σημαίνει ότι υπήρχε μεγαλύτερη διακύμανση των μετρήσεων υποστρώματος κατά τις πρωινές ώρες παρόλο

που βρίσκονταν σε λειτουργία οι ανεμιστήρες εξαερισμού και ενδέχεται το συμπέρασμα της συσχέτισης των καθαρών παλμών από το σώμα της εξεταζόμενης και των παλμών του υποστρώματος κατά τις πρωινές ώρες να αφορά τυχαίο γεγονός λόγω και του γεγονότος ότι ο αριθμός των μετρήσεων δεν ήταν αρκετά μεγάλος για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Γ.2.3 In vivo μετρήσεις ^{214}Bi όλων των εθελοντών που μελετήθηκαν

Στον πίνακα 41 παρουσιάζεται για κάθε έναν από τους 21 εθελοντές που συμμετείχαν στην έρευνα, ο καθαρός ρυθμός παλμών στην περιοχή του ^{214}Bi , τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να υπολογιστεί η ολόσωμη ποσότητα ^{214}Bi (TBBi) και κατά επέκταση η συγκέντρωση του στο σώμα. Σε δύο εθελοντές που μετρήθηκαν δύο φορές παρουσιάζονται οι τιμές του ^{214}Bi για τις δύο μετρήσεις ξεχωριστά. Στην τέταρτη στήλη του πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της απόδοσης που υπολογίστηκαν από την σχέση (Γ.5) και ενώ έγινε αφαίρεση του ποσοστού συνεισφοράς των τεσσάρων ανιχνευτών που δεν συμμετείχαν στις μετρήσεις. Η συνεισφορά αυτή βρέθηκε από τους πίνακες απόδοσης των ομοιωμάτων που μοντελοποιήθηκαν από τον Σ. Βαλάκη (2011) για κάθε εξεταζόμενο ξεχωριστά ανάλογα με το ομοίωμα που ήταν πιο κοντά στα χαρακτηριστικά του.

Εθελοντής	Μάζα (kg)	cps ^{214}Bi	Απόδοση	TBBi (Bq)	TBBi/Μάζα (Bq/kg)	Επάγγελμα
Ε.Μ. (Γ)	110	0,346	0,001453	238	2,16	Συνταξιούχος
Κ.Τ. (Α)	96,5	0,264	0,001799	175	1,81	Καθηγητής Ιατρικής Φυσικής
Κ.Ε. (Γ)	70	0,158	0,001540	103	1,46	Μεταδιδάκτορας
Τ.Ε. (Α)	102	0,24	0,001546	155	1,52	Αστυνομικός
Σ.Χ. (Γ)	58	0,245	0,001591	154	2,65	Μεταπτυχιακή φοιτήτρια
Κ.Ν. (Γ)	52,6	0,176	0,001608	148	2,81	Μεταπτυχιακή φοιτήτρια
Π.Ε. (Γ)	64	0,095	0,001896	60	0,94	Συνταξιούχος
Β.Ι. (Γ)	61	0,108	0,001586	68	1,12	Φοιτήτρια
Ζ.Γ. (Γ)	50	0,226	0,001610	140	2,80	Φοιτήτρια
Κ.Ε. (Γ)	57	0,256	0,001591	161	2,82	Υποψήφια Διδάκτορας
Π.Β. (Γ)	78	0,169	0,001530	110	1,41	Οικιακά
Κ.Α. (Γ)	66	0,056	0,001565	36	0,54	Μοδίστρα
Μ.Β. (Γ)	60	0,299	0,001592	188	3,13	Φοιτήτρια
Φ.Α. (Γ)	59	0,186	0,001587	117	1,98	Φοιτήτρια
Μ.Δ. (Α)	69	0,148	0,001568	94	1,36	Μεταπτυχιακός φοιτητής
Φ.Μ. (Γ)	82	0,261	0,001534	170	2,07	Νοσηλεύτρια
Κ.Β. (Α)	76	0,155	0,001581	98	1,29	Νοσηλεύτης
Σ.Χ. (Γ)	69,5	0,380	0,001560	243	3,50	Πυρηνική Γιατρός
	69,5	0,199	0,001560	127	1,83	Πυρηνική Γιατρός
Δ.Δ. (Α)	115	0,078	0,001628	48	0,42	Ακτινοφυσικός
Π.Α. (Α)	86	0,217	0,001557	139	1,62	Ακτινοφυσικός
	86	0,097	0,001557	62	0,72	Ακτινοφυσικός
Σ.Κ. (Α)	75	0,206	0,001583	130	1,73	Πυρηνικός Γιατρός

Πίνακας 41: Ολόσωμη ποσότητα βισμούθιου για όλους τους εθελοντές

Όπως φαίνεται και στον πίνακα η εργασία όλων των εθελοντών αφορά παραμονή σε εσωτερικό χώρο, έτσι τα επίπεδα ραδονίου οφείλονται κυρίως στην συγκέντρωσή του στους εσωτερικούς χώρους. Για το σύνολο των εθελοντών η μέση τιμή ενεργότητας ^{214}Bi στο σώμα τους είναι 128.9 ± 55.0 Bq και η συγκέντρωση 1.81 ± 0.83 Bq/kg. Η μέση τιμή της ολόσωμης ποσότητας ^{214}Bi στις 14 γυναίκες που μελετήθηκαν ήταν 137.5 ± 59.4 Bq

και η συγκέντρωση είναι 2.08 ± 0.87 Bq/kg, ενώ στους επτά άντρες 110.2 ± 47.7 Bq και 1.25 ± 0.50 Bq/kg.

Διενεργώντας independent t-test βρέθηκε να μην υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στην ενεργότητα του ^{214}Bi μεταξύ των δύο φύλων ($p\text{-value}=0.30$) άλλα όταν το ίδιο τεστ εφαρμόστηκε στις τιμές της συγκέντρωσης βισμούθιου στο σώμα η τιμή $p\text{-value}$ ήταν ίση με 0.030. Επομένως βρέθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά μόνο στη συγκέντρωση βισμούθιου μεταξύ των δύο φύλων στο μικρό στατιστικό δείγμα που μελετήθηκε.

Γ.3 In vivo μετρήσεις σε επαγγελματικά εκτιθέμενους

Κατά την διάρκεια των in vivo μετρήσεων για την ποσοτικοποίηση της ειδικής ραδιενέργειας του ^{214}Bi και του ^{40}K προσήλθαν στο Εργαστήριο εκτός των άλλων και έξι εργαζόμενοι του Τμήματος Πυρηνικής Ιατρικής του ΠΓΝΙ. Συγκεκριμένα, οι δυο ήταν ακτινοφυσικοί (ΑΦ) με πλήρη απασχόληση στο ΠΓΝΙ, ο ένας ΑΦ με μερική, οι δύο ειδικευμένοι πυρηνικοί γιατροί (ΠΙ) και οι δύο νοσηλεύτές (Ν) που απασχολούνται στη Μονάδα Ιωδοθεραπείας (ΜΙ) του ΠΓΝΙ, όπου νοσηλεύονται κυρίως θερμοί ασθενείς που τους χορηγείται θεραπευτική ποσότητα ^{131}I σε μορφή κάψουλας που διαλύεται στο πεπτικό τους σύστημα. Ο ένας από τους δύο πυρηνικούς γιατρούς προσήλθε για μέτρηση μετά από ραδιολογικό συμβάν κατά το οποίο μολύνθηκε το δεξί του αντιβράχιο, όταν έπεσε πάνω στην ποδιά του και στην συνέχεια εισχώρησε στα ρούχα του, ποσότητα $^{99\text{m}}\text{Tc}$ tetrofosmin που προοριζόταν για χορήγηση.

Με βάση τα καταγραφέντα φάσματα εντοπίστηκαν δυο φωτοκορυφές που πιθανώς να σχετίζονται με την επαγγελματική τους έκθεση, μια στην περιοχή των 140 keV και μια στην περιοχή των 360 keV, που αποδόθηκαν στο $^{99\text{m}}\text{Tc}$ και στο ^{131}I . Ως εκ τούτου, επιχειρήθηκε ποσοτικοποίηση της πιθανής ραδιομόλυνσής τους με $^{99\text{m}}\text{Tc}$, το πιο συχνά χορηγούμενο ραδιονουκλίδιο για διαγνωστικούς σκοπούς και με ^{131}I το πιο συχνά χορηγούμενο ραδιονουκλίδιο για θεραπευτικούς σκοπούς στο ΠΓΝΙ.

Το τεχνητίο ($Z=43$), ως μέταλλο, είναι συνήθως στις καταστάσεις σθένους IV, VI και VII, με συνηθέστερη μορφή ιόντος TcO_4^- , όταν είναι σε διάλυμα. Σε περίπτωση εισπνοής τύπου F, ο παράγοντας απορρόφησης του τεχνητίου είναι μεγάλος ($f_r=0.8$ στην περίπτωση του TcO_4^- και 1.0 στις άλλες μορφές) ο δε ρυθμός διάλυσής του γρήγορος ($s_r=100 \text{ d}^{-1}$). Στην περίπτωση κατάποσης, ο παράγοντας απορρόφησης του τεχνητίου στο γαστρεντερικό σύστημα θεωρείται μεγάλος όταν είναι με μορφή TcO_4^- ($f_A=0.9$), μικρός στην περίπτωση του Tc-DTPA ($f_A=0.03$) και ενδιάμεσος στις άλλες χημικές μορφές ($f_A=0.2$). Ο ρυθμός κάθαρσής του από το σώμα (μείωση κατά μια τάξη μεγέθους σε $\sim 8 \text{ d}$) είναι πολύ πιο αργός από το ρυθμό ραδιενεργής διάσπασης του $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ($T_{1/2}=0.25 \text{ d}$). Η αποβολή του τεχνητίου τις πρώτες ημέρες γίνεται κυρίως με τα ούρα, και αργότερα κυρίως με τα κόπρανα. Στην περίπτωση του $^{99\text{m}}\text{Tc}$ προτείνεται από την Διεθνή Επιτροπή Ακτινοπροστασίας (ICRP) για την παρακολούθηση των επαγγελματικά εκτιθέμενων μέτρηση της ενεργότητας των ούρων τους ή ολόσωμη μέτρηση με ΜΟΑ που το ελάχιστο όριο ανίχνευσης (MDL) δεν ξεπερνά τα 90 Bq.

Το ιώδιο ($Z=53$) είναι ένα εύκολα εξαερούμενο αλογόνο, που συνήθως βρίσκεται στις καταστάσεις -1 και V, με συνηθέστερες τις ιοντικές μορφές I^- και IO_3^- όταν είναι σε διάλυμα. Σε περίπτωση εισπνοής τύπου F, ο παράγοντας απορρόφησης του ιωδίου θεωρείται ότι είναι μεγάλος ανεξάρτητα χημικής μορφής ($f_r=1.0$) και ο ρυθμός διάλυσής του γρήγορος ($s_r=100 \text{ d}^{-1}$), ενώ στην περίπτωση M, οι $f_r=0.2$ και $s_r=3 \text{ d}^{-1}$. Ένα μεγάλο ποσοστό του προσλαμβανόμενου ιωδίου, της τάξης του 30%, καθλώνεται στον θυρεοειδή αδένα των υγιών ενηλίκων, από όπου το 20% αποβάλλεται μέσω κοπράνων με αργό ρυθμό (0.01155 d^{-1} , $T_{1/2\text{ou}}=60 \text{ d}$), και το υπόλοιπο 80% επιστρέφει στο υπόλοιπο σώμα. Το υπόλοιπο αποβάλλεται μέσω ούρων με γρήγορο ρυθμό (1.94 d^{-1} , $T_{1/2\text{ou}}=0.36$

d) σε σχέση με αυτόν της ραδιενεργής διάσπασης του ^{131}I ($T_{1/2} = 8.021 \text{ d}$). Στην περίπτωση του ^{131}I προτείνονται από την ICRP για την παρακολούθηση των επαγγελματικά εκτιθέμενων τρεις εναλλακτικοί τρόποι, η μέτρηση της ενεργότητας των ούρων, η μέτρηση της ενεργότητας στον θυρεοειδή με ελάχιστο όριο ανίχνευσης να μην ξεπερνά τα 25 Bq και η ολόσωμη μέτρηση με ελάχιστο όριο ανίχνευσης τα 70 Bq. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η MDL του MOA του ΕΙΦΠΙ είναι περίπου 30 Bq και για τα δυο ραδιονουκλίδια, ο MOA είναι κατάλληλος για την μελέτη τους στο σώμα των εργαζόμενων.

Για τον συσχετισμό του καταμετρηθέντος ρυθμού παλμών στην περιοχή των 140 keV με την ενεργότητα του $^{99\text{m}}\text{Tc}$ θεωρήθηκε ανιχνευτική απόδοση στην αντίστοιχη ROI (2.66 ± 0.03) 10^{-2} ανά εκπεμπόμενο φωτόνιο στην περίπτωση ομοιόμορφης κατανομής σε ομοίωμα 70 kg/170 cm, σύμφωνα με την μοντελοποίηση που έκανε ο Σ. Βαλάκης στην περίπτωση χρήσης όλων των ανιχνευτών και $2.33 \cdot 10^{-2}$, όταν δεν χρησιμοποιούνται όλοι. Λαμβάνοντας υπόψη ότι εκπέμπονται 87 φωτόνια ενέργειας 140 keV ανά 100 διασπάσεις, η απόδοση ανά ενεργότητα θεωρήθηκε ότι είναι $(2.03 \pm 0.03) 10^{-2}$ cps ανά Bq σε όλους τους εξετασθέντες (λόγω των χαμηλών τιμών δεν έγινε διόρθωση για τον σωματότυπο).

Για το συσχετισμό του καταμετρηθέντος ρυθμού παλμών στην περιοχή των 360 keV με την ενεργότητα του ^{131}I θεωρήθηκε στην περίπτωση ομοιόμορφης βιοκατανομής, ανιχνευτική απόδοση στην αντίστοιχη ROI $1.5 \cdot 10^{-2}$ ανά εκπεμπόμενο φωτόνιο και ότι εκπέμπονται 81.2 φωτόνια ενέργειας 364.5 keV ανά 100 διασπάσεις, άρα θεωρήθηκε ότι μετριοούνται $1.22 \cdot 10^{-2}$ παλμοί το s ανά Bq. Λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν έγινε χρήση όλων των σπινθηριστών, θεωρήθηκε απόδοση $1.04 \cdot 10^{-2}$ cps ανά Bq σε όλους τους εξετασθέντες, χωρίς να γίνει διόρθωση για τον σωματότυπο του καθενός.

Ο συσχετισμός της ενεργής δόσης λόγω της ραδιομόλυνσης από την μετρηθείσα ενεργότητα απαιτεί να γίνουν υποθέσεις για το χρόνο μεταξύ της πρόσληψης και της μέτρησης, υποθέσεις για τον ενεργό χρόνο ημιζωής του ραδιονουκλιδίου μέσα στο σώμα, υπόθεση για την οδό εισόδου του στο σώμα (π.χ. μέσω αναπνοής) και χρήση ενός δοσιμετρικού παράγοντα που συνδέει την πρόσληψη με την ενεργή δόση.

Στην περίπτωση του $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ο φυσικός χρόνος ημιζωής είναι 6.02 h, ο δε βιολογικός εξαρτάται από την χημική του μορφή, π.χ. $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ δεσμευμένο σε έναν φορέα, την οδό εισόδου στο σώμα, και τον μεταβολισμό του συγκεκριμένου ατόμου. Για παράδειγμα, σύμφωνα με την αναφορά ICRP 67 (1994) το 75% του TcO_4^- που χορηγείται ενδοφλέβια, παραμένει στο ανθρώπινο σώμα με βιολογικό χρόνο ημιζωής $\sim 38.5 \text{ h}$ (6.4 φορές μεγαλύτερος του φυσικού χρόνου ημιζωής του $^{99\text{m}}\text{Tc}$) το 20% με βιολογικό χρόνο 89 h και το υπόλοιπο 5% με 22 d. Στα περισσότερα χρησιμοποιούμενα ραδιοφάρμακα που είναι επισημασμένα με $^{99\text{m}}\text{Tc}$, η αποβολή είναι ταχύτερη. Ως εκ τούτου, στην παρούσα μελέτη θεωρήθηκε ότι ενεργός χρόνος ημιζωής 5 h σε όλες τις περιπτώσεις. Έστω συντηρητικά ότι ενεργή δόση ανά προσλαμβανόμενη ενεργότητα από τους εργαζόμενους που μελετήθηκαν ήταν 0.013 mSv/MBq (τιμή από την αναφορά ICRP 80 (1998) για ενδοφλέβια χορήγηση TcO_4^- χωρίς μπλοκάρισμα του θυρεοειδούς). Ο παράγοντας αυτός είναι συνήθως μικρότερος, όταν το $^{99\text{m}}\text{Tc}$ έχει προσδεθεί σε μια ουσία. Σημειώνεται ότι οι αντίστοιχες τιμές για κατάποση ή εισπνοή $^{99\text{m}}\text{Tc}$ είναι δυο τάξεις μεγέθους μικρότερες.

Στην περίπτωση του ^{131}I που έχει φυσικό χρόνο ημιζωής 8.02 d, έστω ότι το 30% του προσλαμβανόμενου ιωδίου καθιλώνεται στον θυρεοειδή αδένα και ότι μειώνεται με ενεργό χρόνο ημιζωής 7.3 d (175 h), ενώ για το υπόλοιπο 70%, ο ενεργός χρόνος ημιζωής είναι 8.3 h. Δεδομένου ότι ιώδιο είναι πτητικό, θεωρούμε ότι εισέρχεται στο ανθρώπινο σώμα κυρίως μέσω εισπνοής σωματιδίων διαμέτρου (AMAD) 5 μm . Σε αυτήν την περίπτωση η ενεργή δόση ανά προσλαμβανόμενη ενεργότητα θεωρήθηκε ότι είναι 11.8 mSv/MBq, τιμή που προτείνεται στην αναφορά ICRP 119, 2012 (σε περίπτωση AMAD 1 μm ο παράγοντας είναι μικρότερος, 7.7 mSv/MBq). Σημειώνεται ότι στην περίπτωση κατάποσης ο συντελεστής είναι 22 mSv/MBq.

Γ.3.1 Ποσοτικοποίηση μολύνσεων από ^{99m}Tc

ΑΦ1: Ο πρώτος ακτινοφυσικός (μάζα σώματος=115 kg και ύψος=1.88 cm) προσήλθε για μέτρηση στις 22/2/2016 και ώρα ~17:00. Στο σύντομο ιστορικό που λήφθηκε πριν την μέτρηση μας πληροφόρησε ότι την εν λόγω ημέρα δεν διαχειρίστηκε δόσεις ^{99m}Tc , αλλά παρέλαβε, διαχειρίστηκε και συμμετείχε στη χορήγηση δόσεων ^{131}I σε τέσσερεις ασθενείς. Παρόλα αυτά ήταν και στο θερμό εργαστήριο άρα δεν μπορεί να αποκλεισθεί να μολύνθηκε την συγκεκριμένη ημέρα με ^{99m}Tc . Από την ανάλυση των φασμάτων βρέθηκε καθαρός ρυθμός παλμών από το σώμα του στην περιοχή των 140 keV, 3.103 cps, οπότε αγνοώντας ότι ο σωματότυπος του δεν είναι τυπικός, θεωρήθηκε ότι η απόδοση ήταν $2.03 \cdot 10^{-2}$ cps ανά Bq, με συνέπεια η ενεργότητα κατά το χρόνο μέτρησης, $A(t)$ να είναι 153 Bq.

Με βάση το ιστορικό του εργαζομένου εξετάσθηκαν δυο σενάρια, η μόλυνσή του να έγινε περίπου 5 h πριν από την μέτρηση, ή πριν από 30 ώρες, οπότε με βάση τον ενεργό χρόνο των 5 h που θεωρήθηκε, η πρόσληψη $A(0)$ ήταν 306 Bq ή 9.8 kBq, ανάλογα με το σενάριο και η ενεργή δόση, με τη υπόθεση των 0.013 mSv/MBq, $3.98 \cdot 10^{-3}$ και 0.13 μSv , αντίστοιχα. Από τα δυο σενάρια, το πρώτο θεωρείται πιο ρεαλιστικό και αν η εν λόγω μέτρηση είναι τυπική, έπεται ότι κατά τις 230 ημέρες που κατά μέσο όρο εργάζεται ετησίως η ετήσια ενεργή του δόση είναι 0.91 μSv .

ΑΦ2: Πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις στον δεύτερο ακτινοφυσικό (μάζα=86 kg και ύψος=1.78 cm). Την ημέρα της πρώτης μέτρησης, 3/3/2017, βρισκόταν για αρκετή ώρα στο θερμό εργαστήριο, ενώ ασχολήθηκε κατά κύριο λόγο με τον καθαρισμό των δωματίων παραμονής των ασθενών μετά από θεραπεία με βραχύβια ισότοπα όπως το ^{131}I . Σημειώνεται ότι την προηγούμενη ημέρα κλήθηκε να καθαρίσει την γ -camera και τον χώρο στον οποίο βρίσκεται, καθώς υπήρξε ατύχημα στην διάρκεια μιας εξέτασης κατά την οποία χύθηκε ποσότητα ^{99m}Tc .

Από την ανάλυση των φασμάτων βρέθηκε καθαρός ρυθμός παλμών από το σώμα του 10.1 cps, οπότε με βάση την απόδοση του $2.03 \cdot 10^{-2}$ ανά Bq, η ενεργότητα κατά το χρόνο μέτρησης, $A(t)$ να είναι 498 Bq. Και σε αυτήν την περίπτωση αναλύθηκαν δυο σενάρια, η πρόσληψη να έγινε πριν από 2.5 h, ή πριν από 25 h, με συνέπεια η πρόσληψη να είναι 704 Bq και 15.9 kBq, αντίστοιχα, η δε ενεργή δόση $9.15 \cdot 10^{-3}$ και 0.21 μSv .

Η δεύτερη μέτρηση στον ΑΦ2 έγινε στις 7/3/2017 και ώρα ~12:30. Την συγκεκριμένη μέρα ο εξεταζόμενος μέτρησε και καθάρισε τους σάκους που περιέχουν τα υπολείμματα των υλικών μιας χρήσης που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή και χορήγηση του τεχνητίου. Η μόλυνση θεωρήθηκε ότι έγινε 1.5 h πριν την μέτρηση. Από το φάσμα υπολογίστηκαν στην περιοχή του ^{99m}Tc , 5.1 cps που αντιστοιχήθηκαν σε $A(t)=251$ Bq ($5.1/0.0203$ Bq), $A(0)=309$ Bq και η ενεργή δόση ίση με $4.02 \cdot 10^{-3}$ μSv .

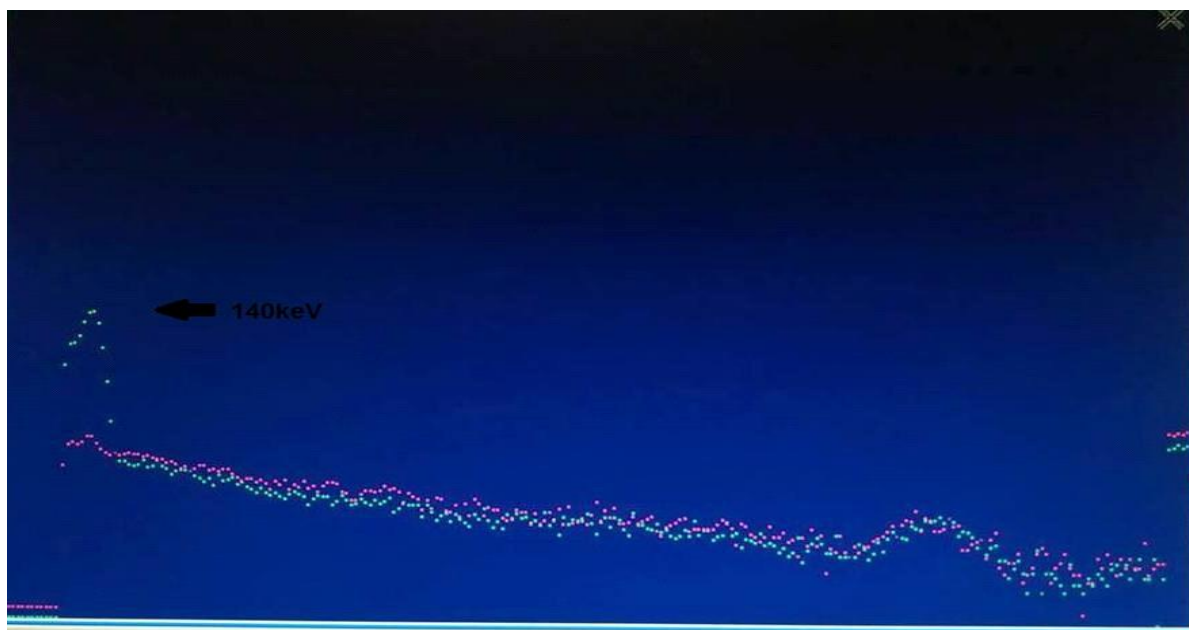
Αν για τον υπολογισμό της ετήσιας ενεργής δόσης από ραδιομόλυνση με ^{99m}Tc χρησιμοποιήσουμε τη μέση τιμή των δυο ημερών, $9.15 \cdot 10^{-3}$ και $4.02 \cdot 10^{-3}$ μSv , δηλαδή $6.6 \cdot 10^{-3}$ μSv , και ότι ετησίως εργάζεται 230 ημέρες, η ετήσια δόση του από την εν λόγω πηγή είναι 1.52 μSv .

ΑΦ3: Στον τρίτο ακτινοφυσικό, ΑΦ3, που εργάζεται στο συγκεκριμένο εργαστήριο με απασχόληση μόνο ~20% του χρόνου των άλλων ακτινοφυσικών και μετρήθηκε 12 φορές για τη μελέτη της επαναληπτικότητας των μετρήσεων του ΜΟΑ, ουδέποτε εντοπίστηκε ραδιομόλυνση σε ^{99m}Tc με μετρήσεις που έγιναν 5 ως 7 h μετά την αναχώρησή του από το Τμήμα Πυρηνικής Ιατρικής.

ΠΙ1: Πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις σε πυρηνικό γιατρό (μάζα=70kg και ύψος=1.63 cm) που εργάζεται στο Τμήμα Πυρηνικής Ιατρικής του ΠΓΝΙ με μερική απασχόληση.

Στις 22/2/2017 προσήλθε στο εργαστήριο για την πρώτη μέτρηση. Την εν λόγω ημέρα πραγματοποίησε οκτώ χορηγήσεις ραδιοφαρμάκων επισημασμένων με ^{99m}Tc σε ασθενείς περίπου από τις 9:00 έως τις 11:30, ενώ η μέτρηση στον ΜΟΑ ξεκίνησε στις 11:40. Κατά την διάρκεια της μέτρησης εντοπίσθηκε τάχιστα μια κορυφή στην ενεργειακή περιοχή των 140 keV, όπου μετρήθηκε ρυθμός παλμών 1257 cps, επομένως η ενεργότητα κατά το χρόνο της μέτρησης $A(t)$ ήταν 62.92 kBq. Αν η ραδιομόλυνση έγινε 2 h πριν από την μέτρηση, δεδομένου ότι δεν μεσολάβησε βιολογική απέκκριση σύμφωνα με το ιστορικό, έπεται ότι η πρόσληψη, $A(0)$ ήταν 83 kBq επομένως η ενεργός δόση ήταν 1.08 μSv .

Η ΠΙ1 δεν ανέφερε να προηγήθηκε κάποιο ατύχημα κατά την διάρκεια των χορηγήσεων, όμως όταν αμέσως μετά την ολόσωμη μέτρηση σαρώθηκε το σώμα της με φορητό ανιχνευτή γ-ακτινοβολίας διαπιστώθηκε ότι η μόλυνση ήταν τοπική και βρισκόταν στην περιοχή του δεξιού ώμου της, παρόλο που φορούσε ποδιά κατά τις χορηγήσεις. Άμεσος έλεγχος της ποδιάς της για πιθανή ραδιομόλυνση, με έμφαση στην περιοχή του ώμου απέβη αρνητικός. Από το ιστορικό προέκυψε ότι αναχωρώντας από το εργαστήριο και αφού είχε βγάλει την ποδιά της, την αγκάλιασε ακουμπώντας τα χέρια της στην περιοχή του ώμου της γιατρού μια ασθενής που νωρίτερα είχε ενεθεί από την ΠΙ1 συνολικά με περίπου 1.2 GBq ^{99m}Tc -tetrofosmin για διαγνωστικούς σκοπούς, με συνέπεια να έχει στο σώμα της ενεργότητα 10^4 φορές μεγαλύτερη της $A(0)$.



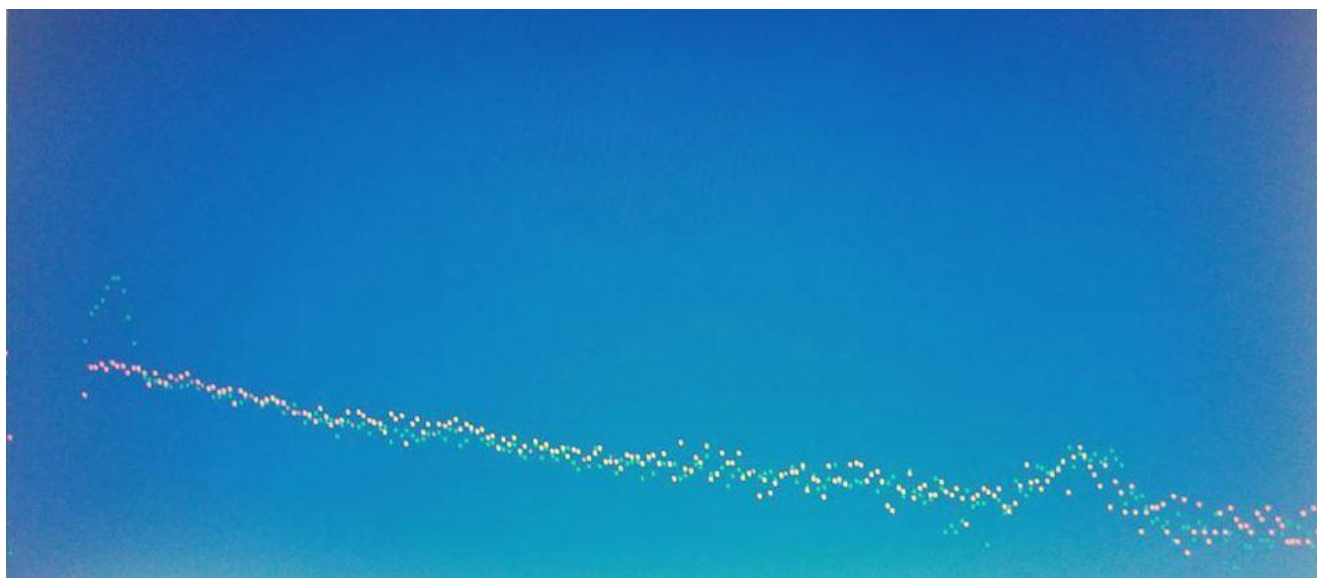
Εικόνα 14: Ανιχνευτής τύπου A1 μέτρηση ΠΙ1

Ο Α. Χριστοφή (2014) μελέτησε πειραματικά με την βοήθεια ομοιωμάτων την επίδραση στην ανιχνευτική απόδοση της θέσης του ^{99m}Tc μέσα στο ανθρώπινο σώμα. Μεταξύ άλλων βρήκε ότι η απόδοση είναι αυξημένη κατά ~24% όταν το ^{99m}Tc βρίσκεται στον θυρεοειδή (η πιο συνηθισμένη περιοχή σε άτομα στα οποία δεν έχει μπλοκαρισθεί ο θυρεοειδής αδένας, όπως η ΠΙ1, και 30% όταν βρίσκεται στον πνεύμονα. Ως εκ τούτου, υιοθετώντας το σενάριο της μόλυνσης πριν από μισή ώρα, οι τιμές πρέπει να μειωθούν κατά ~25% λόγω διαφοράς στην απόδοση και κατά 16% λόγω διαφοράς στον χρόνο, με συνέπεια οι τιμές $A(t)$ και $A(0)$ να είναι 43 kBq και 50 kBq, αντίστοιχα και η ενεργή δόση λόγω του συμβάντος 0.65 μSv .

Στην ίδια γιατρό διενεργήθηκε και δεύτερη μέτρηση στις 6/3/2017 ώρα ~12:30 και ενώ είχε πραγματοποιήσει προηγουμένως επτά χορηγήσεις με ^{99m}Tc σε ασθενείς από τις 8:00 έως τις 9:50 και μετρήθηκε ρυθμός παλμών 3.1 cps επομένως η ενεργότητα κατά το

χρόνο της μέτρησης ήταν 153 Bq. Θεωρώντας ότι από την πρόσληψη είχαν μεσολαβήσει 4 h, η αρχική ενεργότητα ήταν 266 Bq και η ενεργή δόση λόγω της εργασίας της $34.6 \cdot 10^{-3}$ μSv . Αγνοώντας ότι η εν λόγω ιατρός κατά το 2017 εργάζονταν στο ΠΓΝΙ με μερική απασχόληση, έστω ότι έκανε την ίδια εργασία 230 ημέρες το χρόνο προσλαμβάνοντας ~ 270 Bq ημερησίως, αγνοώντας δηλαδή το συμβάν που έγινε στις 22/2/2017 που είναι ιδιαίτερα ασύνηθες. Σε αυτήν την περίπτωση η ετήσια ενεργή της δόση από εσωτερική ραδιομόλυνση με $^{99\text{m}}\text{Tc}$ λόγω της εργασίας της, είναι $0.81 \mu\text{Sv}$ ($=0.270 \times 0.013 \times 230 \mu\text{Sv}$).

ΠΙ2: Στις 9/3/2017 προσήλθε στις 11:40 στο εργαστήριο για μέτρηση μετά από ατύχημα ένας άλλος πυρηνικός γιατρός, ο ΠΙ2 (μάζα σώματος=75 kg και ύψος= 1.78 cm) μετά από ραδιολογικό συμβάν που έγινε στις 9:20 από λάθος χειρισμό της σύριγγας με την οποία χορηγούσε το ραδιοφάρμακο με συνέπεια να πεταχτεί ραδιοφάρμακο που περιείχε $^{99\text{m}}\text{Tc}$ στην περιοχή του δεξιού αντιβραχίου. Στον συγκεκριμένο εργαζόμενο αμέσως μετά από την ραδιομόλυνση του υποδείχθηκε από ΦΝΑΙ του ΠΓΝΙ να βγάλει αμέσως το πουκάμισο του και να φορέσει μια καθαρή ποδιά, κάτι που έγινε και κατά την μέτρηση. Στην εικόνα 15 παρουσιάζεται το φάσμα ενός εκ των δώδεκα ανιχνευτών για τον συγκεκριμένο εξεταζόμενο που βρέθηκε αφού ο ιατρός άλλαξε ρούχα πλύθηκε και απορρυπώθηκε επιφανειακά ως έναν βαθμό.



Εικόνα 15: Ανιχνευτής τύπου A1 μέτρηση ΠΙ2

Δεδομένου ότι δεν έχει προσομοιωθεί η περιοχή του αντιβραχίου (δεν είναι γνωστό τι ποσοστό καθηλώθηκε στο δέρμα του χεριού του) δεν υπάρχει ακριβής τιμή για την ανιχνευτική απόδοση ανά φωτόνιο, χρησιμοποιήθηκαν δυο τιμές, αυτή για ομοιόμορφη κατανομή και αυτή που επίσης είχε υπολογιστεί από τον Σ. Βαλάκη, για μόλυνση στο γόνατο, 3.07% για το σύνολο των ανιχνευτών. Θεωρώντας μειωμένη την απόδοση κατά 12.5% λόγω μειωμένου αριθμού ανιχνευτών και ότι ανά διάσπαση εκπέμπονται 0.87 φωτόνια, η απόδοση cps ανά Bq $^{99\text{m}}\text{Tc}$ είναι $2.33 \cdot 10^{-2}$ ($3.07\% \times 0.875 \times 0.87$), στην περίπτωση της ανομοιογενούς κατανομής έναντι $2.03 \cdot 10^{-2}$ cps ανά Bq στην περίπτωση της ομοιογενούς.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι μετρήθηκε ρυθμός 183 cps, η ενεργότητα στο σώμα του ΠΙ2 κατά την μέτρηση ήταν 9.01 kBq στην περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής και 7.85 kBq στην περίπτωση του γόνατος. Δεδομένου ότι η ραδιομόλυνση έγινε 2.5 h πριν από

την μέτρηση, μειώθηκε η ενεργότητα κατά 29%, ως εκ τούτου η πρόσληψη, $A(0)$ ήταν 12.7 kBq και 11.1 kBq, ανάλογα με την βιοκατανομή, και η ενεργή δόση λόγω του συμβάντος ήταν 0.165 και 0.144 μSv , αντίστοιχα.

N1 και N2: Μια μέτρηση έγινε στους δυο νοσηλευτές που απασχολούνται κυρίως στην Μονάδα Ιωδοθεραπείας και δεν βρέθηκε ραδιομόλυνση με $^{99\text{m}}\text{Tc}$, όπως και ήταν αναμενόμενο.

Εργαζόμενος	A(t) (Bq)	ΔT (h)	A(0) (Bq)	EDint/d (μSv)	EDint/y (μSv)	EDext/y (mSv)
AΦ1	153	5	306	$3,98 \cdot 10^{-3}$	0,91	NR
AΦ2 (50%)	498	2,5	704	$9,1 \cdot 10^{-3}$	1,52	0,6
AΦ2 (50%)	251	1,5	309	$4,02 \cdot 10^{-3}$	1,52	0,6
AΦ3	ND	—	—	—	ND	NR
ΠΙ1	153	4	266	0,81	0,81	2,09
ΠΙ1*	47000	0,5	50000	0,65*	—	—
ΠΙ2*	9010	2,5	12700	0,17*	—	—
N1	ND	—	—	—	ND	NR
N2	ND	—	—	—	ND	NR

ND: μη ανιχνεύσιμο, NR: μη ανακοινώσιμο ($<0.1 \text{ mSv/month}$)

*: ραδιολογικό συμβάν

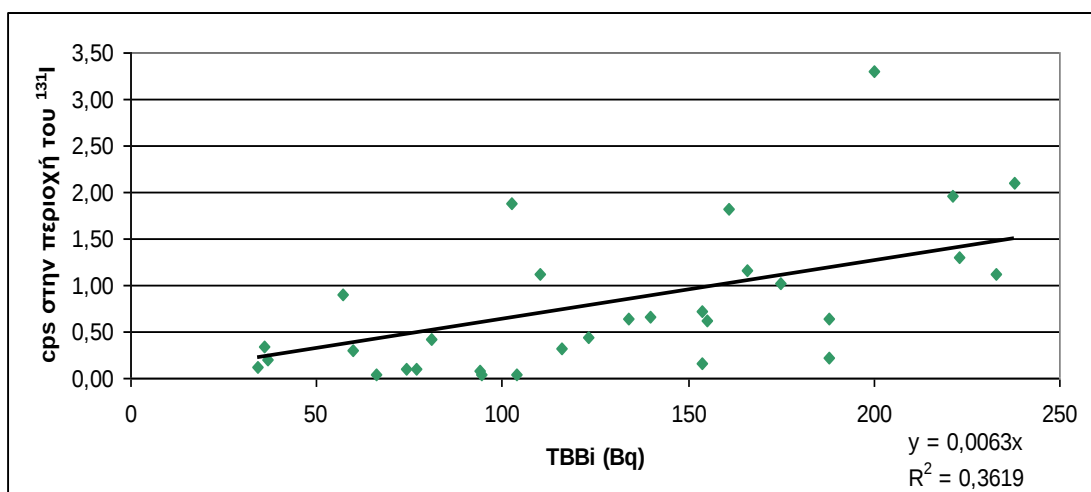
Πίνακας 42: Εσωτερική και εξωτερική ενεργός δόση των επαγγελματικά εκτιθέμενων εργαζομένων από $^{99\text{m}}\text{Tc}$

Γ.3.2 Ποσοτικοποίηση μολύνσεων από ^{131}I

Η φτωχή διακριτική ικανότητα των ανιχνευτών NaI(Tl) που διαθέτει ο ΜΟΑ, δυσχεραίνει την ποσοτικοποίηση του ^{131}I , καθώς στην ίδια περιοχή του φάσματος εντοπίζεται και κορυφή 352 keV του ^{214}Pb (πιθανότητα εκπομπής 37%) και σε μικρότερο βαθμό η κορυφή των 295 keV (πιθανότητα 19%), που είναι ένα από τα θυγατρικά του ραδονίου και εισέρχεται στον οργανισμό κυρίως μέσω αναπνοής. Για να διαπιστωθεί αν υπήρξε εσωτερική μόλυνση των εργαζομένων με ^{131}I βρέθηκαν αρχικά τα cps στην περιοχή του ^{131}I από 31 μετρήσεις των μη επαγγελματικά εκτιθέμενων και συσχετίστηκαν με την ολόσωμη ποσότητα ^{214}Bi , όπως προέκυψε από την περιοχή των $\sim 1760 \text{ keV}$.

a/a	cps στην περιοχή του ^{131}I	TBBI (Bq)
Ε.Μ.	2,10	238
Μ.Β.	0,64	188
Κ.Ε.	1,89	103
Φ.Α.	0,23	188
Κ.Α.	0,34	36
Π.Β.	1,13	110
Κ.Ε.	1,82	161
Ζ.Γ.	0,66	140
Π.Ε.	0,30	60
Σ.Χ.	0,73	154
Τ.Ε.	0,62	155
Μ.Δ.	0,05	94
Κ.Ν. (1)	1,30	223
Κ.Ν. (2)	0,13	34
Κ.Ν. (4)	0,43	81
Κ.Ν. (5)	0,05	66
Κ.Ν. (7)	1,96	221
Κ.Ν. (8)	1,03	175
Κ.Ν. (10)	1,13	233
Κ.Ν. (11)	3,30	200
Κ.Ν. (13)	0,65	134
Κ.Ν. (14)	0,33	116
Κ.Ν. (16)	1,16	166
Κ.Ν. (18)	0,10	74
Κ.Ν. (20)	0,45	123
Κ.Ν. (21)	0,10	77
Κ.Ν. (22)	0,16	154
Κ.Ν. (23)	0,08	94
Κ.Ν. (25)	0,20	37
Κ.Ν. (28)	0,90	57
Κ.Ν. (30)	0,05	104

Πίνακας 43: Ρυθμός παλμών (cps) στην περιοχή του ^{131}I και ολόσωμη ποσότητα βισμούθιου επαγγελματικά εκτιθέμενων εθελοντών



Γράφημα 19: Σχέση cps περιοχής ^{131}I με την ολόσωμη ποσότητα ^{214}Bi μη επαγγελματικά εκτιθέμενων ατόμων

Όπως φαίνεται στο γράφημα 19 τα δύο μεγέθη μπορούμε να τα συσχετίσουμε γραμμικά (p-value=0.000) με συντελεστή συσχέτισης $r=0.60$ μέσω της σχέσης

$$y=0.0063 \cdot x, \quad R^2=0.36$$

παρόλο που η διασπορά των τιμών είναι μεγάλη κυρίως λόγω του τυχαίου σφάλματος στην μέτρηση της ενεργότητας του ^{214}Bi . Θεωρώντας σταθερότητα στο λόγο ενεργοτήτων ^{214}Pb προς ^{214}Bi στο ανθρώπινο σώμα, υπολογίσθηκε με χρήση εμπειρικής σχέσης η συμβολή του ^{214}Pb στο ρυθμό κρούσεων στην περιοχή ενδιαφέροντος του ^{131}I .

Έτσι αφαιρώντας αυτήν την τιμή από την πειραματική που βρέθηκε στους εργαζόμενους, ελέγχθηκε αν στα φάσματα τους παρουσιάζονται παλμοί που προέρχονται από έκθεση σε ^{131}I και όχι μόνο από τον ^{214}Pb , που υπάρχει συνήθως στο περιβάλλον ως θυγατρικό του ραδονίου. Στον πίνακα 44 παρουσιάζονται οι εν λόγω τιμές.

a/a	cps στην περιοχή του ^{131}I που προέκυψαν από το φάσμα	cps στην περιοχή του ^{131}I που προέκυψαν με εφαρμογή της εξίσωσης	TBBI (Bq)	Διαφορά	Επάγγελμα
ΦΝΑΙ1	0,68	0,30	48	$0,38 \pm 0,26$	Ακτινοφυσικός
ΦΝΑΙ2 (1)	2,00	0,88	139	$1,12 \pm 0,22$	Ακτινοφυσικός
ΦΝΑΙ2 (2)	1,00	0,39	62	$0,61 \pm 0,20$	Ακτινοφυσικός
ΦΝΑΙ3	1,40	1,10	175	$0,30 \pm 0,17$	Ακτινοφυσικός
ΠΙ1 (1)	1,64	1,53	243	$0,11 \pm 0,19$	Πυρηνική Ιατρός
ΠΙ1 (2)	0,92	0,80	127	$0,12 \pm 0,19$	Πυρηνική Ιατρός
N1	2,28	0,62	98	$1,66 \pm 0,18$	Νοσηλεύτης
N2	2,52	1,07	170	$1,45 \pm 0,12$	Νοσηλεύτρια

Πίνακας 44: Επαγγελματικά εκτιθέμενοι σε ^{131}I με διόρθωση για τη συμβολή του ^{214}Pb στην περιοχή ενδιαφέροντος

Στη Μονάδα Ιωδοθεραπείας λειτουργούν συστήματα απαγωγής αερίων, παρόλα αυτά υπάρχει μια ποσότητα του πτητικού ιωδίου στον εισπνεόμενο αέρα. Ο ΑΦ1 λίγες ώρες πριν από τη μέτρηση παρέλαβε, διαχειρίσθηκε και συμμετείχε στη χορήγηση δόσεων ^{131}I . Θεωρώντας ότι το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε ανάμεσα στην πρόσληψη και την μέτρηση είναι 5 h, ότι η ανιχνευτική απόδοση είναι $1.37 \cdot 10^{-2}$ cps/Bq ^{131}I , στο ρυθμό που μετρήθηκε (0.38 ± 0.26) cps ενεργότητα $A(t)$ ίση με 28 Bq και $A(0)$ ίση με 38 Bq με βάση το μεταβολικό μοντέλο των δυο διαμερισμάτων. Ως εκ τούτου η ενεργή δόση είναι 0.45 μSv (38×11.8 nSv/Bq). Αν η πράξη αυτή είναι τυπική και την κάνει 100 φορές κάθε χρόνο, η ετήσια ενεργή του δόση από την ενασχόλησή του με το ^{131}I είναι 45 μSv .

Ο ΑΦ2 ασχολήθηκε λίγες ώρες πριν από την πρώτη μέτρηση με τον καθαρισμό των δωματίων της ιωδοθεραπείας. Θεωρώντας ότι το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε ανάμεσα στην πρόσληψη και τη μέτρηση είναι 4 h, και η ανιχνευτική απόδοση είναι $1.37 \cdot 10^{-2}$ cps/Bq ^{131}I , στον ρυθμό που μετρήθηκε, 1.12 ± 0.22 cps αντιστοιχεί ενεργότητα $A(t)=82$ Bq, αρχική ενεργότητα $A(0)=105$ Bq με βάση το μεταβολικό μοντέλο, και ενεργή δόση 1.24 μSv (105×11.8 nSv/Bq). Ο ΑΦ2 την ημέρα της δεύτερης μέτρησης δεν ανέφερε δραστηριότητα με πηγές ^{131}I , ως εκ τούτου θεωρούμε ότι η πρόσληψη έγινε 28 h πριν από την μέτρηση, γεγονός που είχε σαν αποτέλεσμα να μειωθεί η ενεργότητα στο σώμα του κατά παράγοντα του επτά. Λαμβάνοντας υπόψη ότι μετρήθηκε ρυθμός (0.61 ± 0.20) cps, η ενεργότητα κατά τον χρόνο μέτρησης και πρόσληψης είναι 44 Bq και περίπου 334 Bq αντίστοιχα, με συνέπεια η ενεργή δόση να είναι 3.94 μSv ($334 \times$

11.8nSv/Bq). Αν ο ΑΦ2 επαναλαμβάνει αυτή την δραστηριότητα 100 φορές ετησίως με μέση ενεργή δόση 2.6μSv (η μέση τιμή των δυο περιπτώσεων που μελετήθηκαν) έπεται ότι η ετήσια ενεργή του δόση από την ενασχόλησή του με το ¹³¹I, είναι 260 μSv.

Στον ΑΦ3 δεν εντοπίστηκε μόλυνση με ¹³¹I στις δώδεκα μετρήσεις που έγιναν σε διάρκεια μερικών μηνών.

Οι νοσηλευτές συνήθως δεν εισέρχονται στα δωμάτια θεραπείας, αλλά κατά την παραμονή τους στον χώρο έξω από αυτά ενδέχεται να εισπνέουν μικρές ποσότητες ιωδίου που εξέρχονται από τους θαλάμους νοσηλείας και σε μικρότερο ποσοστό από το θερμό εργαστήριο.

Ο Ν1 μετρήθηκε αμέσως μετά τη βάρδια του στην Μονάδα και θεωρούμε ότι η πρόσληψη έγινε 5 h πριν από τη μέτρηση. Λαμβάνοντας υπόψη ότι μετρήθηκε ρυθμός (1.66±0.18) cps, η ενεργότητα είναι 121 Bq (=1.66/1.37 · 10⁻²) κατά τον χρόνο μέτρησης και 166 Bq κατά την πρόσληψη με συνέπεια η ενεργή δόση να είναι 1,96 μSv (166 x 11.8 nSv/Bq).

Οι συνθήκες εργασίας του Ν2 ήταν παρόμοιες με αυτές του Ν1. Μετρήθηκε ρυθμός (1.45±0.12) cps, που συνεπάγεται ενεργότητα κατά τον χρόνο μέτρησης 106 Bq (=1.45/1.37 · 10⁻²) και 145 Bq κατά την πρόσληψη με συνέπεια η ενεργή δόση να είναι 1.71 μSv (145 x 11.8 nSv/Bq). Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι εν λόγω νοσηλευτές κάνουν ετησίως περί τις 90 βάρδιες στη Μονάδα αν οι τιμές που βρέθηκαν είναι τυπικές δέχονται ετησίως λόγω της ενασχόλησής τους στην Μονάδα Ιωδοθεραπείας περίπου 176 και 154 μSv.

Στις δύο μετρήσεις που διενεργήθηκαν στον ΠΙ1 δεν εντοπίστηκε μόλυνση από ¹³¹I. Τα δεδομένα δεν ήταν επαρκή για να ελεγχθεί και ο ΠΙ2.

Στον Πίνακα 45 συνοψίζονται τα στοιχεία για την εσωτερική ακτινοβολή των εργαζομένων που βρέθηκαν για τη ραδιομόλυνση με ¹³¹I, και συγκρίνονται με αυτά από ^{99m}Tc σε συνθήκες ρουτίνας και τις εξωτερικές δόσεις που καταγράφηκαν από τα έντεκα δοσίμετρα κορμού που τους χορήγησε η ΕΕΑΕ κατά το 2016 (ελάχιστη ανακοινώσιμη δόση ανά δοσίμετρο 0.1 mSv, άρα οι ενδείξεις NR αντιστοιχούν σε δόσεις μικρότερες του 1.1 mSv).

Εργαζόμενος	A(t) (Bq)	ΔT (h)	A(0) (Bq)	EDint/d (μSv)	ED ¹³¹ I/y (mSv)	ED ^{99m} Tc/y (μSv)	EDint/y (mSv)	EDext/y (mSv)
ΑΦ1	28	5	38	0,45	0,045	0,91	0,046	0,21**
ΑΦ2 (50%)	82	4	105	1,24	0,260	1,52	0,262	0,60
ΑΦ2 (50%)	44	28	334	3,94	0,260	1,52	0,262	0,60
ΑΦ3	ND	—	—	—	ND	ND	ND	0,47**
ΠΙ1	ND	—	—	—	ND	0,81	0,81	2,09
ΠΙ2*	ND	—	—	—	ND	ND	ND	1,27
N1	121	5	166	1,96	0,176	ND	0,176	NR
N2	106	5	145	1,71	0,154	ND	0,154	NR

ND: μη ανιχνεύσιμο, NR: μη ανακοινώσιμο (<0.1 mSv/month)

* : ραδιολογικό συμβάν

** : οι αναγραφόμενες τιμές αντιστοιχούν στα δοσίμετρα του ΕΙΦΠΙ και όχι της ΕΕΑΕ που έδειξαν μη ανακοινώσιμες τιμές

Πίνακας 45: Ραδιομόλυνση εργαζομένων με ¹³¹I και εκτιμώμενη συνολική εσωτερική και εξωτερική ενεργή δόση τους με βάση τα δεδομένα του 2017 και 2016, αντίστοιχα.

Από τους πέντε εργαζόμενους που είχαν μετρήσιμη εσωτερική ραδιομόλυνση, οι 4 ασχολούνται και με την Μονάδα Ιωδοθεραπείας. Στον πυρηνικό ιατρό ΠΙ1 που ασχολείται μόνο με διαγνωστικές εφαρμογές της ειδικότητάς του η τιμή που βρέθηκε, 0.8 mSv, είναι περίπου 2,6 φορές μικρότερη από την ενεργή δόση από την εξωτερική του ακτινοβολήση, 2.1 mSv.

Οι τιμές της ετήσιας ενεργής δόσης από εσωτερική ακτινοβολήση στους υπόλοιπους τέσσερις ήταν μεταξύ 0.05 ως 0.26 mSv. Συγκεκριμένα στους δυο ακτινοφυσικούς που καλύπτουν τόσο το Εργαστήριο Πυρηνικής Ιατρικής, όσο και την Μονάδα Ιωδοθεραπείας, οι ενεργείς δόσεις από εσωτερική και εξωτερική ακτινοβολήση ήταν 0.05 και 0.21 mSv στον ΑΦ1, και στον ΑΦ2, 0.26 και 0.60 mSv (0.81 mSv με βάση τα δοσίμετρα του Εργαστηρίου Ιατρικής Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, ΕΙΦΠΙ). Αντίθετα, δεν βρέθηκε εσωτερική ακτινοβολήση στον ΑΦ3 που έχει πολύ περιορισμένη φυσική παρουσία στη Μονάδα Ιωδοθεραπείας και στον οποίο μετρήθηκε εξωτερική δόση 0.47 mSv με τα δοσίμετρα του ΕΙΦΠΙ, και μη ανακοινώσιμη με τα δοσίμετρα της ΕΕΑΕ.

Στους δυο νοσηλευτές που προσφέρουν υπηρεσίες στη Μονάδα εκτιμήθηκαν ετήσιες δόσεις από εσωτερική ακτινοβολήση 0.18 και 0.15 mSv, ενώ δεν βρέθηκαν ανακοινώσιμες δόσεις για την εξωτερική τους ακτινοβολήση.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι στους υπολογισμούς της δόσης από εσωτερική ακτινοβολήση δεν λήφθηκαν υπόψη πιθανά έκτακτα συμβάντα ραδιολογικής σημασίας, τις υποθέσεις που έγιναν και ότι οι δόσεις που υπολογίσθηκαν ήταν μεταξύ 0.06 και 0.26 mSv, είναι σκόπιμο να γίνουν περισσότερες μετρήσεις πριν να παρθούν αποφάσεις ως προς την αναγκαιότητα μετρήσεων σε τακτά χρονικά διαστήματα, με βάση το κριτήριο του 1.0 mSv για ατομική δοσिमέτρηση σε τακτική βάση.

Στον υπολογισμό των σφαλμάτων λήφθηκε υπόψη πρώτον, το σφάλμα από την κατανομή Poisson για τα counts της κύριας μέτρησης και της μέτρησης υποστρώματος, δεύτερον το σφάλμα που προκύπτει λόγω επαναληπτικότητας ~4% στις μετρήσεις των παλμών στην περιοχή του ^{40}K από τις οποίες βρέθηκε η συνεισφορά του ^{40}K στην περιοχή του ^{131}I και τρίτον το σφάλμα συνεισφοράς του ^{214}Bi στην περιοχή του ^{131}I που προκύπτει θεωρώντας επαναληπτικότητα 17% αγνοώντας τα σφάλματα των παραγόντων της σχέσης που συνδέει τους παλμούς στις δυο περιοχές όταν δεν υπάρχει ραδιομόλυνση με ^{131}I . Οι τρεις αυτές τιμές θεωρήθηκε ότι είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και το τελικό σφάλμα προέκυψε από την ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων τους διαιρώντας το με τον αντίστοιχο χρόνο (Live time).

$$\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} / \text{lifetime}$$

a= σφάλμα λόγω στατιστικής Poisson

b=σφάλμα λόγω παλμών ^{40}K στην περιοχή του ^{131}I

c=σφάλμα λόγω παλμών ^{214}Bi στην περιοχή του ^{131}I

Γ.4 In vivo μετρήσεις μετά από επίσκεψη σε σπήλαιο

Τα επίπεδα ραδονίου εμφανίζονται αυξημένα σε χώρους όπου συνήθως δεν υπάρχει επαρκής εξαερισμός. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο μέσα σε σπήλαια στα οποία εκλύεται ραδόνιο από το οποίο ένα σημαντικό ποσοστό εγκλωβίζεται στο εσωτερικό τους. Για τον λόγο αυτό ποσοτικοποιήθηκε η ενεργότητα σε ^{214}Bi και ^{214}Pb εθελοντή άντρα μετά από επίσκεψη του στο σπήλαιο του Περάματος Ιωαννίνων. Το σπήλαιο του Περάματος είναι επισκέψιμο σπήλαιο συνολικής έκτασης 14.800m² και απέχει 8km από το κέντρο της

πόλης των Ιωαννίνων. Παλαιότερα μετρήθηκε μέση συγκέντρωση ^{222}Rn 804, 925 και 1311 Bq/m^3 στον αέρα του σπηλαίου κατά τους μήνες Απρίλιο, Αύγουστο και Νοέμβριο, αντίστοιχα (Papachristodoulou et al, 2004).

Ο εθελοντής, ηλικίας 65 γ, μάζας σώματος 96.5 kg και ύψους 165 cm είναι μη καπνιστής και δεν αθλείται. Η επίσκεψη του στο σπήλαιο που απέχει 5 km από την πόλη των Ιωαννίνων, πραγματοποιήθηκε στις 25/3/2017. Κατευθύνθηκε από το σπίτι του που βρίσκεται στο κέντρο της πόλης με αυτοκίνητο μέχρι το σπήλαιο και περίμενε από τις 10:00 έως τις 10:42 στο υπαιθρο έως ότου εισέλθει σε αυτό ως κοινός επισκέπτης. Ξεναγήθηκε ως τις 11:28, άρα ήταν σε διάφορους χώρους του σπηλαίου επί 46 min. Κατόπιν περπάτησε για 20 min με αργό ρυθμό ώστε να ο ρυθμός των αναπνοών του να είναι παρόμοιος με αυτόν κάποιου που δεν κάνει σωματική άσκηση, επιβιβάστηκε σε επιβατηγό αυτοκίνητο και έφτασε στον πρώτο όροφο του Εργαστηρίου Ιατρικής Φυσικής στις 12:00. Άρα ήταν στο υπαιθρο επί 32 min. Άλλαξε ρούχα και προσήλθε στην αίθουσα του ΜΟΑ για μέτρηση στις 12:13. Η πρώτη σάρωση ξεκίνησε στις 12:23, δηλαδή 55 min από την έξοδο του από το σπήλαιο.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ως συνήθως σε συνθήκες εξαναγκασμένης εισαγωγής αέρα στην αίθουσα του ΜΟΑ από δύο ανεμιστήρες και ενώ βρισκόταν σε λειτουργία ένα ηλεκτρικό θερμαντικό σώμα, αλλά με χρόνο σάρωσης περίπου 1/3 του συνήθους. Η θερμοκρασία στην αίθουσα ήταν σταθερή στους 20°C , ενώ η εξωτερική θερμοκρασία στους 21°C . Το ομοίωμα υποστρώματος που χρησιμοποιήθηκε αποτελούνταν από 31 δοχεία με αποιονισμένο νερό όγκου $2000 \pm 18 \text{ ml}$ (M) το καθένα, και 26 δοχεία των $1000 \pm 9 \text{ ml}$ (μ), συνολικής μάζας 96,8kg και συνολικού ύψους 171 cm.

Έγιναν επτά μετρήσεις στον εξεταζόμενο διάρκειας $\sim 10 \text{ min}$ δηλαδή η κάθε μέτρηση αποτελούνταν από μια ορθή και μια ανάστροφη κίνηση της κλίνης. Το πρωτόκολλο των μετρήσεων άλλαξε ώστε να μην υπάρχει πολύ μεγάλη χρονική διαφορά μεταξύ τους, όσο μεταβάλλονταν τα επίπεδα ενεργότητας στο σώμα του. Το ομοίωμα υποστρώματος μετρήθηκε τρεις φορές με τον συνήθη χρόνο μέτρησης, περίπου 35 min. Η πρώτη μέτρηση έγινε πριν την πρώτη μέτρηση του εθελοντή, η δεύτερη, αφού είχαν πραγματοποιηθεί τέσσερις μετρήσεις του και η τρίτη μετά το τέλος των μετρήσεων του εθελοντή. Ο μέσος όρος των δύο πρώτων μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ως μέτρηση υποστρώματος στις πρώτες τέσσερις κύριες μετρήσεις και ο μέσος όρος της δεύτερης και τρίτης μέτρησης υποστρώματος στις τελευταίες τρεις κύριες μετρήσεις, ώστε να μειωθούν τα σφάλματα που οφείλονται στον μικρό χρόνο μέτρησης του εθελοντή.

Στον πίνακα 46 παρουσιάζονται ο ρυθμός των καταμετρούμενων παλμών (cps) στην περιοχή ενδιαφέροντος του ^{214}Bi , που χρησιμοποιήθηκε με κεντροειδές στα $\sim 1.76 \text{ MeV}$ στις μετρήσεις στον εξεταζόμενο και στο ομοίωμα υποστρώματος καθώς και ο καθαρός ρυθμός παλμών που προκύπτει από την αφαίρεση των δύο προηγούμενων τιμών. Στην έκτη στήλη του πίνακα καταγράφεται η ώρα έναρξης κάθε κύριας μέτρησης. Στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα σε συνεχόμενες σαρώσεις περίπου 10 min ελέγχθηκαν και αποθηκεύτηκαν τα φάσματα των ανιχνευτών.

a/a	Gross Main ²¹⁴ Bi / Live Time	Gross Bg ²¹⁴ Bi / Live Time	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ²¹⁴ Bi	<Live Time> (s)	Ώρα μέτρησης
1	2,667	2,080	0,587	609	12:23
2	2,706	2,080	0,625	596	12:40
3	2,631	2,080	0,551	588	12:57
4	2,495	2,080	0,415	589	13:15
5	2,402	2,090	0,313	604	14:23
6	2,460	2,090	0,370	611	14:36
7	2,378	2,090	0,288	588	14:59
Mean value	2,534	2,084	0,450	598	
sd	0,133	0,005	0,137		
cv	0,052	0,002	0,304		
CV _{poisson}	0,026	0,028	0,195		

Πίνακας 46: Δεδομένα μετρήσεων ²¹⁴Bi

Στον πίνακα 47 παρουσιάζονται εκ νέου ο καθαρός ρυθμός παλμών ²¹⁴Bi των μετρήσεων που έγιναν μετά την επίσκεψη στο σπήλαιο, ενώ στην τέταρτη στήλη παρουσιάζονται οι ίδιες τιμές, αφού πρώτα έχει γίνει αφαίρεση της μέσης τιμής ²¹⁴Bi που είχε προκύψει από σειρά δώδεκα μετρήσεων στον ίδιο εξεταζόμενο σε συνθήκες συνήθων επιπέδων ²¹⁴B (0.264cps), ώστε να εκτιμηθεί, έστω και χονδρικά η αύξησή του λόγω της επίσκεψης στο σπήλαιο. Στον ίδιο πίνακα έχει υπολογιστεί η ολόσωμη ενεργότητα από την σχέση

$$TBBi = \frac{Rate^{214}Bi}{eff_{Bi}}$$

όπου eff_{Bi} η απόδοση ανίχνευσης που ισούται με $1.511 \cdot 10^{-3}$ cps/Bq για το συγκεκριμένο σωματότυπο. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζεται ο χρόνος που μεσολάβησε από το τέλος της ξενάγησης δηλαδή την έξοδο του εξεταζόμενου από το σπήλαιο μέχρι την αρχή κάθε μέτρησης. Έτσι βρέθηκε ότι η ενεργότητα σε ²¹⁴Bi μειώνεται με την πάροδο του χρόνου καθώς επέρχεται ισορροπία των επιπέδων ραδονίου στο σώμα με αυτά του περιβάλλοντος αέρα.

a/a	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ²¹⁴ Bi	Μέση τιμή ²¹⁴ Bi σε φυσιολογικές συνθήκες	Διαφορά	TBBi (Bq)	Ώρα από την ξενάγηση (min)
1	0,587	0,264	0,323	214±25	55
2	0,625	0,264	0,362	239±25	72
3	0,551	0,264	0,287	190±25	89
4	0,415	0,264	0,151	100±22	107
5	0,313	0,264	0,049	32±20	175
6	0,370	0,264	0,107	71±21	188
7	0,288	0,264	0,024	16±20	211

Πίνακας 47: cps ²¹⁴Bi και TBBi που οφείλονται στην επίσκεψη στο σπήλαιο

Στην τελευταία μέτρηση, δηλαδή 3.5 ώρες μετά την ξενάγηση, τα επίπεδα του ^{214}Bi στον εξεταζόμενο προσεγγίζουν την συγκέντρωση ^{214}Bi που είχε μετρηθεί στον οργανισμό του σε συνήθεις συνθήκες.

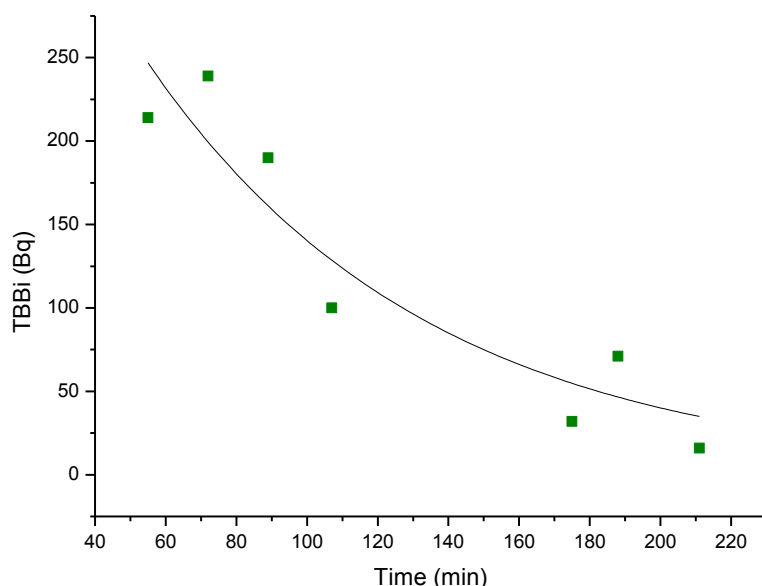
Στα διαγράμματα 20 και 21 συσχετίστηκε ο χρόνος που πέρασε από την ξενάγηση μέχρι την κάθε μέτρηση με την ολόσωμη ποσότητα ^{214}Bi που υπολογίστηκε για κάθε μέτρηση. Τα δύο μεγέθη συνδέονται εκθετικά σύμφωνα με την σχέση

$$y = 491,99 \cdot e^{-0,0125 \cdot x}$$

$$\lambda = 0.0125 \pm 0.003$$

$$A_0 = 419.99 \pm 121.97$$

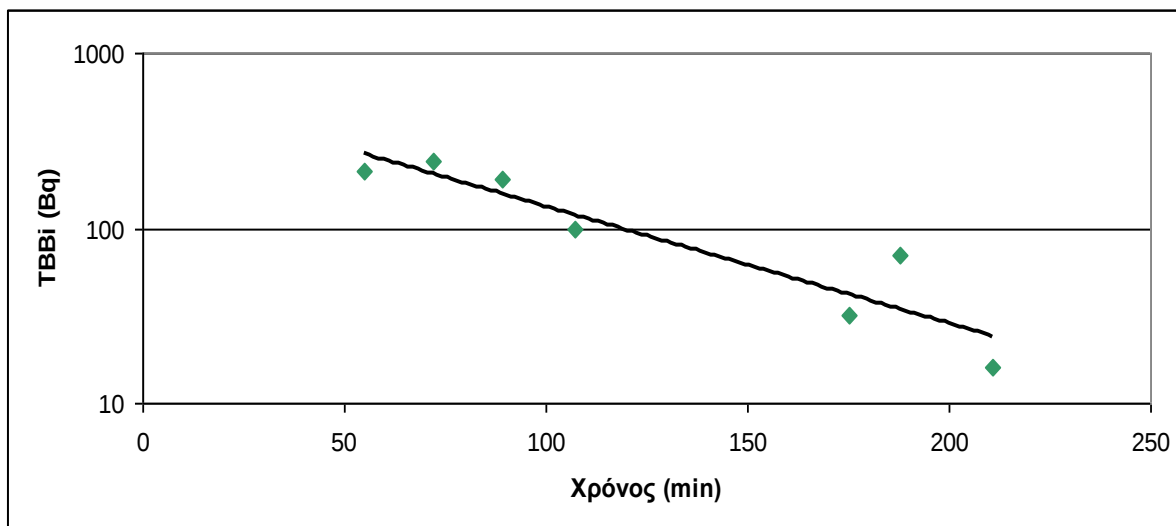
Σύμφωνα με την σχέση αυτή ο ενεργός χρόνος ημιζωής του ^{214}Bi υπολογίζεται ίσος με 55 ± 2 min. Σε προηγούμενη μελέτη ο χρόνος αυτός είχε βρεθεί 47 ± 6 min (Kalef-Ezra & Valakis, 2016).



Γράφημα 20: TBBi συναρτήσει του χρόνου από την ολοκλήρωση της ξενάγησης.

Ο ενεργός χρόνος ημιζωής που βρέθηκε στις δύο μελέτες είναι κατά μέσο όρο ίσος με 51 min δηλαδή περίπου διπλάσιος από τον χρόνο ημιζωής του ^{214}Bi . Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι το ^{214}Pb , που εισήλθε στο σώμα του εθελοντή μέσω εισπνοής, αποδιεγείρεται σε ^{214}Bi οδηγώντας σε αύξηση της δεσμευμένης ποσότητας του στον οργανισμό.

Στη συνέχεια μετρήθηκε ο ρυθμός κρούσεων στην περιοχή που αντιστοιχεί στο ^{214}Pb (352 keV) για να διαπιστωθεί η αναλογία των δύο θυγατρικών του ραδονίου δηλαδή του ^{214}Pb και του ^{214}Bi στα 1760 keV και η εξάρτησή τους από τον χρόνο. Τα δεδομένα παρουσιάζονται στον πίνακα 46.

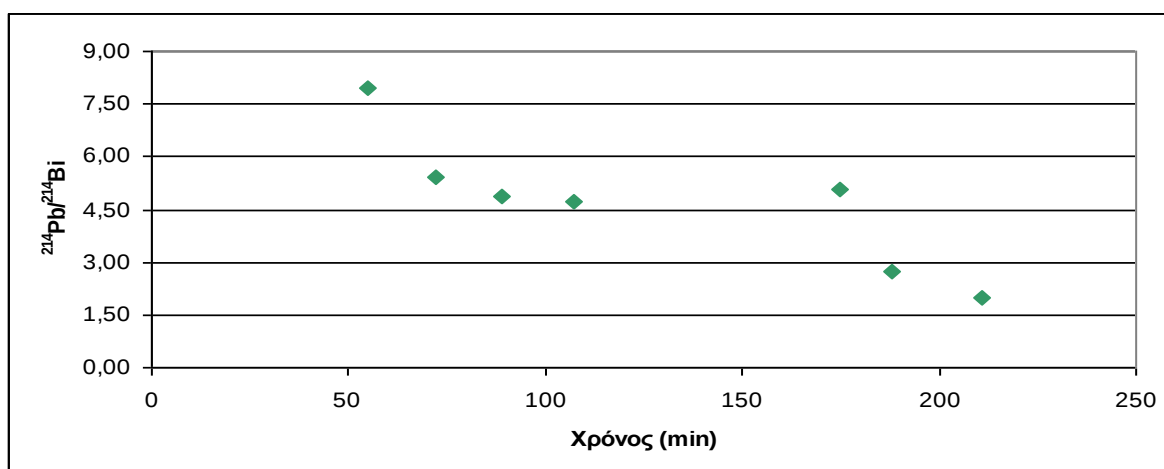


Γράφημα 21: TBBi συναρτήσει του χρόνου από την ολοκλήρωση της ξενάγησης (ημιλογαριθμική κλίμακα).

a/a	cps ^{214}Pb	cps ^{214}Bi	$^{214}\text{Pb}/^{214}\text{Bi}$	Ώρα από την ξενάγηση (min)
1	4,67	0,59	$7,96 \pm 0,38$	55
2	3,38	0,63	$5,40 \pm 0,38$	72
3	2,69	0,55	$4,88 \pm 0,39$	89
4	1,96	0,41	$4,72 \pm 0,38$	107
5	1,59	0,31	$5,08 \pm 0,37$	175
6	1,02	0,37	$2,76 \pm 0,36$	188
7	0,58	0,29	$2,00 \pm 0,38$	211

Πίνακας 48: Αναλογία των δύο θυγατρικών ^{214}Pb και ^{214}Bi

Από την γραφική παράσταση 22 παρατηρείται μείωση στην αναλογία των δύο θυγατρικών του ραδονίου, καθώς αυξάνεται ο χρόνος. Ο ^{214}Pb αποδιεγείρεται σε ^{214}Bi με χρόνο ημιζωής περίπου 30 min, ως αποτέλεσμα, αυξάνεται με το πέρασμα του χρόνου το ^{214}Bi στο σώμα του εξεταζόμενου και έτσι η αναλογία των δύο θυγατρικών μειώνεται.



Γράφημα 22: Αναλογία των θυγατρικών του ραδονίου συναρτήσει του χρόνου από την ολοκλήρωση της ξενάγησης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει σταθερή συγκέντρωση των δύο θυγατρικών σε όλη την έκταση του σπηλαίου και καθώς ο βιολογικός χρόνος ημιζωής του ^{214}Bi βρέθηκε συγκρίσιμος με τον χρόνο που διήρκεσε η ξενάγηση (~50min) δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι είχε επέλθει ισορροπία των δύο θυγατρικών στο σώμα του εξεταζόμενου κατά την διάρκεια της. Ενδεχομένως να μην παρατηρούνταν η ίδια μεταβολή στην αναλογία των δύο θυγατρικών αν ο εξεταζόμενος είχε παραμείνει για περισσότερο διάστημα στο εσωτερικό του σπηλαίου.

Τέλος ποσοτικοποιήθηκαν τα counts στην περιοχή του ^{131}I (364.5 keV) για όλες τις σαρώσεις. Εφαρμόστηκε η σχέση που είχε βρεθεί για τα δεδομένα των μη επαγγελματικά εκτιθέμενων και υπολογίστηκε ο αριθμός των counts που αναμένονταν στην περιοχή του ^{131}I , όπου x είναι η ενεργότητα σε Bq του ^{214}Bi .

$$y = - (0.234 \pm 0.264) + (0.0078 \pm 0.0018) \cdot x$$

a/a	cps ^{131}I (φάσμα)	cps ^{131}I (εξίσωση)	Διαφορά	TBBi (Bq)	Ώρα από την ξενάγηση (min)
1	4,60	1,44	3,17	214	55
2	3,25	1,63	1,62	239	72
3	2,59	1,25	1,34	190	89
4	1,91	0,55	1,37	100	107
5	1,44	0,02	1,42	32	175
6	0,72	0,32	0,41	71	188
7	0,63	-0,11	0,52	16	211

Πίνακας 49: cps στην περιοχή του ^{131}I σχέση με TBBi

Παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται ο χρόνος από την έξοδο από στο σπήλαιο ο ρυθμός παλμών στην περιοχή ενδιαφέροντος του ^{131}I μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην περιοχή αυτή εμπλέκεται η περιοχή ενδιαφέροντος του ^{214}Pb . Ο εξεταζόμενος δεν ήρθε σε επαφή με ^{131}I , για αυτό και δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι τα cps σε αυτήν την περιοχή προέρχονται από το ισότοπο αυτό. Για τον διαχωρισμό των κορυφών του ^{131}I και του ^{214}Pb θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί στις μετρήσεις ανιχνευτής υπερκάθαρου γερμανίου (HPGe) ο οποίος εμφανίζει καλύτερη ενεργειακή διακριτική ικανότητα από τους μετρητές NaI(Tl) που διαθέτει ο ΜΟΑ.

Ακόμη μετρήθηκε ο αριθμός των κρούσεων στην RoI που αντιστοιχεί στα 1460 keV του ^{40}K . Οι πρώτες δύο στήλες αφορούν τον αριθμό των cps που καταγράφηκαν κατά την κύρια μέτρηση στις περιοχές ενδιαφέροντος του ^{40}K και του ^{214}Bi , ενώ οι δύο επόμενες στήλες τις αντίστοιχες τιμές από την μέτρηση του ομοιώματος. Στην πέμπτη στήλη του πίνακα παρουσιάζεται ο καθαρός ρυθμός παλμών ^{40}K που προέκυψε από την αφαίρεση του ρυθμού κρούσεων υποστρώματος από το κύριο ρυθμό κρούσεων, $N_{40\text{K}}$, ενώ στην επόμενη στήλη παρουσιάζεται ο διορθωμένος ρυθμός παλμών του ^{40}K ως προς το ^{214}Bi , $N_{40\text{K}}(\text{cor})$ που υπολογίστηκε με εφαρμογή του τύπου:

$$N_{40\text{K}}(\text{cor}) = N_{40\text{K}} - 1,046 \times N_{214\text{Bi}}$$

Στις μετρήσεις αυτές άλλαξε το πρωτόκολλο σε σχέση με τις προηγούμενες δώδεκα μετρήσεις, που είχαν πραγματοποιηθεί στον ίδιο εξεταζόμενο. Με αυτήν την ευκαιρία

μελετήθηκε πόσο αλλάζουν οι συντελεστές επαναληπτικότητας όταν οι μετρήσεις καλίου διαρκούν ~10 έναντι ~30 min.

Με βάση τον περιορισμένο αριθμό μετρήσεων που έγινε σε ταχέως μεταβαλλόμενες συνθήκες ^{214}Bi , βρέθηκε ότι οι συντελεστές επαναληπτικότητας του καθαρού ρυθμού κρούσεων και του διορθωμένου αριθμού κρούσεων για την επίδραση του ^{214}Bi , αυξήθηκαν με τη μείωση του χρόνου σάρωσης του εθελοντή στο 1/3, από $(7.8 \pm 1.7)\%$ και $(4.7 \pm 1.0)\%$ σε $(12.8 \pm 3.7)\%$ και $(10.9 \pm 3.1)\%$, αντίστοιχα.

Το γεγονός ότι η επαναληπτικότητα των μετρήσεων χειροτέρεψε κατά παράγοντα περίπου του δυο στην περίπτωση των διορθωμένων τιμών, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι σε ειδικές περιπτώσεις εξεταζόμενων, όπως μικρά παιδιά ή ενήλικες με κλειστοφοβία που προσέρχονται στο εργαστήριο για μέτρηση, αν επιλεγεί να χρησιμοποιηθεί διαφορετικό πρωτόκολλο ώστε οι μετρήσεις να διαρκούν λιγότερη ώρα, ενδέχεται να εισαχθεί ένας επιπλέον παράγοντας σφάλματος και να μην είναι ακριβή τα τελικά αποτελέσματα.

a/a	Gross Main ^{40}K / Live Time	Gross Main ^{214}Bi / Live Time	Gross Bg ^{40}K / Live Time	Gross Bg ^{214}Bi / Live Time	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ^{40}K	Διορθωμένος καθαρός ρυθμός κρούσεων ^{40}K	<Live Time> (s)
1	14,774	2,667	10,963	2,080	3,811	3,197	609
2	14,546	2,706	10,963	2,080	3,583	2,929	596
3	14,746	2,631	10,963	2,080	3,782	3,206	588
4	14,602	2,495	10,963	2,080	3,639	3,205	589
5	13,835	2,402	11,088	2,090	2,747	2,420	604
6	14,196	2,460	11,088	2,090	3,108	2,721	611
7	14,032	2,378	11,088	2,090	2,944	2,643	588
Mean value	14,390	2,534	11,017	2,084	3,373	2,903	598
sd	0,369	0,133	0,067	0,005	0,432	0,317	
cv	0,026	0,052	0,006	0,002	0,128	0,109	
CV _{poisson}	0,011	0,026	0,012	0,028	0,064	0,061	

Πίνακας 50: Δεδομένα μετρήσεων ^{40}K

Στον πίνακα 50 υπολογίστηκε η μέση τιμή του καθαρού ρυθμού counts και του διορθωμένου καθαρού ρυθμού counts με την παραδοχή ότι οι ποσότητες αυτές δεν μεταβάλλονται γεγονός που δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα. Παρόλα αυτά υπολογίστηκαν με τον ίδιο τρόπο τόσο οι τυπικές αποκλίσεις όσο και οι πειραματικοί συντελεστές επαναληπτικότητας που παρουσιάζονται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Δ. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Δ.1 Μελέτη ^{40}K στα δύο φύλα

Βρέθηκε ότι η μέση ολόσωμη συγκέντρωση καλίου ήταν μεγαλύτερη ($p\text{-value}=0.034$) στη μικρή ομάδα ανδρών που μελετήθηκε σε σύγκριση με την αντίστοιχη ομάδα γυναικών κατά $\sim 22\%$ ($1.58 \pm 0.28 \text{ g/kg}$ έναντι $1.29 \pm 0.22 \text{ g/kg}$). Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς οι γυναίκες διαθέτουν μεγαλύτερο ποσοστό λίπους στο σώμα τους και μικρότερο ποσοστό μυϊκού ιστού από τους άντρες ανεξαρτήτως ηλικίας. Τα αποτελέσματα των μέσων συγκεντρώσεων καλίου της παρούσας μελέτης συγκρίνονται με αυτά άλλων μελετών ατόμων παρόμοιας ηλικιακής ομάδας για κάθε φύλο, αγνοώντας τις πιθανές εθνικές διαφορές στον Πίνακα 51.

Στην παρούσα μελέτη στο μικρό μικτό στατιστικό δείγμα που μελετήθηκε βρέθηκε τάση μείωσης της συγκέντρωσης καλίου με αύξηση της ηλικίας, εύρημα που είναι σε ποιοτική συμφωνία με τα ευρήματα άλλων ερευνητών που αναφέρονται Πίνακας 51. Σε μελέτη των Kehayias et al, 1997 βρέθηκε μείωση τόσο της ολόσωμης ποσότητας καλίου με την ηλικία όσο και της συγκέντρωσης του όπως φαίνεται στις εικόνες 16 και 17.

Ηλικία (y)	Αριθμός (n)	TBK _{WBC} /Μάζα (g/kg)	sd	Αναφορά
20-29	6	1,44	0,17	παρούσα
20-29	19	1,67	0,22	Kehayias et al
20-24	8	1,52	0,13	Παλλάδα
19-26	6	1,63	0,31	Κατραμάδα
26-27	3	1,52	0,22	Παλλάδα
20-39	11	1,48	0,10	Cohn et al
30-39	2	1,15	0,16	παρούσα
30-39	13	1,59	0,29	Kehayias et al
45-61	3	1,09	0,17	παρούσα
50-59	10	1,35	0,22	Kehayias et al
40-51	4	1,26	0,17	Παλλάδα
45,5 (mean)	669	1,50	0,20	He et al
40-49	10	1,40	0,09	Cohn et al
25-40	313	1,40	0,20	Tolstykh et al
60-69	15	1,36	0,12	Kehayias et al
54-61	4	1,16	0,12	Παλλάδα
50-62	11	1,38	0,12	Cohn et al
70-72	2	0,89	0,13	παρούσα
70-79	12	1,24	0,17	Kehayias et al
18-69	57	1,58		Hawkins et al
24-48	80	1,41	0,1	Lan et al
		1,68	0,33	Lahham et al

Πίνακας 51: Σύγκριση με την βιβλιογραφία της συγκέντρωσης καλίου στις γυναίκες

Ηλικία (y)	Αριθμός (n)	TBK _{WBC} /Μάζα (g/kg)	sd	Αναφορά
24-26	2	1,69	0,14	παρούσα
20-29	14	2,06	0,23	Kehayias et al
20-24	5	1,75	0,22	Παλλάδα
19-26	6	2,1	0,37	Κατραμάδα
25-27	8	1,76	0,19	Παλλάδα
20-30	26	2,17	0,21	Boddy et al
25-29	53	1,88	0,11	Cohn et al
46-65	5	1,52	0,31	παρούσα
40-49	10	1,72	0,19	Kehayias et al
44,4 (mean)	444	1,90	0,30	He et al
45-49	61	1,71	0,11	Cohn et al
50-59	13	1,68	0,17	Kehayias et al
31-51	2	1,78	0,07	Παλλάδα
50-54	36	1,70	0,10	Cohn et al
20-40	203	1,70	0,20	Tolstykh et al
60-69	14	1,56	0,16	Kehayias et al
60-74	3	1,35	0,12	Παλλάδα
60-71	9	1,55	0,09	Cohn et al
20-67	58	2,01		Hawkins et al
23-26	300	1,75	0,4	Lan et al
		1,60	0,3	Lahham et al

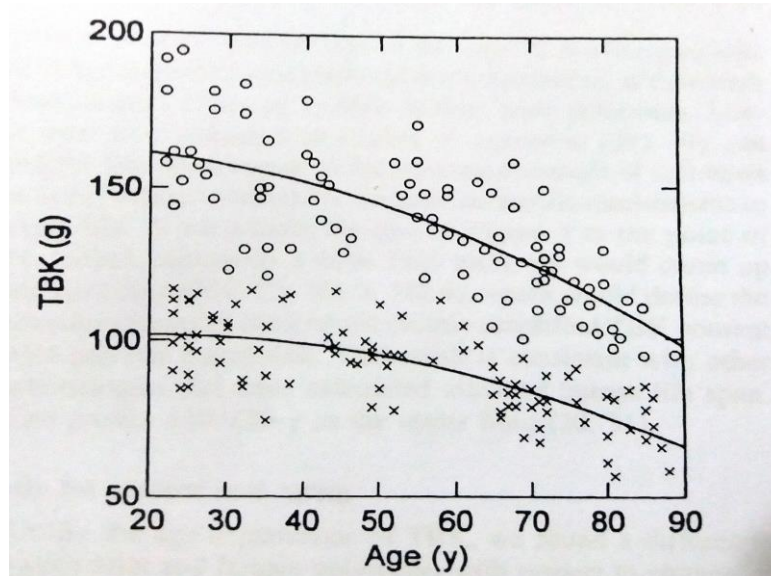
Πίνακας 52: Σύγκριση με την βιβλιογραφία της συγκέντρωσης καλίου στους άντρες

Οι Kehayias et al αναφέρουν ότι η μείωση στους ενήλικες με αύξηση της ηλικίας αποδίδεται στην απώλεια κυτταρικής μάζας εξαιτίας ανεπαρκούς αντικατάστασης των κυττάρων ή εξαιτίας αλλαγής στην συγκέντρωση του ενδοκυττάριου καλίου. Ποιο συγκεκριμένα, οι μεταβολές λόγω ηλικίας που συντελούνται στο μυϊκό σύστημα και στον λιπώδη ιστό διαφέρουν αρκετά μεταξύ των δύο φύλων, λόγω του διαφορετικού ρυθμού παραγωγής στεροειδών που επηρεάζουν την οστική και μυϊκή μάζα (Tolstykh et al, 2016).

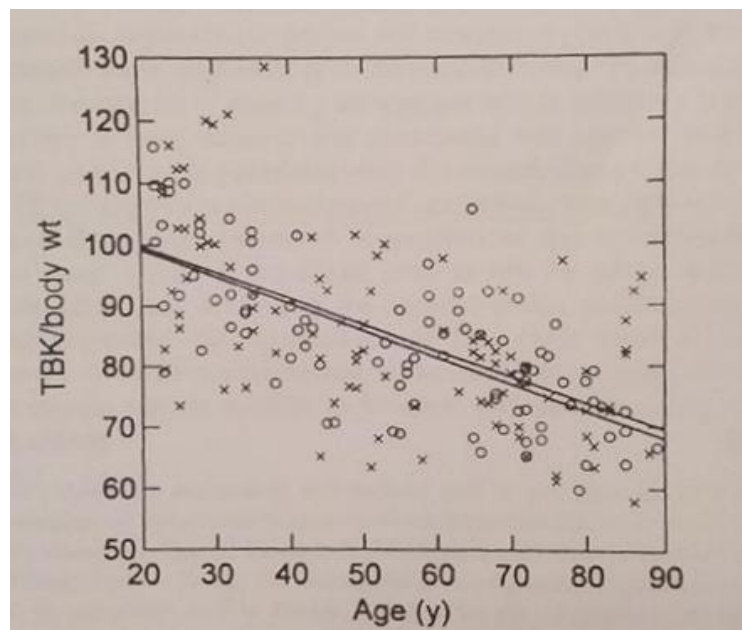
Συγκρίνοντας την παρούσα μελέτη με αυτήν που διενεργήθηκε από την Σ. Παλλάδα, 2012, στον ίδιο MOA φαίνεται οι συγκεντρώσεις καλίου τόσο για τους άνδρες όσο και για τις γυναίκες να είναι παρόμοιες σύμφωνα με τις τυπικές αποκλίσεις που έχουν υπολογιστεί, αν και το δείγμα ήταν μικρό. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην μελέτη της Σ. Παλλάδας οι τιμές που δόθηκαν μετρήθηκαν παλαιότερα με τον ίδιο MOA πριν να γίνουν οι τελικοί υπολογισμοί απόδοσης με χρήση τη μεθοδολογίας Monte Carlo και δεν πραγματοποιήθηκε διόρθωση για τους παλμούς του ²¹⁴Bi που συνεισφέρουν στην κορυφή του ⁴⁰K. Μια άλλη μελέτη από τον Ι. Λεοντίου που πραγματοποιήθηκε στο ίδιο εργαστήριο κατέληξε σε τιμές συγκέντρωσης για τις γυναίκες 1.809 ± 0.027 g/kg ενώ στους άντρες ήταν 2.306 ± 0.033 g/kg, όμως η διάταξη του MOA καθώς και ο τρόπος μέτρησης διέφεραν για αυτό και δεν μπορούν να είναι απολύτως συγκρίσιμα τα αποτελέσματα (π.χ. δεν είχε γίνει διόρθωση για τη συμβολή του ²¹⁴Bi στην περιοχή του ⁴⁰K που μειώνει συνήθως τις τιμές καλίου περί το 7% στον MOA του Εργαστηρίου με την τρέχουσα μορφή).

Εκτός από τις μεμονωμένες μετρήσεις σε εθελοντές στην παρούσα μελέτη διενεργήθηκαν και τριάντα μετρήσεις σε μια ενήλικη γυναίκα και δώδεκα σε έναν ενήλικα άντρα. Ο συν-

τελεστής επαναληπτικότητας των διορθωμένων παλμών ήταν $8.5 \pm 1.1\%$ για τις μετρήσεις της γυναίκας και $4.7 \pm 1.0\%$ στον άντρα ενώ με βάση την τυχαιότητα κατά Poisson αναμένονταν τιμές 4.1% και 3.8% αντίστοιχα. Το εύρημα αυτό οδήγησε στην μελέτη των διαφορών των δύο φύλων. Διαπιστώθηκε ότι ενδεχομένως ο αυξημένος συντελεστής επαναληπτικότητας των μετρήσεων στη συγκεκριμένη γυναίκα να οφείλεται στον ασταθή κύκλο εμμήνου ρύσεώς της. Η παραδοχή αυτή υποστηρίζεται και από σχετική μελέτη του C.J. Cohen, 1973. Όμως λόγω έλλειψης περαιτέρω μετρήσεων, δεν μπορεί στην παρούσα μελέτη να θεωρηθεί απολύτως αποδεκτή. Θα ήταν σκόπιμο σε επόμενες μελέτες να πραγματοποιηθούν επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σε προεμμηνοπαυσιακές και μεταεμμηνοπαυσιακές γυναίκες για να επιβεβαιωθεί ή να απορριφθεί ο ισχυρισμός αυτός.



Εικόνα 16: Ολόσωμη ποσότητα καλίου στις γυναίκες (x) και στους άντρες (o) συναρτήσει της ηλικίας Kehayias et al, 1997



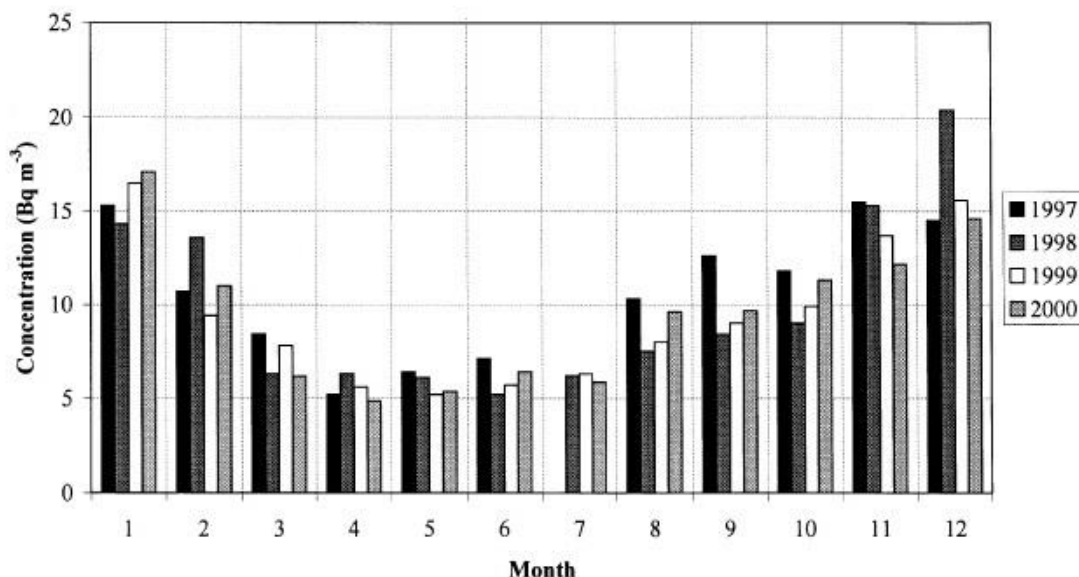
Εικόνα 17: Συγκέντρωση καλίου στις γυναίκες (επάνω) και στους άντρες (κάτω) συναρτήσει της ηλικίας Kehayias et al, 1997

Δ.2 Αποτελέσματα μελέτης ^{214}Bi

Το ραδόνιο και τα θυγατρικά του στο φυσικό περιβάλλον αποτελούν σημαντικό παράγοντα έκθεσης του ανθρώπου σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Η μελέτη της συγκέντρωσης του ραδονίου στον οργανισμό μπορεί να συμβάλλει στην εφαρμογή μέτρων μείωσης αυτού του παράγοντα κινδύνου. Ο ενεργός χρόνος ημιζωής των θυγατρικών του ραδονίου που εισέρχονται στον οργανισμό μέσω της εισπνοής διαφέρει από τον φυσικό χρόνο ημιζωής, για αυτό τον λόγο είναι απαραίτητη η *in vivo* μέτρηση της συγκέντρωσης τους στο σώμα.

Η μέση τιμή της συγκέντρωσης ^{214}Bi που βρέθηκε από τις 23 μετρήσεις που διενεργήθηκαν σε εθελοντές κατοίκους της πόλης των Ιωαννίνων είναι $1.81 \pm 0.83 \text{ Bq/kg}$. Βρέθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο φύλων όσον αφορά την συγκέντρωση του TBBi που είναι $2.08 \pm 0.87 \text{ Bq/kg}$ στις γυναίκες και $1.25 \pm 0.50 \text{ Bq/kg}$ στους άντρες. Παρόλα αυτά δεν βρέθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά στις τιμές του TBBi ($137.5 \pm 59.4 \text{ Bq}$) στις γυναίκες και στους άντρες ($110.2 \pm 47.7 \text{ Bq}$). Σε αντίστοιχη μελέτη των Kalef-Ezra & Valaki, 2016 που περιελάμβανε δεδομένα μετρήσεων στον ίδιο ΜΟΑ από το 2011 έως το 2015 βρέθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά του TBBi ανάμεσα στα δύο φύλα με γενικά χαμηλότερες τιμές TBBi στις γυναίκες από ότι στους άντρες, γεγονός που δεν παρατηρήθηκε στην παρούσα μελέτη, αλλά ενδέχεται να οφείλεται στο περιορισμένο δείγμα που μετρήθηκε ειδικά όσον αφορά τον πληθυσμό των ανδρών. Η διαφορά στα δύο φύλα σύμφωνα με τους Kalef-Ezra και Valaki οφείλεται σε ανατομικούς και φυσιολογικούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα ο όγκος του εισπνεόμενου αέρα ανά ώρα που τείνει να είναι μεγαλύτερος κατά 11%-41% στον τυπικό άντρα σε σχέση με την τυπική γυναίκα. Στην μελέτη αυτή δεν βρέθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των φύλων στο κλάσμα του TBBi/FFM παρόλο που οι ποσότητες του TBBi είναι διαφορετικές. Ως αποτέλεσμα οι συγκεκριμένοι ερευνητές υποστηρίζουν ότι η κύρια πηγή εκπομπής ^{214}Bi είναι λόγω εισπνοής των θυγατρικών του ραδονίου και δεν οφείλεται κυρίως στο ραδόνιο το ίδιο, όπως υποστηρίζουν άλλοι ερευνητές που θεωρούν ότι οι εκπομπές ^{214}Bi οφείλονται στο ραδόνιο που αποθηκεύεται στον λιπώδη ιστό. Υποστηρικτές της θεωρίας αυτής είναι οι Momcilovic και Lykken (2007), οι οποίοι στην μελέτη τους επίσης βρήκαν διαφορές στην συγκέντρωση ^{214}Bi στις γυναίκες και τους άντρες και υποστηρίζουν ότι το γεγονός αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη ποσότητα λίπους που διαθέτουν οι γυναίκες έναντι των αντρών. Σημειώνεται ότι στο ανθρώπινο σώμα παρατηρούνται εποχιακές μεταβολές του βάρους που σχετίζονται με την συσσώρευση λίπους. Σύμφωνα με τους εν λόγω ερευνητές, μια εξαιρετικά υψηλή πρόσληψη υδατανθράκων το φθινόπωρο, οδηγεί σε υψηλή συγκέντρωση λίπους κατά τους χειμερινούς μήνες, καθώς απαιτείται ικανό χρονικό διάστημα για την εναπόθεσή του με συνέπεια να παρατηρούνται διακυμάνσεις στην συγκέντρωση του στον οργανισμό ανάλογα με την περίοδο του έτους.

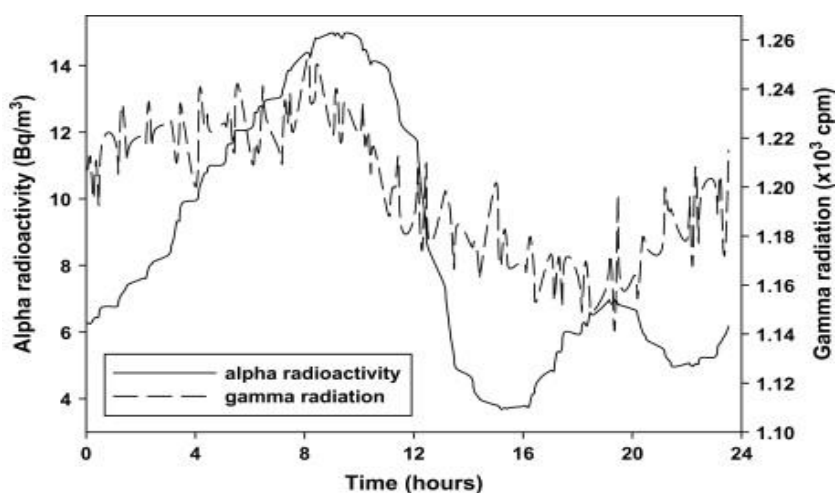
Ακόμη οι εποχιακές μεταβολές της συγκέντρωσης ραδονίου στο περιβάλλον ενδέχεται να επηρεάζουν την τιμή του ^{214}Bi , που ανιχνεύεται στις *in vivo* μετρήσεις. Η παρούσα μελέτη διενεργήθηκε την ψυχρή περίοδο του έτους από τον Νοέμβριο έως τον Μάρτιο. Πολλές μελέτες έχουν δείξει την ύπαρξη υψηλότερων συγκεντρώσεων του ραδονίου και των θυγατρικών του τους χειμερινούς μήνες και χαμηλότερες τους καλοκαιρινούς στον ατμοσφαιρικό αέρα και στο ανθρώπινο σώμα (Sesana et al, 2002, Momcilovic και Lykken, 2007, Kale-Ezra & Valakis, 2016).



Εικόνα 18: Μέση μηνιαία συγκέντρωση ραδονίου για την περίοδο 1997-2000 (Sesana et al,2002)

Μεταβολές στην συγκέντρωση του ραδονίου και των θυγατρικών του στον αέρα παρατηρούνται και κατά την διάρκεια της ημέρας. Στις τριάντα μετρήσεις του υποστρώματος που πραγματοποιήθηκαν σε ομοίωμα ενήλικης γυναίκας βρέθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά των πρωινών μετρήσεων με τις μεσημβρινές και τις απογευματινές μετρήσεις, παρόλο που καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας οι δύο ανεμιστήρες που διαθέτει η αίθουσα παρέμεναν ανοιχτοί σε λειτουργία εξαναγκασμένης εισαγωγής αέρα.

Σύμφωνα με τους Seftelis et al, 2007 και Sesana et al, 2002 κατά την περίοδο των 24h μιας τυπικής μέρας η μεταβολή της γ-ακτινοβολίας στην περιοχή της Ξάνθης φτάνει συνήθως στο μέγιστό της τις πρώτες πρωινές ώρες και στην συνέχεια μειώνεται με ελάχιστη τιμή συγκέντρωσης συνήθως κατά τις απογευματινές ώρες.

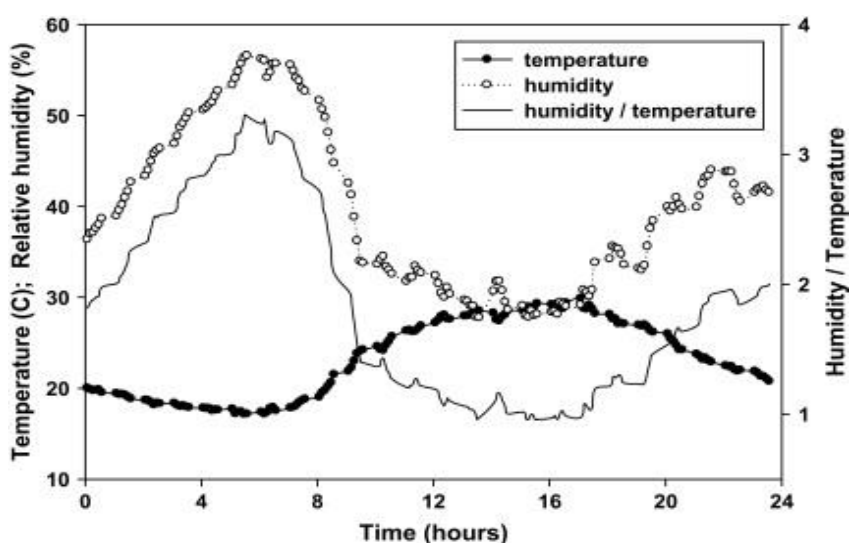


Εικόνα 19: Μεταβολή ακτινοβολίας-γ και α κατά την διάρκεια της ημέρας στην Ξάνθη (Seftelis et al, 2007).

Το ραδόνιο και τα θυγατρικά του μεταφέρονται με διάχυση και μεταφορά από τους πόρους του εδάφους και τους τοίχους στην επιφάνεια του και στην συνέχεια στον αέρα

της ατμόσφαιρας. Η νυχτερινή συσσώρευση του ραδονίου στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας οφείλεται στο χαμηλό στρώμα ανάμειξης με βάση στο επίπεδο του εδάφους που δημιουργείται συχνά λόγω θερμοκρασιακής αναστροφής. Το ραδόνιο ουσιαστικά παγιδεύεται πιο κοντά στο έδαφος. Όταν ανατέλλει ο ήλιος, η αναστροφή αυτή καταστρέφεται και η σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της ροής του αέρα από τα χαμηλότερα (θερμά) στα υψηλότερα (ψυχρά) στρώματα της ατμόσφαιρας οδηγώντας σε απομάκρυνση του ραδονίου σε μεγαλύτερη έκταση και μείωση της συγκέντρωσης του κοντά στο έδαφος.

Οι διακυμάνσεις της συγκέντρωσης του ραδονίου στον αέρα στην ύπαιθρο, άρα και στον αέρα που εισάγεται βίαια στην αίθουσα του ΜΟΑ, σχετίζονται επίσης με τα επίπεδα της σχετικής υγρασίας και την διακύμανση της θερμοκρασίας όπως φαίνεται έμμεσα στην εικόνα 18 ακολουθώντας συνήθως αντίστροφη ημερήσια μεταβολή.



Εικόνα 20: Μεταβολές θερμοκρασίας και υγρασίας κατά την διάρκεια της ημέρας

Τέλος, μελετώντας τις δώδεκα μετρήσεις που διενεργήθηκαν σε ενήλικα άντρα ως προς τις καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά την διεξαγωγή τους, παρατηρήθηκε μικρότερη μέση τιμή (0.208 ± 0.096) cps κατά τις βροχερές μέρες από τις ημέρες που επικρατούσε ηλιοφάνεια (0.275 ± 0.083) cps η διαφορά αυτή όμως δεν ήταν στατιστικά σημαντική ($p=0.33$). Δεν βρέθηκε δηλαδή στατιστικά σημαντική διαφορά που να αποδίδεται στις καιρικές συνθήκες τόσο στις μετρήσεις στον εξεταζόμενο όσο και στις μετρήσεις του ομοιώματος όμως το συμπέρασμα αυτό δεν είναι απολύτως ασφαλές καθώς το δείγμα των μετρήσεων ήταν μικρό.

Δ.3 Εσωτερική δοσιμέτρηση των επαγγελματικά εκτιθέμενων

Οι εργαζόμενοι στα Εργαστήρια Πυρηνικής Ιατρικής εκτίθενται κατά την καθημερινή πράξη και σε ανοικτές πηγές ιοντιζουσών ακτινοβολιών. Εκτός από την δοσιμέτρηση των εξωτερικών δόσεων, τίθεται και το ζήτημα της ποσοτικοποίησης των εσωτερικών τους εκθέσεων, ανάλογα με τις μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται στο κάθε τμήμα.

Σύμφωνα με τις οδηγίες προστασίας του ΔΟΑΕ (IAEA, Vienna 1999) η απόφαση για την ατομική δοσιμέτρηση του προσωπικού από ανοικτές πηγές εξαρτάται από τα

ραδιονουκλίδια που χρησιμοποιούνται και στις πρακτικές που εφαρμόζονται. Ο παράγοντας απόφασης (decision factor, d_j) για ένα ραδιονουκλίδιο j και μια συγκεκριμένη πρακτική δίνεται από τον τύπο

$$d_j = \frac{A_j \cdot e(g)_j \cdot f_{fs} \cdot f_{hs} \cdot f_{ps}}{0,001}$$

όπου

A_j : η συνολική ετήσια ενεργότητα του ραδιονουκλιδίου j που υπάρχει στον χώρο εργασίας

$e(g)_j$: dose coefficient ($\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$) για εισπνοή του ραδιονουκλιδίου j

f_{fs} : παράγοντας ασφάλειας με βάση τα φυσικά και τα χημικά χαρακτηριστικά του υλικού που χειρίζεται ο εργαζόμενος (physical form safety factor), (συνήθως θεωρείται ίσος με 0,01)

f_{hs} : παράγοντας ασφάλειας σχετικός με την εμπειρία χρήσης και το είδος του υλικού (handling safety factor) με προτεινόμενο εύρος 0.01-100

f_{ps} : παράγοντας ασφάλειας χώρου όπου γίνεται η πράξη (protection safety factor) με προτεινόμενο εύρος 0.01-1, που βασίζεται στα πιθανά μέτρα ασφαλείας που λαμβάνονται κατά την διαχείριση του ραδιονουκλιδίου j με τη συγκεκριμένη μορφή (π.χ. χρήση απαγωγού εστίας)

0.001: παράγοντας μετατροπής από Sv σε mSv (παρονομαστής)

Ο παράγοντας απόφασης (decision factor) για την ανάγκη άμεσης ή έμμεσης ατομικής εσωτερικής δοσιμέτρησης ενός εργαζόμενου, λαμβάνει υπόψη όλα τα ραδιονουκλίδια που χρησιμοποιεί και τις πρακτικές στον χώρο εργασίας, υπολογίζεται από τη σχέση

$$D = \sum_j d_j$$

Αν $D < 1$ η ατομική δοσιμέτρηση ενδέχεται να μην είναι απαραίτητη, αν όμως $D \geq 1$ η ανάγκη για ατομική δοσιμέτρηση πρέπει να μελετάται.

Αν στον χώρο εργασίας οι εργαζόμενοι διαχειρίζονται περισσότερα από ένα ραδιονουκλίδια, οι αποφάσεις για ατομική δοσιμέτρηση για κάθε ραδιονουκλίδιο μπορεί να βασίζεται στα ακόλουθα κριτήρια:

- 1) Όλα τα ραδιονουκλίδια για τα οποία $d_j \geq 1$ πρέπει να παρακολουθούνται
- 2) Όταν $D \geq 1$ ραδιονουκλίδια για τα οποία $d_j \geq 0,3$ πρέπει να παρακολουθούνται
- 3) Η παρακολούθηση των ραδιονουκλιδίων για τα οποία ο παράγοντας d_j είναι μικρότερος από 0,1 δεν είναι απαραίτητη.

Θεωρώντας ότι στο Εργαστήριο Πυρηνικής Ιατρικής του ΠΓΝΙ χρησιμοποιούνται μόνο τα δύο ραδιονουκλίδια που ανιχνεύτηκαν κατά τις μετρήσεις των εργαζομένων, δηλαδή το ^{99m}Tc και το ^{131}I , έγινε προσπάθεια υπολογισμού του παράγοντα απόφασης για το συγκεκριμένο εργαστήριο με την υπόθεση εργασίας ότι οι 4 συγκεκριμένοι ιατροί που μελετήθηκαν ασχολούνται αποκλειστικά με τη χορήγηση διαγνωστικών δόσεων ^{99m}Tc και ^{131}I για διαγνωστικούς και θεραπευτικούς σκοπούς που δεν ξεπερνούν τα 15 mCi, με σκοπό να διερευνηθεί αν θα πρέπει να υποβάλλονται σε ατομική δοσιμέτρηση ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Άρα εξαιρέθηκαν οι γιατροί που ασχολούνται με τη χορήγηση υψηλών θεραπευτικών δόσεων και αγνοήθηκαν οι υπόλοιπες δραστηριότητές τους (στο εν λόγω εργαστήριο (η παρασκευή των ραδιοφαρμάκων, εκτός από σπάνιες περιπτώσεις γίνεται από τεχνολόγους του εργαστηρίου).

Θεωρήθηκε ότι οι εν λόγω χορηγήσεις γίνονται ισόποσα από τους τέσσερεις πυρηνικούς γιατρούς, ειδικευμένους ή ειδικευόμενους σε προχωρημένο στάδιο της ειδίκευσής τους. Το είδος, η δόση ραδιοφαρμάκου που χορηγείται και ο αριθμός των πράξεων που έγιναν το 2016 συνολικά στο ΠΓΝΙ παρουσιάζονται στους πίνακες 53 και 54. Βρέθηκε ότι η συνολική ενεργότητα ^{99m}Tc που χορήγησαν οι εν λόγω πυρηνικοί γιατροί ήταν 2.39 TBq (64.7 Ci), ενώ η συνολική ενεργότητα ^{131}I που χορήγησαν για διαγνωστικούς και θεραπευτικούς σκοπούς 0.45 GBq (0.12 Ci).

Είδος Εξέτασης	Ραδιοφάρμακο	Δόση MBq (mCi)	Αριθμός εξετάσεων	Συνολική δόση (mCi)
Σπινθ/μα θυρεοειδούς	^{99m}Tc pertechnetate	185 (5)	299	1495
Στατικό σπινθ/μα νεφρών	^{99m}Tc DMSA	185 (5)	178	890
Δυναμικό σπινθ/μα νεφρών	^{99m}Tc MAG3	185 (5)	28	140
Δυναμικό σπινθ/μα νεφρών	^{99m}Tc DTPA	370 (10)	135	1350
Σπινθ/μα οστών	^{99m}Tc MDP HMDP, HEDP	740 (20)	1071	21420
Σπινθ/μα αιμάτωσης πνευμόνων	^{99m}Tc MAA	185 (5)	68	340
Σπινθ/μα μυοκαρδίου κόπωσης	^{99m}Tc Tetrofosmin	296 (8)	1217	9736
Σπινθ/μα μυοκαρδίου ηρεμίας	^{99m}Tc Tetrofosmin	925 (25)	1150	28750
Κοιλιογραφία (MUGA)	^{99m}Tc + ψυχρό Stanus	925 (25)	8	200
Σπινθ/μα εγκεφάλου (αιμάτωσης)	^{99m}Tc (Ceretic)	555 (15)	25	375
Ολόσωμο διαγνωστικό σπινθ/μα (uptake 0%)	^{131}I	185 (5)	73	365
Μέτρηση πρόσληψης θυρεοειδούς	^{131}I	1,48 (40μCi)	46	1,84
Σύνολο (^{99m}Tc)			4179	64696
Σύνολο (^{131}I)			119	366,84

Πίνακας 53: Συνολική δόση διαγνωστικών εξετάσεων στο τμήμα πυρηνικής ιατρικής κατά την διάρκεια ενός έτους

Είδος θεραπείας	Ραδιοφάρμακο	Δόση MBq (mCi)	Αριθμός εξετάσεων	Συνολική δόση (mCi)
Θεραπευτικό I-131 (<=15mCi)	^{131}I	15mCi	8	120
Θεραπευτικό I-131 (>15mCi)	^{131}I	15mCi	68	1020
Σύνολο (^{131}I)			76	1140

Πίνακας 54: Συνολική δόση θεραπευτικών εξετάσεων στο τμήμα πυρηνικής ιατρικής κατά την διάρκεια ενός έτους

Υπολογίσθηκε ο παράγοντας d για τη διενέργεια εξετάσεων με ραδιοφάρμακα που περιέχουν ^{99m}Tc για κάθε ένα από τέσσερεις γιατρούς θεωρώντας ότι εσωτερική ραδιομόλυνση γίνεται κυρίως μέσω αναπνοής. Επειδή δεν βρέθηκαν αξιόπιστα βιβλιογραφικά δεδομένα για τους παράγοντες f για την συγκεκριμένη πρακτική χρησιμοποιήθηκε η αντίστροφη τεχνική. Με βάση τις λίγες τυχαίες μετρήσεις που έγιναν με το MOA στους εν λόγω εργαζόμενους σε ημέρες κατά τις οποίες δεν υπήρχε ένδειξη ραδιολογικού συμβάντος, βρέθηκε τυπική ενεργότητα 260 Bq. Θεωρώντας ότι μέσος χρόνος ανάμεσα στην είσοδο στο σώμα του εργαζόμενου και την μέτρηση ήταν 5 ώρες και ότι ο ενεργός χρόνος ημιζωής είναι 5 ώρες, συμπεραίνουμε ότι η ενεργότητα που εισήλθε στο σώμα του τη συγκεκριμένη ημέρα ήταν ~500 Bq, θεωρώντας ότι το ~4%

οφείλεται σε ενεργότητα που σχετίζεται με τις πράξεις του τις τελευταίες ημέρες. Θεωρώντας ότι οι εργάσιμες μέρες είναι 250 και ότι κάθε γιατρός χορηγεί ετησίως το 1/4 του συνολικού ετήσιου, δηλαδή $6 \cdot 10^{11}$ Bq ή $2.4 \cdot 10^9$ Bq ημερησίως. Άρα μέσα στο σώμα του βρέθηκε το $2 \cdot 10^{-7}$ της ποσότητας που χορηγεί. Ως εκ τούτου μπορούμε να θεωρήσουμε συντηρητικά το γινόμενο των τριών παραγόντων f ίσο με $2 \cdot 10^{-7}$. Επομένως η ενεργότητα που μετρήθηκε μια τυχαία μέρα είναι μικρότερη κατά $\sim 10^{-7}$ φορές από αυτήν που χορηγείται. Θεωρώντας $e(g)_j = 2.0 \cdot 10^{-11}$ Sv·Bq⁻¹ για εισπνοή αεροζόλ αεροδυναμικής διαμέτρου 5μm (ICRP 68).

$$d_{Tc-99m} = \frac{6,0 \cdot 10^{11} (Bq) \cdot 2,0 \cdot 10^{-11} (Sv / Bq) \cdot 2,0 \cdot 10^{-7}}{0,001} = 0,0024$$

Όσον αφορά το ¹³¹I στις διαγνωστικές εξετάσεις

$$d_{I-131} = \frac{3,39 \cdot 10^9 (Bq) \cdot 1,1 \cdot 10^{-8} (Sv / Bq) \cdot 0,01 \cdot 0,01 \cdot 0,01}{0,001} = 0,037$$

A=3.39·10⁹ Bq

e(g)_j=1.1·10⁻⁸ για εισπνοή αεροζόλ 5μm

f_(fs)j=0.01

f_(hs)j=0.01 (θεωρώντας ότι οι γιατροί χορηγούν κάψουλα ¹³¹I)

f_(ps)j=0.01 (θεωρώντας ότι οι χορηγήσεις διενεργούνται σε χώρο με απαγωγή αερίων)

Ενώ για τις θεραπευτικές εφαρμογές του ¹³¹I

$$d_{I-131} = \frac{1,05 \cdot 10^{10} (Bq) \cdot 1,1 \cdot 10^{-8} (Sv / Bq) \cdot 0,01 \cdot 0,01 \cdot 0,01}{0,001} = 0,11$$

Στην περίπτωση αυτή θεωρήθηκε ότι σε όλες τις εφαρμογές χορηγούνται κάψουλες ¹³¹I για αυτό το λόγο ο παράγοντας f_{hs} ισούται με 0.01.

Ο τελικός παράγοντας, D, για όλα τα ραδιονουκλίδια δίνεται για κάθε γιατρό από τον τύπο:

$$D = \sum_j d_j = 0,0024 + 0,037 + 0,11 = 0,15 < 1$$

Σύμφωνα με τον εν λόγω υπολογισμό του παράγοντα D φαίνεται να μην υπάρχει ανάγκη ατομικής δοσιμέτρησης των γιατρών που χορηγούν τα ραδιοφάρμακα.

Παρόλα αυτά οι παραδοχές που έγιναν στον υπολογισμό αυτό δεν ανταποκρίνονται με ακρίβεια στις συνθήκες λειτουργίας του συγκεκριμένου τμήματος Πυρηνικής Ιατρικής για αυτό και η πρόταση της εν λόγω μελέτης είναι να γίνονται ανά διαστήματα μετρήσεις των εργαζομένων ώστε να ποσοτικοποιηθούν καλύτερα οι παράγοντες για τις πρακτικές που ακολουθούνται. Έτσι θα είναι δυνατό να υπολογιστεί εκ νέου ο παράγοντας D για να διαπιστωθεί αν υπάρχει πραγματικά ανάγκη εσωτερικής δοσιμέτρησης του προσωπικού.

Στην ποσοτικοποίηση αυτή ίσως να βοηθούσε και η μελέτη με παθητικούς ανιχνευτές της ενεργότητας του αέρα στους χώρους του εργαστηρίου.

Επίσης η σύγκριση των αποτελεσμάτων διαφορετικών μελετών δεν ενδείκνυται, για αυτό και δεν γίνεται αναφορά σε άλλες μελέτες, καθώς σε κάθε τμήμα πυρηνικής εργάζεται διαφορετικός αριθμός ατόμων, διαφορετικών ειδικοτήτων και χρησιμοποιούνται άλλες πρακτικές και μέτρα προστασίας. Ο ΔΟΑΕ δεν προτείνει συγκεκριμένο περιοδικό πρόγραμμα καταγραφής των εσωτερικών δόσεων αλλά αναφέρει ότι πρέπει να εξαρτάται από την φυσική και χημική δομή των ραδιοφαρμάκων, τον χρόνο παραμονής και τον τρόπο πρόσληψης στα όργανα, την ραδιοτοξικότητα και τον φυσικό χρόνο ημιζωής. Οι εργαζόμενοι που εντάσσονται σε πρόγραμμα παρακολούθησης για τυχόν εσωτερικές μολύνσεις από ραδιονουκλίδια μπορούν να ελέγχονται με *in vivo* μεθόδους όπως οι μετρητές ολόσωμης ακτινοβολίας ή ειδικούς μετρητές για συγκεκριμένα όργανα όπως ο θυρεοειδής και/ή με *in vitro* τεχνικές μέσω βιολογικών δειγμάτων (ούρα και κόπρανα) ή δείγματα αέρα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bitar A., Maghrabi M., Doubal A.W.: *"Assessment of intake and internal dose from iodine-131 for exposed workers handling radiopharmaceutical products"*, Applied Radiation and Isotopes 82: 370-375 (2013)
- Boddy K., Priscilla C. King, R. Hume, Elspeth Weyers: *"The relation of total body potassium to height, weight, and age in normal adults, Scotland, Glasgow"*, J. Clin. Path., 25: 512-517, (1972)
- Canberra, Mirion Technologies *"Spectrum Analysis"* (2017) Connecticut, USA.
- Cohen J. C.: *"Variation of Body Potassium Mass in Humans"*, Human Biology, Vol.45, No. 4: 553-561 (1973)
- Cohn S. H. and Dombrowski C. S.: *"Absolute measurement of whole-body potassium by gamma-ray spectrometry"*, J. Nucl. Med., 11: 239-246 (1970)
- Currie L. A.: *"Limits for qualitative detection and quantitative determination"*, Anal. Chem., 40: 586-593 (1968).
- Frederick W. Lengemann and John H. Woodburn: *"Whole body counters"* United States Atomic Energy Commission Division of Technical Information (1964)
- Gerber G. B., R. G. Thomas: *"Radiation Protection Dosimetry: Guidebook for the treatment of accidental internal radionuclide contamination of workers"*, Nuclear Technology Vol. 41 No1 (1992)
- Hawkins T., A. W. Goode: *"The determination of total-body potassium using a whole-body monitor"*, Phys. Med. Biol., 21: 293-297, (1976)
- IAEA: *"Assessment of Occupational Exposure Due to Intakes of Radionuclides Safety Guide No. RS-G-1.2"*, IAEA Safety Standards Series, Vienna, Austria (1999)
- IAEA: *Diagnostic Radiology Physics (A Handbook for Teachers and Students)*, Vienna Austria, 2014
- IAEA: *Directory of Whole-Body Radioactivity Monitors (STI/PUB/213)*, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (1970)
- IAEA: *Nuclear Medicine Physics: A Handbook for teachers and students*, Vienna, Austria 2014
- IAEA: *Lecture Notes "Assessment of Occupational Exposure due to Intakes of Radionuclides"*, 2014, Vienna, Austria
- International Commission on Radiological Protection, *"Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers"* Publication No.68, Elsevier Science, Oxford (1994)

- International Commission on Radiological Protection (ICRP) Publication No.23, "Report of the task Group on reference Man", Oxford, Pergamon Press, Great Britain 1975
- International Commission on Radiological Protection (ICRP) Publication 115: "Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon", Part 1, 2010
- Kalef-Ezra A. John, Stratos T. Valakis, Stavroula Pallada: "*Measurement uncertainties in whole body counting and radon progeny*", Health Phys. 107(1): 36–46 (2014)
- Kalef-Ezra A. John and Stratos T. Valakis: "*Direct total body ^{214}Bi measurements and their implications for radon dose assessment*", J. Radiol. Prot. 36: 518–531 (2016)
- Kehayias Joseph J., Fiatarone Maria A., Hong Zuang, Roubenoff Ronenn: "*Total body potassium and body fat: relevance to aging*", The American Journal of Clinical Nutrition, 66: 904-910 (1997)
- Knoll G. F.: "*Radiation Detection and Measurement*", 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York (2000)
- Lan Chao-Yeh and Weng Pao-Shan, "*Body K and ^{40}K in Chinese subjects measured with a whole body counter*", Health Phys., 57: 743-746, (1989)
- Lahham A., Fulop M., Vladar M., Ragan P.: "*Body Potassium Content and Radiation Dose from ^{40}K to the Slovak Population*", Health Physics Society 74: 346-349 (1998)
- Leggett R.W.: "Metabolic Data and Retention Functions for the Intracellular Alkali Metals", Oak Ridge National Laboratory (1983)
- Lopez M. A., J. W. E. van Dijk, C. M. Castellani, L. Currivan, R. Falk, P. Olko and C. Wernli: "*Individual monitoring for internal exposures in Europe: Conclusions of an Eurados action*", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 118, No. 2: 176–181 (2006)
- Luana Gomes Carneiro, Eder Augusto de Lucena, Camillada Silva Sampaio, Ana Letícia Almeida Dantas, Wanderson Oliveira Sousa, Maristela Souza Santos, Bernardo Maranhão Dantas: "*Internal dosimetry of nuclear medicine workers through the analysis of ^{131}I in aerosols*" Applied Radiation and Isotopes 100: 70–74 (2015)
- Milbrath B. D., Peurrung A. J., Bliss M. and Weber W. J.: "*Radiation detector materials: An overview*", Journal of Mater. Res, 23: 2561-2581 (2008)
- Momcilovic Berislav., Lykken I. Glenn: "*Seasonality of ^{214}Bi activity in the human body and of ^{222}Rn concentration in home ambient air*", Health Phys. 92(5): 484-487 (2007)
- Papachristodoulou C. A., Patiris D. L. and Ioannides K. G.: "*Exposure to indoor radon and natural gamma radiation in public workplaces in North-Western Greece*", Radiat. Meas. 45: 865–871 (2010)
- Patrick John: "*Assessment of body potassium stores*", Kidney International, vol. 11: 476-490 (1977)
- Paul Lijnen, Jean-Rene M' Bugamba-Kabangu, Robert Fagard, Jan Staessen, Antoon Amery: "Erythrocyte Concentrations and Transmembrane Fluxes of Sodium and

Potassium in Essential Hypertension: Role of Intrinsic and Environmental Factors", Cardiovascular Drugs and Therapy 4: 321-333, Leuven, Belgium (1990)

-Qing He, Moonseong Heo, Stanley Heshka, Jack Wang, Richard N Pierson Jr, Jeanine Albu, Zimian Wang, Steven B Heymsfield, and Dymrna Gallagher: "Total body potassium differs by sex and race across the adult age span", The American Journal of Clinical Nutrition, 78: 72-77 (2003)

-Rahman M. Sohelur, Mollah A. S., Begum A., Islam M., Zaman M.A.: "Body radioactivity and radiation dose from ^{40}K in Bangladeshi subjects measured with a whole-body counter", Radiation Protection Dosimetry, vol. 130, No. 2: 236-238 (2008)

-Saint-Gobain Crystals: NaI(Tl) and Polyscin NaI(Tl) Sodium Iodide Scintillation Material, (Bicron) Ohio, USA

-Seftelis I., Nicolaou G., Trassanidis S., Tsagas N.F.: "Diurnal variation of radon progeny", Journal of Environmental Radioactivity 97: 116-123 (2007)

-Seftelis I., Nicolaou G., Tsagas N.F.: "A mathematical description of the diurnal variation of radon progeny", Applied Radiation and Isotopes 66: 75-79 (2008)

-Sesana L., Caprioli E., Marazzan G. M.: "Long period study of outdoor radon concentration in Milan and correlation between its temporal variations and dispersion properties of atmosphere", Journal of Environmental Radioactivity 65: 147-160 (2003)

-Stamatelatos I.E., J.Kalef-Ezra, S. Economides, S. Yasumura: "Caesium retention during pregnancy in mice", Journal of Environmental Radioactivity 46: 171-177 (1999)

-Stratos T. Valakis, Stavroula Pallada, and John A. Kalef-Ezra: "Measurement uncertainties in whole body counting and radon progeny" Health Phys. 107(1): 36-46 (2014)

-Supian Bin Samat, Stuart Green and Alun H. Beddoe: "The ^{40}K activity of one gram of potassium", Phys. Med. Biol. 42: 407-413 (1997)

-Tolstykh Evgenia I., Degteva Marina O., Bougrov Nikolay G., Napier Bruce A.: "Body potassium content and radiation dose from ^{40}K for the Urals Population (Russia)", Plos one DOI:10.1371/journal.pone.0154266 (2016)

-Βαλάκης Σ. Θ.: "Ανάπτυξη και εφαρμογή μεθόδων μέτρησης ραδιονουκλιδίων με μέτρηση ολόσωμης ακτινοβολίας", Διδακτορική Διατριβή, Ιατρική Σχολή Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, Ιωάννινα (2013)

-Βαλάκης Σ. Θ.: "Βαθμονόμηση και ποιοτικός έλεγχος Μετρητή Ολόσωμης Ακτινοβολίας με δύο ανιχνευτές NaI(Tl)", Διπλωματική Εργασία ΔΔΜΠΣ, Ιωάννινα (2006)

-Δημητρίου Α. Παναγιώτης: "Σημειώσεις ανιχνευτές κρύσταλλοι ιωδιούχου νατρίου", ΔΔΜΠΣ Ιατρικής Φυσικής – Ακτινοφυσικής, Αθήνα 2010

-Ιωάννης Δ. Λεοντίου: "Πρωτότυπος Μετρητής Ολόσωμου γ- Ακτινοβολίας και η χρήση του στον in-vivo προσδιορισμό του ραδιενεργού καλίου και κασίου", Διδακτορική διατριβή (1990)

-Κατραμάδα Ηλέκτρα: "Έλεγχος ποιοτικών χαρακτηριστικών μετρητή ολόσωμης ακτινοβολίας", Πτυχιακή εργασία, Ιωάννινα, 2016

-Ντάλλα Ε.: "Προσδιορισμός φυσικών και τεχνητών ραδιονουκλιδίων με χρήση μετρητή ολόσωμης ακτινοβολίας ACCUSCAN 2280", Διπλωματική Εργασία ΔΔΜΠΣ, Αθήνα (2014)

-Παλλάδα Σ: "Μετρητής Ολόσωμης Ακτινοβολίας και εφαρμογές", Διπλωματική εργασία για ΔΔΠΜΣ Ιατρικής Φυσικής-Ακτινοφυσικής, Ιωάννινα, 2012

-Σουψάνας Θ: "Κατασκευή αναβαθμισμένου μετρητή ολόσωμης ακτινοβολίας", Διπλωματική εργασία, Ιατρική Σχολή Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, Ιωάννινα, 2003

-Τζίμα Ε: "Σχεδίαση και ανάπτυξη πρότυπου μετρητή ολοσώμου ακτινοβολίας", Διδακτορική Διατριβή, Ιατρική Σχολή Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, Ιωάννινα, 2003

-Χριστόφη Αντώνης: "Ομοιομορφία απόδοσης μετρητή ολόσωμης ακτινοβολίας", Διπλωματική εργασία για ΔΔΠΜΣ Ιατρικής Φυσικής-Ακτινοφυσικής, Ιωάννινα, 2014

-www.eeae.gr

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Α. Εσωτερική Απόδοση Ανιχνευτών

Εισαγωγή-Σκοπός: Το Νοέμβριο του 2016 μελετήθηκε η εσωτερική ανιχνευτική απόδοση καθενός από τους δεκατρείς ενεργούς ανιχνευτές NaI(Tl) του ΜΟΑ που ήταν σε λειτουργία με σκοπό να εντοπισθούν πιθανές διαχρονικές μεταβολές στην απόδοσή τους. Τα ευρήματα συγκρίθηκαν με αυτά μελέτης που διενεργήθηκε πριν από 12 μήνες από την φοιτήτρια Κατραμάδα Ηλέκτρα. Και στις δυο περιπτώσεις η τάση τροφοδοσίας των ανιχνευτών ήταν 950 V. Η διαδικασία επαναλήφθηκε το Φεβρουάριο του 2017 με χρήση υψηλότερη τάσης τροφοδοσίας, 985 V, και μείωση των παραγόντων ενίσχυσης στους ενισχυτές και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα.

Πειραματική διαδικασία: Χρησιμοποιήθηκε σημειακή πηγή βαθμονόμησης ^{137}Cs αρχικής ονομαστικής ενεργότητας $A_0=1.156 \mu\text{Ci}$ ή 42.77 kBq , κατασκευής Amersham. Η αρχική βαθμονόμηση έγινε την 1η Ιανουαρίου 1982 με σχετικό σφάλμα ενεργότητας 6% σε διάστημα εμπιστοσύνης 99.7%. Η ενεργότητα της πηγής κατά την ημέρα διεξαγωγής του πειράματος (21/11/2016), αγνοώντας το σφάλμα του χρόνου ημιζωής ήταν:

$$A = 0,45 \cdot A_0 = 19,25 \text{ kBq} \pm 6\%$$

θεωρώντας χρόνο ημιζωής $t_{1/2}=30.17\text{y}$, όπως και στην εργασία της Κατραμάδα, και ότι πέρασαν 34.8y από την αρχική βαθμονόμηση.

Το πείραμα επαναλήφθηκε στις 6/2/2017 με αλλαγή στην τάση τροφοδοσίας των ανιχνευτών.

Η πειραματική διαδικασία είχε ως εξής: Η πηγή ^{137}Cs τοποθετήθηκε (εκτός θήκης) σε επαφή με το κέντρο της κυκλικής επιφάνειας κάθε ανιχνευτή και καταγράφηκαν παλμοί για 300 s (live time). Στην συνέχεια απομακρύνθηκε η πηγή και πραγματοποιήθηκε καταγραφή των παλμών υποστρώματος για 300 s. Κατά την διάρκεια καταγραφής παλμών από τον εκάστοτε ανιχνευτή, οι υπόλοιποι παρέμειναν ανενεργοί, ώστε να διατηρηθεί όσο το δυνατόν μικρότερη η τιμή του νεκρού χρόνου (dead time).

Πειραματικά ευρήματα: Για κάθε ανιχνευτή καταγράφηκαν στον Πίνακα 1 ο αριθμός του καναλιού στο οποίο αντιστοιχεί ο μέγιστος αριθμός παλμών (Peak Channel, PC) με την υπόθεση κανονικής κατανομής, ο αριθμός των καναλιών που αντιστοιχούν στο FWHM, ο αριθμός καναλιών της περιοχής ενδιαφέροντος (ROI) που χρησιμοποιήθηκε πλάτους $1.35 \cdot \text{FWHM}$ (88.8% του συνόλου), ο αριθμός των παλμών στην περιοχή ενδιαφέροντος για την κύρια μέτρηση και την μέτρηση υποστρώματος και η τιμή του αναγραφόμενου νεκρού χρόνου (dead time). Στην τελευταία στήλη του Πίνακα 1 εμφανίζονται οι τιμές της σχετικής διακριτικής ικανότητας, όπως υπολογίστηκαν με χρήση της σχέσης:

$$\text{Resolution}\% = \frac{\text{FWHM}}{\text{PeakChannel}} \cdot 100\%$$

a/a	Ανιχνευτής (Maestro)	Peak Channel	FWHM #channel	ROI #channels	ROI counts*10 ⁵	Bg counts	Dead time%	Relative Resolution%
1	1	93	9,5	13	8,69	137	9	10,22
2	3	95	11,4	15	8,64	228	9	12,00
3	4	82	10,8	15	13,15	942	11	13,17
4	6	93	10,0	14	8,89	142	9	10,75
5	7	97	13,4	18	10,94	261	27	13,81
6	8	96	13,9	19	9,36	250	10	14,48
7	10	94	10,6	14	8,46	124	9	11,28
8	11	94	11,9	16	8,66	213	9	12,66
9	12	36	4,6	6	9,21	86	8	12,78
10	13	84	11,1	15	9,18	164	10	13,21
11	14	95	13,5	18	10,59	249	24	14,21
12	15	92	15,4	21	13,43	1613	11	16,74
13	16	96	9,4	13	8,75	180	9	9,79

Πίνακας 1: Δεδομένα πειράματος 21/11/2016

Βρέθηκε ότι η σχετική διακριτική ικανότητα στα 662 keV ήταν από 9.8% ως 14.2% στους ανιχνευτές τύπου A1 και 13.2% και 16.2% στους ανιχνευτές τύπου A2 και ότι η τιμή του νεκρού χρόνου ήταν από 8% έως 11%, με εξαίρεση τους ανιχνευτές 7 και 14 που είχαν νεκρό χρόνο 27% και 24%, αντίστοιχα που συνοδεύονταν με υποδεέστερη σχετική διακριτική ικανότητα, 13.2% και 14.2%.

Ο συνολικός αριθμός παλμών (counts) που μετρήθηκαν επί 300 s στην ROI των έντεκα ανιχνευτών τύπου A1 ήταν από $8.5 \cdot 10^5$ έως $10.9 \cdot 10^5$ με μέση τιμή $9.22 \cdot 10^5$ (ρυθμός 3.1 kcps). Η τυπική απόκλιση του αριθμού παλμών που υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$sd = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

ήταν $0.80 \cdot 10^5$, ο δε συντελεστής μεταβλητότητας, cv, 8.7%. Ο συνολικός αριθμός παλμών στους ανιχνευτές τύπου A2 με κωδικό αριθμό στο λογισμικό του MOA, 4 και 15, ήταν $13.15 \cdot 10^5$ και $13.43 \cdot 10^5$ για χρόνο καταγραφής 300 s, τιμές μεγαλύτερες κατά ~50% από αυτές στους μικρότερου ενεργού όγκου ανιχνευτές τύπου A1, π.χ. $8.69 \cdot 10^5$ στον ανιχνευτή 1, τύπου A1.

Το ηγλικό σήμα προς θόρυβο στους ανιχνευτές τύπου A1 δεν ξεπερνούσε το $2 \cdot 10^{-4}$, ενώ στους δυο ανιχνευτές τύπου A2 ήταν $7 \cdot 10^{-4}$ και $12 \cdot 10^{-4}$, αντίστοιχα. Επομένως το Background στις μετρήσεις ήταν ιδιαίτερα χαμηλό και δεν τις επηρέαζε.

Η πειραματική εσωτερική ανιχνευτική απόδοση των ανιχνευτών σε φωτόνια ενέργειας 661,7 keV στην περιοχή $1.35 \cdot \text{FWHM}$ της φωτοκορυφής, α, ορίσθηκε ως εξής:

$$a = \text{ρυθμός παλμών στην ROI} / \text{ρυθμός φωτονίων που προσπίπτουν}$$

Λόγω της ιστροπικής εκπομπής της πηγής, θεωρήθηκε γεωμετρία στερεάς γωνίας 2π και ότι τα μισά από τα εκπεμπόμενα φωτόνια θα εισέλθουν στον ενεργό όγκο του ανιχνευτή. Ως εκ τούτου, αγνοήθηκε η ύπαρξη περιβλήματος του κρυστάλλου. Επομένως, θεωρώντας ότι στο 85% των διασπάσεων του ^{137}Cs παράγεται ένα φωτόνιο ενέργειας 661.7 keV και ότι τα μισά από τα εκπεμπόμενα φωτόνια για χρόνο 300 s προσπίπτουν στον ανιχνευτή, ο αριθμός τους ήταν προσπίπτοντα φωτόνια $24.54 \cdot 10^5$ ($\frac{1}{2} \cdot 0.850 \cdot 300 \text{ s} \cdot 19246 \text{ Bq}$). Οι πειραματικές τιμές ανιχνευτικής απόδοσης στις ROI των 13 ανιχνευτών

παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 και κυμαίνονται από 0.34 ως 0.45 στους ανιχνευτές τύπου A1 και ~0.54 στους ανιχνευτές τύπου A2 (μεγάλου ενεργού όγκου).

Η θεωρητική τιμή της απόδοσης υπολογίστηκε με χρήση της σχέσης:

$$\alpha = I \cdot \frac{P}{T} \cdot G$$

όπου:

I: η πιθανότητα αλληλεπίδρασης ενός φωτονίου που προσπίπτει στον κρύσταλλο

P/T (Peak to Total): ο λόγος της κατανομής Gauss για τον παλμό προς το συνολικό φάσμα

G: το ποσοστό της κατανομής Gauss που περιέχει η περιοχή ενδιαφέροντος

a/a	Ανιχνευτής (Maestro)	Peak Channel	FWHM #channel	ROI #channels	ROI counts*10 ⁵	Απόδοση
1	1	93	9,5	13	8,69	0,3541
2	3	95	11,4	15	8,64	0,3521
3	4	82	10,8	15	13,15	0,5359
4	6	93	10,0	14	8,89	0,3623
5	7	97	13,4	18	10,94	0,4458
6	8	96	13,9	19	9,36	0,3814
7	10	94	10,6	14	8,46	0,3447
8	11	94	11,9	16	8,66	0,3529
9	12	36	4,6	6	9,21	0,3753
10	13	84	11,1	15	9,18	0,3741
11	14	95	13,5	18	10,59	0,4315
12	15	92	15,4	21	13,43	0,5473
13	16	96	9,4	13	8,75	0,3566

Πίνακας 2: Τιμές απόδοσης πείραμα 21/11/2016

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή των ανιχνευτών που είναι ηλικίας τουλάχιστον 35 ετών, όταν η πηγή είναι σε απόσταση 10cm από το κέντρο της κυλινδρικής επιφάνειας του κρυστάλλου, και όχι σε επαφή για τους ανιχνευτές τύπου A1, περίπου το 75% των προσπιπτόντων φωτονίων θα αλληλεπιδράσουν με τον κρύσταλλο και ο λόγος του σήματος στην φωτοκορυφή ως προς το σύνολο των παλμών είναι περίπου 65%, ενώ για τους ανιχνευτές τύπου A2 το ποσοστό των προσπιπτόντων φωτονίων που αλληλεπιδρούν είναι 80% και ο αντίστοιχος λόγος 75%. Αγνοώντας τη διαφορά γεωμετρίας και λαμβάνοντας υπόψη το ποσοστό των παλμών της φωτοκορυφής που θεωρήσαμε ως περιοχή ενδιαφέροντος (η τιμή της παραμέτρου G σε ROI πλάτους 1.35·FWHM είναι 88.8%) βρέθηκαν θεωρητικές τιμές ανιχνευτικής απόδοσης στην ROI ανά προσπίπτον φωτόνιο 43.3% (75% * 65% * 88.8%) και 53.3% (80% * 75% * 88.8%) για τους ανιχνευτές τύπου A1 και A2, αντίστοιχα.

α/α	Ανιχνευτής (Maestro)	Peak Channel	FWHM #channel	ROI #channels	ROI counts*10 ⁵	Bg counts	Dead time%	Relative Resolution%
1	1	92,5	9,5	13	8,6	113	9	10,3
2	3	94,5	11,4	15	8,6	198	9	12,1
3	4	96	12,9	17	12,4	1006	11	13,4
4	6	94	10,0	14	8,8	139	9	10,6
5	7	96	13,7	18	10,5	248	25	14,3
6	8	97	14,1	19	9,2	247	10	14,5
7	10	94	11,2	15	8,6	136	9	11,9
8	11	93,5	12,2	16	8,6	224	9	13,0
9	12	45	5,6	8	9,2	150	9	12,4
10	13	92	12,1	16	9,0	152	9	13,2
11	14	97,5	13,8	19	10,0	291	18	14,2
12	15	93	16,3	22	12,9	1584	11	17,5
13	16	96	9,5	13	8,8	181	9	9,9

Πίνακας 3: Δεδομένα πειράματος 6/2/2017

Στους πίνακες 3 και 4 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα δεδομένα της μελέτης που επαναλήφθηκε στις 6/2/2017. Στον πίνακα 3 αναγράφονται για κάθε ανιχνευτή ο αριθμός του καναλιού στο οποίο αντιστοιχεί ο μέγιστος αριθμός παλμών (Peak Channel, PC), ο αριθμός των καναλιών που αντιστοιχούν στο FWHM, ο αριθμός καναλιών της περιοχής ενδιαφέροντος (ROI) πλάτους $1.35 \cdot \text{FWHM}$ (88.8% του συνόλου θεωρώντας την κατανομή κανονική), ο αριθμός των παλμών στην περιοχή ενδιαφέροντος για την κύρια μέτρηση και την μέτρηση υποστρώματος και η τιμή του αναγραφόμενου νεκρού χρόνου (dead time). Στην τελευταία στήλη του Πίνακα 3 εμφανίζονται οι τιμές της σχετικής διακριτικής ικανότητας.

Βρέθηκε ότι ο συνολικός αριθμός παλμών (counts) που μετρήθηκαν στις 6/2/2017 επί 300 s στις ROI των έντεκα ανιχνευτών τύπου A1 ήταν από $8.6 \cdot 10^5$ έως $10.9 \cdot 10^5$ με μέση τιμή $9.08 \cdot 10^5$ (ρυθμός 3.0 kcps), έναντι $8.5 \cdot 10^5$ έως $10.9 \cdot 10^5$ και μέση τιμή $9.22 \cdot 10^5$ πριν από 75 ημέρες, όταν η τάση ήταν 950 V. Η τυπική απόκλιση του αριθμού παλμών ήταν $0.63 \cdot 10^5$ και ο συντελεστής μεταβλητότητας, cv, 7%. Ο συνολικός αριθμός παλμών στους ανιχνευτές τύπου A2 #4 και #15 ήταν $12.4 \cdot 10^5$ και $12.9 \cdot 10^5$, αντίστοιχα, έναντι $13.1 \cdot 10^5$ και $13.4 \cdot 10^5$ πριν από 75 ημέρες (ο αριθμός των καναλιών στα οποία έγινε η ολοκλήρωση του σήματος του ανιχνευτή 4 διέφερε στις δυο περιόδους, ήταν 15 και 17).

Στην περίπτωση των ανιχνευτών τύπου A2, ο συνολικός ρυθμός παλμών που αναλύθηκαν από το σύστημα στις 06/02/2017, ανεξαρτήτως του ύψους τους, ήταν περίπου 6.2 και 6.5 kcps ($12.4 \cdot 10^5 / (300 \cdot 0.75 \cdot 0.888)$) και ($12.9 \cdot 10^5 / (300 \cdot 0.75 \cdot 0.888)$), στους ανιχνευτές #7 και #14 τύπου A1 ~ 5.9 kcps ($10.45 \cdot 10^5 / (300 \cdot 0.65 \cdot 0.888)$) και ($10.04 \cdot 10^5 / (300 \cdot 0.65 \cdot 0.888)$), ενώ στους υπόλοιπους ανιχνευτές τύπου A1 ήταν ~ 5.1 kcps ($\sim 8.8 \cdot 10^5 / (300 \cdot 0.65 \cdot 0.888)$). Οι ρυθμοί αυτοί μπορούν να επηρεάσουν τις τιμές των νεκρών τους χρόνων (dead time), που στην περίπτωση και των δυο ανιχνευτών τύπου A2 ήταν $\sim 11\%$, τιμές ίδιες με αυτές πριν από 2.5 μήνες. Παρόμοια, οι νεκροί χρόνοι των ανιχνευτών τύπου A1 ήταν 9% έως 11% με εξαίρεση τους ανιχνευτές 7 και 14 που ήταν 25% και 18% αντίστοιχα, έναντι 27% και 24% πριν από 75 ημέρες όταν η τάση ήταν 950 V. Τα αίτια της συμπεριφοράς των δυο τελευταίων ανιχνευτών πρέπει να διερευνηθούν.

Η σχετική διακριτική ικανότητα σε φωτόνια ενέργειας 662 keV των ανιχνευτών τύπου A1 κυμαίνονταν από 9.9% ως 14.5% (μέση τιμή 12.4%) και από 13.4% και 17.5% στους ανιχνευτές τύπου A2, έναντι 12.3% και 15.0% κατά μέσο όρο πριν από 75 d, όταν η τάση ήταν 950 V. Ως εκ τούτου, η μεταβολή της τάσης δεν είχε πρακτικά επίπτωση στη σχετική διακριτική ικανότητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση των μετρήσεων που έγιναν στις 6/2/2017 η σχετική διακριτική ικανότητα των οκτώ ανιχνευτών με νεκρό χρόνο 9% ήταν κατά μέσο όρο 11.7% (εύρος 9.9% ως 13.2%), ενώ των υπόλοιπων πέντε που είχαν χειρότερη διακριτική ικανότητα ήταν κατά μέσο όρο 14.8% (εύρος 13.4% ως 17.5%). Παρόμοια διαφοροποίηση βρέθηκε και στις μετρήσεις που έγιναν 75 d νωρίτερα, 11.4% και 14.3% κατά μέσο όρο.

α/α	Ανιχνευτής (Maestro)	Peak Channel	FWHM #channel	ROI #channels	ROI counts*10 ⁵	Απόδοση
1	1	92,5	9,5	13	8,6	0,3528
2	3	94,5	11,4	15	8,6	0,3520
3	4	96	12,9	17	12,4	0,5099
4	6	94	10,0	14	8,8	0,3631
5	7	96	13,7	18	10,5	0,4297
6	8	97	14,1	19	9,2	0,3799
7	10	94	11,2	15	8,6	0,3536
8	11	93,5	12,2	16	8,6	0,3540
9	12	45	5,6	8	9,2	0,3795
10	13	92	12,1	16	9,0	0,3680
11	14	97,5	13,8	19	10,0	0,4128
12	15	93	16,3	22	12,9	0,5304
13	16	96	9,5	13	8,8	0,3610

Πίνακας 4: Τιμές απόδοσης πείραμα 6/2/2017

α/α	Ανιχνευτής (Maestro)	6/2/2017 ROI #channels	21/11/2016 ROI #channels	24/11/2015 ROI #channels	6/2/2017 ROI counts*10 ⁵	21/11/2016 ROI counts*10 ⁵	24/11/2015 ROI counts*10 ⁵
1	1	13	13	12	8,6	8,7	8,9
2	3	15	15	14	8,6	8,6	8,9
3	4	17	15	15	12,4	13,2	13,7
4	6	14	14	13	8,8	8,9	9,2
5	7	18	18	18	10,5	10,9	11,4
6	8	19	19	19	9,2	9,4	9,6
7	10	15	14	14	8,6	8,5	8,9
8	11	16	16	16	8,6	8,7	9,1
9	12	8	6	6	9,2	9,2	9,7
10	13	16	15	15	9,0	9,2	9,2
11	14	19	18	18	10,0	10,6	12,6
12	15	22	21	19	12,9	13,4	12,9
13	16	13	13	13	8,8	8,8	9,3
SUM					125,2	127,9	133,4

Πίνακας 5: ROI #channels και ROI counts των τριών μελετών

Σύγκριση ευρημάτων σε τέσσερις σειρές μετρήσεων: Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται ο αριθμός των καναλιών της περιοχής ενδιαφέροντος στις δυο μελέτες που έγιναν με τάση 950 V καθώς και στη μελέτη που έγινε με τάση 985 V χωρίς να έχει γίνει διόρθωση για την ραδιενεργή φθορά της πηγής στο διάστημα των 11.9 και 14.4 μηνών, στο συνολικό αριθμό των counts που καταγράφηκαν. Συγκεκριμένα, συγκρίνονται τα ευρήματα της μελέτης που έγιναν στις 21/11/2016 με αυτά που βρέθηκαν πριν από ένα χρόνο από την προπτυχιακή φοιτήτρια Ηλ. Κατραμάδα, επίσης με χρήση υψηλής τάσης 950 V. Λόγω ραδιενεργής απόσβεσης, αναμένονταν τον Νοέμβριο του 2016 αριθμός καταγεγραμμένων γεγονότων στην ROI σε live time 300 s μειωμένος κατά ~2.25% σε σχέση με αυτήν που έγινε με παρόμοιες συνθήκες στις 24/11/15, βρέθηκε όμως μεγαλύτερη μείωση του συνολικού σήματος, ~4.1% ($127.9 \cdot 10^5$ έναντι $133.4 \cdot 10^5$ το 2015). Άρα μετά από ~1 γ, το συνολικό σήμα ανά Bq ήταν μειωμένο περισσότερο από ότι ήταν αναμενόμενο κατά ~1.85%, και ως εκ τούτου επιχειρήθηκε ανάλυση της απόδοσης ανά ανιχνευτή.

Από τους ανιχνευτές τύπου A1, ο #14 εμφάνισε σε διάστημα ενός έτους μείωση κατά 16%. Σημειώνεται όμως ότι στη μελέτη του 2015 η απόδοσή του ήταν πολύ μεγαλύτερη από ότι στους υπόλοιπους ανιχνευτές τύπου A1. Παρόμοια βρέθηκε μειωμένη απόδοση στους ανιχνευτές # 12, και #16 κατά ~5% (η ενίσχυση στην περίπτωση του ανιχνευτή #12 ήταν και στις δύο περιπτώσεις χαμηλή, ως εκ τούτου το εύρος των ROI που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πολύ μικρά, μόλις έξι κανάλια) και στον #11 κατά 4.5%.

Αντίθετα, με τους υπόλοιπους ανιχνευτές, ο ανιχνευτής #15 τύπου A2 εμφάνισε αύξηση κατά ~3.9% αντί για μείωση κατά 4.1%, αλλά σε αυτήν την περίπτωση η περιοχή ενδιαφέροντος στην μελέτη του 2016 ήταν μεγαλύτερη κατά δύο κανάλια, (η απόδοσή του το 2015 βρέθηκε ~8% μικρότερη από τον άλλον ανιχνευτή ίδιου τύπου, τον #4).

Από τους ανιχνευτές τύπου A1 στους οποίους παρατηρήθηκε μείωση στο συνολικό άθροισμα των καταγεγραμμένων counts οι τρεις, οι # 11, 14 και 16, ανήκουν στην επάνω συστοιχία ανιχνευτών μέσα στο τούνελ του MOA, ενώ ο #12, ο ανιχνευτής με την υποδεέστερη ενίσχυση, στην κάτω συστοιχία. Σημειώνεται επίσης ότι λόγω αύξησης της μέσης τιμής της FWHM στη διάρκεια του ενός έτους που παρατηρήθηκε, αυξήθηκε το μέσο πλάτος των ROI κατά 0.25 κανάλια (μεταβολή από - 0.4 ως + 2.4 κανάλια). Συμπερασματικά, βρέθηκε μια τάση μείωσης της ανιχνευτικής απόδοσης των ανιχνευτών του MOA σε διάστημα ενός έτους, που θα μπορούσε να αποδοθεί σε μείωση του ενεργού όγκου ορισμένων σπινθηριστών NaI(Tl), φαινόμενο που έχει αναφερθεί και από άλλους ερευνητές που χρησιμοποίησαν «γερασμένους» ανιχνευτές.

Συγκρίθηκαν επίσης τα ευρήματα των μελετών που έγιναν στις 21/11/2016 με υψηλή τάση 950 V και στις 6/2/2017, με τάση 980 V με αναμενόμενη μεταβολή στον αριθμό των καταμετρούμενων παλμών στην ROI λόγω ραδιενεργής φθοράς μόνο κατά ~0.53%, έναντι 2.1% που βρέθηκε πειραματικά συνολικά ($12.52 \cdot 10^6$, έναντι $12.80 \cdot 10^6$). Οι πιο μεγάλες ποσοστιαίες μειώσεις, ~6%, εμφανίσθηκαν στους ανιχνευτές #4 και #14 (και στους δυο χρησιμοποιήθηκε ευρύτερη ROI, λόγω αύξησης του FWHM με την αύξηση της τάσης), ενώ στους ανιχνευτές 7 και 15 η μείωση ήταν σχεδόν 4%. Σημειώνεται ότι η κατά 4% αύξηση της ένδειξης του ανιχνευτή #15 τύπου A2 σε διάστημα ενός έτους, μερικώς ισοσκελίσθηκε με την μείωση της τάσης που έγινε μετά από 2.5 μήνες.

Ένας εναλλακτικός τρόπος ανάλυσης είναι συγκρίνοντας μεταξύ τους τις ανιχνευτικές αποδόσεις σε φωτόνια ενέργειας 662 keV των ανιχνευτών στα τρία πειράματα (Πίνακας 6) και με αυτές που βρέθηκαν από το απλοποιημένο θεωρητικό μοντέλο αγνοώντας την ύπαρξη του μεταλλικού τους περιβλήματος και το σφάλμα βαθμονόμησης της πηγής.

6/2/2017 Απόδοση	21/11/2016 Απόδοση	24/11/2015 Απόδοση
0,3528	0,3541	0,355
0,3520	0,3521	0,355
0,5099	0,5359	0,546
0,3631	0,3623	0,367
0,4297	0,4458	0,454
0,3799	0,3814	0,383
0,3536	0,3447	0,354
0,3540	0,3529	0,363
0,3795	0,3753	0,387
0,3680	0,3741	0,367
0,4128	0,4315	0,501
0,5304	0,5473	0,514
0,3610	0,3566	0,371

Πίνακας 6: Τιμές απόδοσης των τριών μελετών

Η μέση τιμή και το εύρος της ενδογενούς ανιχνευτικής απόδοσης των έντεκα ανιχνευτών τύπου A1 για φωτόνια ενέργειας 662 keV ήταν στις 24/11/2015, 21/11/2016 και 06/2/2017, 0.387 (εύρος 0.354 ως 0.501), 0.375 (εύρος 0.353 ως 0.431) και 0.373 (εύρος 0.352 ως 0.430), έναντι 0.433 που προέβλεπε το απλοποιημένο θεωρητικό μοντέλο. Στην περίπτωση των δυο ανιχνευτών τύπου A2, που στην περίπτωση των μετρήσεων ^{40}K συμβάλλουν σχεδόν το μισό του συνολικού σήματος και στους οποίους αντιστοιχεί θεωρητικά προβλεπόμενη ενδογενής ανιχνευτική απόδοση 0.533, βρέθηκαν για τον ανιχνευτή #4 αποδόσεις 0.546, 0.536 και 0.510, ενώ για τον ανιχνευτή #15, 0.514, 0.547 και 0.530 στις τρεις περιόδους.

Στις 7/11/2016 έγινε και μια δεύτερη επιβεβαιωτική σειρά μετρήσεων με μέσο χρόνο Live time 264 s, έναντι των 300 s στις υπόλοιπες τρεις σειρές μετρήσεων. Λόγω αυτής της διαφοράς στη μεθοδολογία, στον πίνακα 7 συγκρίνονται οι τιμές των counts per second (cps) στην περιοχή ενδιαφέροντος. Ειδικά για τις τιμές των ROI counts/Live time των μετρήσεων που έγιναν στις 7/11/2016 και στις 21/11/2016 διενεργήθηκε t-test ανά ζεύγη. Η τιμή του p-value ισούται με 0.435 επομένως δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στα δεδομένα των δύο μετρήσεων. Αντίθετα η τιμή p-value ήταν μικρότερη από 0.05 (0.013 και 0.019 αντίστοιχα) όταν συγκρίνονται οι μετρήσεις στις 6/2/2017 με αυτές στις 7/11/2016 και στις 21/11/2016, όπως και ήταν αναμενόμενο λόγω της ραδιενεργής φθοράς.

7/11/2016			21/11/2016		6/2/2017		24/11/2015	
Ανιχνευτής (Maestro)	ROI #channels	ROI counts*10 ³ / Live time	ROI #channels	ROI counts*10 ³ / Live time	ROI #channels	ROI counts*10 ³ / Live time	ROI #channels	ROI counts*10 ³ / Live time
1	12	2,784	13	2,900	13	2,860	12	2,967
3	15	2,868	15	2,867	15	2,853	14	2,967
4	14	4,307	15	4,367	17	4,133	15	4,567
6	14	2,967	14	2,967	14	2,943	13	3,067
7	18	3,733	18	3,633	18	3,483	18	3,800
8	19	3,088	19	3,133	19	3,080	19	3,200
10	15	2,930	14	2,833	15	2,867	14	2,967
11	16	2,894	16	2,900	16	2,870	16	3,033
12	6	3,055	6	3,067	8	3,077	6	3,233
13	16	3,162	15	3,067	16	2,983	15	3,067
14	18	3,616	18	3,533	19	3,347	18	4,200
15	21	4,494	21	4,467	22	4,300	19	4,300
16	13	2,930	13	2,900	13	2,927	13	3,100

Πίνακας 7: Ρυθμός παλμών στις περιοχές ενδιαφέροντος, cps

Στην συνέχεια συγκρίνονται οι λόγοι της ενδογενούς ανιχνευτικής απόδοσης των δύο ομάδων ανιχνευτών της παρούσας μελέτης με αυτούς που βρέθηκαν το 2015 στα πλαίσια της προπτυχιακής εργασίας της Ηλ. Κατραμάδα και το 2010 όταν στα πλαίσια της διδακτορική διατριβής του Σ. Βαλάκη μετρήθηκε η απόδοση (όχι ενδογενής) με κεντρική τοποθέτηση της ίδιας πηγής ¹³⁷Cs σε απόσταση 12,1cm από το πρόσθιο παράθυρο του ανιχνευτή (οι μετρήσεις του Νοεμβρίου 2016 αντιστοιχούν στις τιμές των μετρήσεων με χρόνο live time=300s). Οι λόγοι των αποδόσεων των δυο ανιχνευτών τύπου A2 που δίνονται στον Πίνακα 8 είναι ενδεικτικοί της σημαντικής μείωσης της διαχρονικής απόδοσης του ανιχνευτή #4.

Εργασία	Απόδοση #15	Απόδοση #4	Λόγος 15/4
Μελέτη 2/2017	0,5304	0,5099	1,040
Μελέτη 11/2016	0,5460	0,5338	1,023
Κατραμάδα 11/2015	0,5140	0,5460	0,941
Βαλάκης 5/2010	0,0810	0,0842	0,962

Πίνακας 8: Απόδοση ανιχνευτών τύπου A2

Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται οι τιμές των αποδόσεων των ανιχνευτών τύπου A1 διαιρεμένες με την μέση τιμή της απόδοσης κατά την ίδια χρονική περίοδο. Σε σύγκριση με την διδακτορική διατριβή του Σ.Βαλάκη,2010 εμφανίζονται αυξομειώσεις στα κλάσματα της απόδοσης προς την μέση τιμή της τάξεως του 1%-8% με εξαίρεση τους ανιχνευτές 7 και 14 όπου παρατηρείται αύξηση περίπου 20% και 16% στην μελέτη 2016 και 16% και 12% στην μελέτη του 2017 αντίστοιχα. Σε σύγκριση με την μελέτη του 2015 οι αυξομειώσεις που παρατηρούνται με τις μελέτες του 2016 και 2017 είναι της τάξεως του 1%-5% με εξαίρεση τον ανιχνευτή #15 που εμφανίζει μείωση 15% και 11% αντίστοιχα.

Η μεταβολή της τάσης από 950 σε 985 V είχε μεταβολή μεγαλύτερη του 2.0% στον ανιχνευτή #10 και μείωση, -3% και -4% στους ανιχνευτές #7 και 14.

	Μελέτη 2017		Μελέτη 2016		Μελέτη 2015		Μελέτη 2010	
Ανιχνευτής (Maestro)	Απόδοση	Απόδοση/ Μέση τιμή	Απόδοση	Απόδοση/ Μέση τιμή	Απόδοση	Απόδοση/ Μέση τιμή	Απόδοση	Απόδοση/ Μέση τιμή
1	0,3528	0,945	0,3541	0,943	0,355	0,917	0,0265	0,997
3	0,3520	0,943	0,3521	0,938	0,355	0,917	0,0263	0,989
6	0,3631	0,973	0,3623	0,965	0,367	0,948	0,0269	1,012
7	0,4297	1,151	0,4458	1,187	0,454	1,173	0,0263	0,989
8	0,3799	1,018	0,3814	1,016	0,383	0,990	0,0266	1,001
10	0,3536	0,947	0,3447	0,918	0,354	0,915	0,0264	0,993
11	0,3540	0,948	0,3529	0,940	0,363	0,938	0,0264	0,993
12	0,3795	1,017	0,3753	0,999	0,387	1,000	0,0269	1,012
13	0,3680	0,986	0,3741	0,996	0,367	0,948	0,0263	0,989
14	0,4128	1,106	0,4315	1,149	0,501	1,295	0,0263	0,989
16	0,3610	0,967	0,3566	0,949	0,371	0,959	0,0275	1,035
Μέση τιμή	0,3733		0,3755		0,387		0,0266	

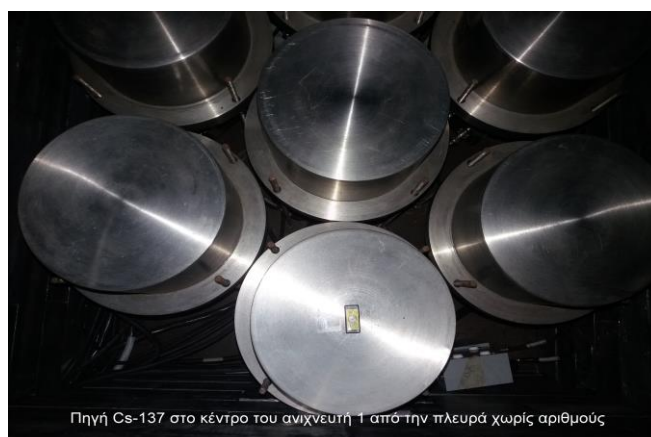
Πίνακας 9: Απόδοση ανιχνευτών τύπου A1

Σε μια προσπάθεια να διερευνηθεί κατά πόσο μικρομεταβολές στη θέση της σημειακής πηγής ^{137}Cs που ήταν σε επαφή με την κυκλική επιφάνεια των ανιχνευτών επηρέαζαν σημαντικά τις τιμές ανιχνευτικής απόδοσης που μετρήθηκε σε διαφορετικές χρονικές περιόδους έγιναν συμπληρωματικές μετρήσεις με real time 300 s σε τρεις ανιχνευτές, εκ των οποίων ο ένας ήταν τύπου A2 (4) και οι άλλοι δύο τύπου A1 (1 και 6) με επανατοποθέτηση της πηγής.

Στην πρώτη μέτρηση (Α) η πηγή τοποθετήθηκε στο κέντρο της επιφάνειας με την πλευρά που φαινόταν ο κωδικός αριθμός της, ενώ στην δεύτερη (Β) από την πλευρά που δεν φαινόταν ο αριθμός της, στην τρίτη μέτρηση (Γ) η πηγή μετακινήθηκε προς τα αριστερά σε σχέση με την κεντρική θέση κατά $10 \pm 1 \text{ mm}$. Οι θέσεις αποτυπώνονται στις εικόνες που ακολουθούν, τα δε ευρήματα μετρήσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 10 μαζί με τις τιμές της αρχικής μέτρησης, ώστε να είναι ευκολότερη η σύγκριση τους. Λόγω μάλιστα των διαφορών στο νεκρό χρόνο, έγινε αναγωγή ανά μονάδα live time στη στήλη 8.



Εικόνα 1: Τοποθέτηση από την πλευρά του κωδικού (Α)



Εικόνα 2: Τοποθέτηση από την πλευρά χωρίς τον κωδικό (Β)



Εικόνα 3: Τοποθέτηση με μετακίνηση προς τα αριστερά (Γ)

Ανιχνευτής (Maestro)	α/α	Peak Channel	FWHM #channels	ROI #channels	ROI counts*10 ⁵	Live time(s)	ROI counts*10 ³ /Live time	Dead time%
4	Αρχική	82	11	15	11,84	267	4,434	11,26
	A	83	11	15	11,69	267	4,386	11,30
	B	83	10,9	15	11,70	266	4,391	11,27
	Γ	83	10,7	14	11,44	266	4,296	11,30
1	Αρχική	92	9	13	7,87	273	2,883	8,97
	A	94	9,4	13	7,84	274	2,865	8,99
	B	94	9,5	13	7,82	274	2,859	8,95
	Γ	94	9,5	13	7,79	274	2,848	8,95
6	Αρχική	93,5	10	14	8,07	273	2,956	9,10
	A	94	10,1	14	8,03	273	2,943	9,10
	B	94	10,1	14	8,05	273	2,945	9,11
	Γ	94	10,2	14	7,94	273	2,904	9,03

Πίνακας 10: Δεδομένα αλλαγής πλευράς και θέσης πηγής

Όσον αφορά τις μετρήσεις A και B που διαφέρουν ως προς την πλευρά της πηγής που είναι σε επαφή με την εξωτερική επιφάνεια του ανιχνευτή, οι τιμές διαφέρουν κατά 0.09-0.25%, τιμές συμβατές με τα αναμενόμενα για μετρήσεις που ακολουθούν κατανομή Poisson (σχετικό σφάλμα κάθε τιμής 0.09% ως 0.11), επομένως μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η πλευρά τοποθέτησης της πηγής στο κέντρο του ανιχνευτή δεν επηρεάζει την μέτρηση. Συγκρίνοντας τις τιμές όταν η πηγή είναι το κέντρο των ανιχνευτών (A) με αυτές όταν η πηγή είναι έκκεντρα κατά ~1.0 cm (Γ) βρέθηκε στη δεύτερη περίπτωση μείωση κατά 1 ως 2%. Επιπλέον διενεργήθηκε t-test ανά ζεύγη στις τιμές ROI counts/Live time χωρίς να βρεθεί στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των αρχικών μετρήσεων και των A και B αλλά ούτε και μεταξύ των B-Γ σε όλες τις περιπτώσεις η τιμή p-value βρέθηκε μεγαλύτερη από 0.05.

Αφού αποκλείστηκαν οι πιθανές μικρομεταβολές στη θέση της πηγής σε επαφή με τους ανιχνευτές ως πιθανή αιτία μείωσης της ανιχνευτικής απόδοσης των ανιχνευτών με το χρόνο, θεωρείται εξ αποκλεισμού πιθανό αίτιο η είσοδος υγρασίας στον κρύσταλλο από το περιβάλλον σε ορισμένους από τους ανιχνευτές ηλικίας τουλάχιστον 35 ετών, όπως στους ανιχνευτές #4 και #14. Σημειώνεται ότι λόγω οικονομικών περιορισμών, η αίθουσα θερμαίνεται το χειμώνα μόνο μερικές ώρες ημερησίως με συνέπεια τα επίπεδα υγρασίας να είναι συχνά υψηλά, (κατά την περίοδο από 20 Δεκεμβρίου ως περίπου 10 Ιανουαρίου του επόμενου χρόνου δεν θερμαίνεται καθ' όλο το 24ωρο). Καθώς η υγρασία εισέρχεται

από το προστατευτικό τοίχωμα στο εσωτερικό των σπινθηριστών που είναι υγροσκοπικοί, προκαλείται οξείδωση των κρυστάλλων NaI(Tl) . Η περιοχή που υφίσταται οξείδωση γίνεται κίτρινη και απορροφά ένα ποσοστό από το φως που παράγεται με αποτέλεσμα ο κρύσταλλος να συμπεριφέρεται ως κρύσταλλος NaI(Tl) μειωμένου ενεργού όγκου χειροτερεύοντας την ενεργειακή διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή. Η υπόθεση αυτή είναι συμβατή με τα ευρήματα της σταδιακής υποβάθμισης της σχετικής διακριτικής ικανότητας των ανιχνευτών και του μειωμένου ύψους των παραγόμενων παλμών με το χρόνο, που απαιτούσε την κατά διαστήματα αύξηση της ενίσχυσης του σήματος είτε με μεταβολές στη μικρομετρική ενίσχυση των ενισχυτών είτε με αύξηση της τάσης τροφοδοσίας των φωτοπολλαπλασιαστών.

Β. Επαναληπτικότητα Μετρήσεων Ομοιώματος Ενήλικα Άντρα

Μελετήθηκε η επαναληπτικότητα μετρήσεων καλίου σε ομοίωμα ενήλικα που προσομοιώνει το σωματότυπο του μέσου ενήλικα άνδρα (μάζα:~73 και ύψος:177cm). Χρησιμοποιήθηκαν 21 μεγάλα δοχεία των 2000 ± 18 ml (M) και 21 μικρά δοχεία των 1000 ± 9 ml (μ), που περιέχουν απιονισμένο νερό, απιονισμένο νερό και KCl επομένως ο συνολικός όγκος διαλύματος του ομοιώματος ήταν 64 l (Valakis,2012) και η ειδική ραδιενέργεια ^{40}K του ομοιώματος ήταν ~60 Bq/kg. Η διάταξη των δοχείων παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.

									μ	μ	μ	μ		
	μ	μ	μ	μ	μ	μ	μ	M	M	M	M	M		
								M	M	M	M	M	M	
								M	M	M	M	M	M	M
	μ	μ	μ	μ	μ	μ	μ	M	M	M	M	M		
									μ	μ	μ	μ		

Σχήμα 1

Πραγματοποιήθηκαν δεκαέξι μετρήσεις στο διάστημα 3/10/2016-7/10/2016, κατά το οποίο λειτουργούσαν οι δεκατρείς από τους δεκαέξι ανιχνευτές NaI(Tl) του συστήματος. Οι τρεις ανιχνευτές που βρίσκονταν εκτός λειτουργίας ήταν ανιχνευτές τύπου A1 δηλαδή ανιχνευτές μικρών διαστάσεων με ενεργό όγκο 15.7cm x 5.0cm. Οι θερμοκρασίες κατά την διάρκεια των μετρήσεων στο εξωτερικό περιβάλλον κυμαίνονταν από 20° έως 24° βαθμούς και επικρατούσε ηλιοφάνεια ή μερική συννεφιά εκτός από τις τελευταίες τρεις μετρήσεις κατά τις οποίες εκδηλώθηκε καταιγίδα. Όλες οι μετρήσεις έγιναν σε συνθήκες εξαναγκασμένης εισαγωγής αέρα από το περιβάλλον και ενώ βρισκόταν σε λειτουργία το ένα από τα δύο air-condition, που διαθέτει η αίθουσα που βρίσκεται ο μετρητής ολόσωμης ακτινοβολίας (MOA). Τα δεδομένα των μετρήσεων (δηλαδή ο συνολικός αριθμός παλμών στις αντίστοιχες ROI ανά s) παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

α/α	Gross Main ^{40}K / Live Time	Gross Main ^{214}Bi / Live Time	Gross Bg ^{40}K / Live Time	Gross Bg ^{214}Bi / Live Time	Καθαρός ρυθμός κρούσεων ^{40}K	Διορθωμένος καθαρός ρυθμός κρούσεων ^{40}K	<Live Time>
1	15,152	2,180	10,977	2,082	4,175	4,073	1719
2	15,511	2,305	11,197	2,142	4,314	4,144	1729
3	15,102	2,276	11,030	2,130	4,072	3,920	1751
4	15,253	2,219	11,144	2,103	4,108	3,987	1758
5	15,700	2,393	11,361	2,208	4,339	4,146	1719
6	15,612	2,342	11,369	2,197	4,243	4,090	1749
7	15,625	2,337	11,347	2,158	4,278	4,091	1758
8	15,485	2,257	11,396	2,113	4,090	3,939	1742
9	15,577	2,436	11,496	2,219	4,081	3,854	1731
10	15,620	2,342	11,423	2,167	4,197	4,013	1742
11	15,623	2,370	11,136	2,171	4,488	4,279	1722
12	15,454	2,351	11,330	2,182	4,124	3,948	1772
13	15,593	2,407	11,338	2,202	4,255	4,040	1727
14	15,495	2,424	11,414	2,209	4,080	3,855	1729
15	15,599	2,431	11,685	2,207	3,914	3,680	1761
16	15,679	2,405	11,384	2,144	4,295	4,023	1758
Mean value	15,505	2,342	11,314	2,165	4,191	4,005	1742
sd	0,182	0,077	0,179	0,042	0,138	0,142	
cv	0,012	0,033	0,016	0,020	0,0330	0,0354	
CVpoission	0,006	0,016	0,007	0,016	0,0296	0,0281	

Πίνακας 1

Στις πρώτες δύο στήλες του πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τιμές των συνολικών παλμών που καταγράφηκαν στις περιοχές ενδιαφέροντος (RoI) για το κάλιο και το βισμούθιο διαιρεμένες με τον μέσο χρόνο που διήρκησε η λήψη (<Live time>), ενώ στις δύο επόμενες εμφανίζονται οι αντίστοιχες τιμές για το υπόβαθρο. Οι τιμές του Live Time προέκυψαν από τον μέσο όρο των Live Time κάθε μέτρησης. Ο πραγματικός χρόνος (Real Time των μετρήσεων ήταν περίπου 34 λεπτά. Ο καθαρός ρυθμός παλμών ^{40}K προέκυψε από την αφαίρεση του ρυθμού κρούσεων υποστρώματος από τον κύριο ρυθμό κρούσεων (5^η στήλη). Κατόπιν, έγινε διόρθωση για το ^{214}Bi με εφαρμογή του τύπου:

$$N_{40\text{Ka}}(\text{cor}) = N_{40\text{Ka}} - 1,046 \times N_{214\text{Bi}}$$

Η διόρθωση αφορά τόσο τον ρυθμό παλμών της κύριας μέτρησης όσο και τον ρυθμό παλμών του υποστρώματος. Η αφαίρεση των δύο τιμών δίνει τον διορθωμένο καθαρό ρυθμό παλμών (6^η στήλη). Βρέθηκε ότι κατά μέσο όρο η ύπαρξη ^{214}Bi αυξάνει το ρυθμό κρούσεων στην περιοχή του ^{40}K κατά ~4%. Υπολογίστηκαν οι συντελεστές μεταβλητότητας (cv) για τον καθαρό ρυθμό παλμών με και χωρίς διόρθωση για το ^{214}Bi και βρέθηκαν παρόμοιοι, 3,5% και 3,3% αντίστοιχα, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ύπαρξη του υποστρώματος ^{214}Bi δεν επηρέασε σημαντικά την επαναληπτικότητα των μετρήσεων. Από την άλλη πλευρά το paired samples t-test που διενεργήθηκε στα δεδομένα αυτά έδωσε τιμή p-value < 0.05 που σημαίνει ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των διορθωμένων και μη διορθωμένων τιμών. Ο συντελεστής μεταβλητότητας στην παρούσα εργασία υπολογίστηκε ίσος με 3.5% ενώ σε προηγούμενη εργασία ήταν 3.1% σε ομοίωμα εφήβου πριν από περίπου μισό χρόνο (Κατραμάδα, 2016). Οι δύο τιμές είναι παρόμοιες με μια μικρή διαφορά που ενδέχεται να οφείλεται στο γεγονός ότι στις μετρήσεις μας συμμετείχαν οι δεκατρείς από τους δεκαέξι ανιχνευτές ενώ στην προηγούμενη εργασία οι ενεργοί ανιχνευτές ήταν δεκαπέντε.

Οι τιμές του ^{214}Bi υποστρώματος της κύριας μέτρησης και οι αντίστοιχες τιμές από την μέτρηση του ομοιώματος νερού φάνηκε να παρουσιάζουν μικρές διαφορές για αυτό και διενεργήθηκε paired samples t-test από το οποίο προέκυψε τιμή p-value < 0.05. Συμπεραίνουμε ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά στις μετρήσεις του ^{214}Bi υποστρώματος, γεγονός που δεν συνάδει με τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Το ίδιο παρατηρείται και στις μετρήσεις της προηγούμενης εργασίας. Οι μέσες τιμές του ρυθμού παλμών του ^{214}Bi ήταν 2.47 και 2.33 για την κύρια μέτρηση και την μέτρηση υποστρώματος αντίστοιχα.

Στην συνέχεια συγκρίνονται οι ρυθμοί ^{214}Bi όπως μετρήθηκαν κατά την σάρωση ομοιώματος υποστρώματος στην παρούσα και σε δύο προηγούμενες εργασίες. Τα δεδομένα παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

εργασία	mean value cps ^{214}Bi	SEM	Ημερομηνία διεξαγωγής
Κατραμάδα Ηλέκτρα 2016	2,33	0,013	4-5/2016
Παρούσα εργασία	2,16	0,010	10/2016

Πίνακας 2

Τέλος υπολογίστηκε η ποσότητα του καλίου στο ομοίωμα από την σχέση

$$M_{\kappa} = \frac{\text{Rate}}{\alpha\pi\acute{o}\delta\omicron\sigma\eta \cdot 3,3077}$$

όπου Rate είναι ο μέσος διορθωμένος καθαρός ρυθμός παλμών ^{40}K και 3,3077 είναι ο ρυθμός εκπομπής φωτονίων 1,46MeV ανά g ^{40}K .
 Η απόδοση υπολογίζεται από τον τύπο

$$\text{Απόδοση} = z_o + a \cdot \text{μήκος} + b \cdot \text{μάζα} + c \cdot \text{μήκος}^2 + d \cdot \text{μάζα}^2 + f \cdot \text{μήκος} \cdot \text{μάζα}$$

παράμετρος	Τιμή	Σφάλμα
zo	-0,01117	0,00425
a	3,38849E-04	6,32652E-05
b	-1,937E-07	3,54616E-08
c	-1,21795E-06	2,27389E-07
d	-1,33407E-13	7,22788E-14
f	1,15081E-09	2,22705E-10

Η σχέση έχει ισχύ όταν είναι σε λειτουργία και οι δεκαέξι ανιχνευτές του συστήματος, για αυτό το λόγο από την συνολική απόδοση έγινε αφαίρεση των αποδόσεων των τριών ανιχνευτών που δεν συμμετείχαν στις μετρήσεις. Οι αποδόσεις του κάθε ανιχνευτή για κάθε ομοίωμα αναφέρονται στην διδακτορική διατριβή του Σ. Βαλάκη.

Τελικά η συνολική ποσότητα γραμμαρίων ^{40}K βρέθηκε ίση με 130.41+ 4.02g. Θεωρώντας ότι ο όγκος διαλύματος του ομοιώματος είναι 64 l και ότι η συγκέντρωση ^{40}K ανά λίτρο ομοιώματος είναι 2,20g/l υπολογίζεται θεωρητική τιμή 140,80 g. Οι δύο τιμές δεν έχουν μεγάλη διαφορά αν συνυπολογιστεί το σφάλμα στην συγκέντρωση που είναι 0,11g/l και τα σφάλματα στον υπολογισμό του διορθωμένου ρυθμού ^{40}K και της απόδοσης.