



**ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ
ΙΔΡΥΜΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΡΟΦΙΜΩΝ & ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΔΙΑΤΡΟΦΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΙΤΟΛΟΓΙΑΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΓΑΛΑΚΤΟΚΟΜΙΚΑ
ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΚΑΙ ΤΡΟΦΙΜΑ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ**

ΑΝΑΣΤΑΣΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Α.Μ. 3785

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΚΑΡΑΣΤΟΓΙΑΝΝΙΔΟΥ ΚΑΛΛΙΟΠΗ, ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2018

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Πρόεδρο του Τμήματος Μηχανικών Αυτοματισμού του ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης και Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ξανθό Στέλιο για την παραχώρηση του εργαστηρίου και του απαραίτητου για τις μετρήσεις εξοπλισμού, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων, την πολύτιμη καθοδήγησή του και την βοήθεια που μου παρείχε με προθυμία στις δυσκολίες που προέκυψαν.

Επίσης θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στην καθηγήτριά μου Επίκουρη Καθηγήτρια κα. Καραστογιαννίδου Καλλιόπη για την καθοδήγηση, το χρόνο και την ενέργεια που αφιέρωσε, την στήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές της.

Περίληψη

Η παρακολούθηση των επιπέδων ραδιενέργειας του περιβάλλοντος είναι απαραίτητη από πλευράς ακτινοπροστασίας λόγω των αρνητικών επιπτώσεων της ακτινοβολίας στον ανθρώπινο οργανισμό. Σημαντικότερες πηγές φυσικής ραδιενέργειας στο περιβάλλον είναι οι δύο ραδιενεργές σειρές ^{238}U και ^{232}Th με τα θυγατρικά τους στοιχεία καθώς και το ^{40}K , ενώ ένα από τα τεχνητά ραδιονουκλίδια που απαντάται στη φύση και έχει μεγάλο ενδιαφέρον λόγω του μεγάλου χρόνου ημιζωής του είναι το ^{137}Cs . Τα ραδιονουκλίδια αυτά καταφέρνουν και περνούν στο σώμα του ανθρώπου δια μέσου της διατροφής. Κατά την παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός της συγκέντρωσης των ραδιονουκλιδίων αυτών σε γαλακτοκομικά προϊόντα και τρόφιμα φυτικής προέλευσης που παράγονται στην Ελλάδα. Πραγματοποιήθηκε συλλογή δειγμάτων τροφίμων προερχόμενα από διάφορες περιοχές της χώρας τα οποία αναλύθηκαν με γ-φασματοσκοπία για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων των προαναφερθέντων ραδιονουκλιδίων εκτός του ^{235}U . Για τα ραδιονουκλίδια ^{238}U , ^{232}Th και ^{137}Cs στα περισσότερα τρόφιμα δεν υπήρξε ανιχνεύσιμη ενεργότητα ενώ όπου υπήρξε ανιχνεύτηκε σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις. Αντιθέτως για το ^{40}K υπήρξαν ανιχνεύσιμες συγκεντρώσεις ενεργότητας στα περισσότερα τρόφιμα με υψηλότερες στα φιστίκια Αιγίνης 257 Bq/Kg, στους ζοχούς 253 Bq/Kg και στα αμύγδαλα 198 Bq/Kg. Οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις ενεργότητας ^{40}K ανιχνεύτηκαν στα γαλακτοκομικά από 12-38 Bq/Kg και στο αλεύρι 23 Bq/Kg. Με βάση τις συγκεντρώσεις των τροφίμων που μετρήθηκαν και με βάση τις συστάσεις για τη Μεσογειακή Διατροφή υπολογίστηκαν οι ετήσιες κατά κεφαλήν ενεργότητες του ^{40}K . Κατόπιν υπολογίστηκε η ετήσια ισοδύναμη δόση του ^{40}K . Η συνολική ετήσια ισοδύναμη δόση για τον μέσο ενήλικα υπολογίστηκε σε 0,09 mSv/έτος με μεγαλύτερη συνεισφορά αυτή των γαλακτοκομικών 0,02 mSv/έτος και της μπανάνας με 0,03 mSv/έτος.

Λέξεις κλειδιά: ραδιενέργεια τροφίμων, ελληνικά προϊόντα, γ-φασματοσκοπία, ενεργότητα, ισοδύναμη δόση.

Abstract

From the point of view of radioprotection observation (follow-up) of the levels of radioactivity is necessary, because of the negative consequences of radiation on the human organism. The main sources of natural radioactivity in our environment are the series of ^{238}U , and ^{232}Th together with their daughter radionuclides, as well as ^{40}K , while ^{137}Cs is one of the artificial radionuclides found in nature, important due to its long half-life. These radionuclides manage to get in the human body through diet. In this Paper the concentration of these radionuclides has been estimated in dairy products and vegetables produced in Greece. Food samples from various districts of our country were collected and analyzed through gamma spectroscopy in order that concentrations of the prementioned radionuclides in them be calculated. Although in the majority of our samples radioactivity due to the ^{238}U , ^{232}Th and ^{137}Cs was not traced, in some cases it was found but in very low concentrations. On the contrary, detectable concentrations of radioactivity due to ^{40}K were found in most foods, with higher values in the peanuts of Aegina island (257 Bq/Kg), in sow thistles -*Sonchus oleraceus*- (253Bq/Kg) and in almonds (198 Bq/Kg). The lowest concentrations of activity due to ^{40}K were traced in diary products (12-38 Bq/Kg) and in flour (23 Bq/Kg). Based on these concentrations and on the Mediterranean Diet recommendations, the annual per capita radioactivity due to the reffered foods was calculated for ^{40}K . Next, the annual equivalent dose for ^{40}K was calculated. The overall annual equivalent dose taken by the average adult is estimated 0,09 mSv/year, the largest contribution coming from dairy and bananas (0,02 and 0,03 mSv/year respectively)

Keywords: radioactivity in foods, Greek products, gamma ray spectrometry, concentration of activity, equivalent dose.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	3
Περίληψη.....	4
Abstract	5
1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	7
1.1 Εισαγωγικά στοιχεία	7
1.1.1 Ραδιενεργός διάσπαση	7
1.1.2 Τρόποι διάσπασης.....	7
1.1.3 Μονάδες δοσιμετρίας.....	7
1.2 Ραδιενέργεια τροφίμων	9
1.3 Σειρές φυσικών ραδιονουκλιδίων	11
1.4 Συγκεντρώσεις ραδιονουκλιδίων στον άνθρωπο.....	13
1.5 Επιπτώσεις ιοντίζουσας ακτινοβολίας στον άνθρωπο	14
1.6 Επιπτώσεις από χαμηλές δόσεις ακτινοβολίας	17
1.7 Μεταβολές κατά την προετοιμασία των τροφίμων.....	19
2. ΣΚΟΠΟΣ	20
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	21
3.1 Περιγραφή ανιχνευτικής διάταξης.....	21
3.2 Βαθμονόμηση ανιχνευτή HPGe	24
3.2.1 Βαθμονόμηση ενέργειας.....	24
3.2.2 Βαθμονόμηση απόδοσης	26
3.3 Συλλογή και προετοιμασία δειγμάτων	27
3.4 Μετρήσεις ραδιενέργειας δειγμάτων.....	30
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	33
4.1 Αποτελέσματα ενεργότητας τροφίμων.....	33
4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία	39
4.3 Υπολογισμός ετήσιας ενεργότητας και ετήσιας ισοδύναμης δόσης.....	41
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	46
Βιβλιογραφία	48

1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.1 Εισαγωγικά στοιχεία

1.1.1 Ραδιενεργός διάσπαση

Πολλοί από τους φυσικούς πυρήνες είναι ασταθείς, παθαίνουν δηλαδή από μόνοι τους, χωρίς καμία εξωτερική διέγερση, μετατροπή σε κάποιον άλλο πυρήνα ή μεταβαίνουν από κάποια στάθμη διέγερσης σε κάποια άλλη χαμηλότερη, εκπέμποντας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Μιλάμε τότε για ραδιενεργό διάσπαση του ασταθούς πυρήνα. Ο διασπώμενος πυρήνας ονομάζεται μητρικός και ο πυρήνας που προκύπτει από τη διάσπαση ονομάζεται θυγατρικός. Τα ραδιενεργά νουκλίδια αναφέρονται και ως ραδιονουκλίδια.

1.1.2 Τρόποι διάσπασης

Οι πιο συνηθισμένες ακτινοβολίες κατά τη διάσπαση φυσικών ραδιενεργών πυρήνων, είναι:

-**εκπομπή σωματιδίων α**: το σωματίδιο α συγκροτείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια, είναι δηλαδή πυρήνας ηλίου (${}^4_2\text{He}$).

-**εκπομπή σωματιδίων β-**: πρόκειται για ηλεκτρόνιο που εκπέμπεται από τον πυρήνα, κατά την μετατροπή ενός νετρονίου του πυρήνα σε πρωτόνιο.

-**εκπομπή ποζιτρονίου β+**: Εκπέμπεται κατά την μετατροπή ενός πρωτονίου του πυρήνα σε νετρόνιο, με ταυτόχρονη εκπομπή ενός νετρίνου.

-**ακτινοβολία γ**: κατά τη μετάβαση ενός πυρήνα από κάποια ενεργειακή στάθμη διέγερσης σε κάποια άλλη χαμηλότερη, εκπέμπεται ένα φωτόνιο ενέργειας ίσης με τη διαφορά των δύο σταθμών (0,1 ως 10 MeV περίπου).

1.1.3 Μονάδες δοσιμετρίας

Η σύγχρονη μονάδα μέτρησης της **ενεργότητας** στο σύστημα SI είναι το Becquerel (Bq) που ορίζεται:

$$1\text{Bq} = 1 \text{ διάσπαση} / \text{s}.$$

Τα πολλαπλάσια του είναι το kBq = 10^3 Bq, το MBq = 10^6 Bq και το TBq = 10^{12} Bq.

Απορροφούμενη δόση είναι η ενέργεια που απορροφάται από το υλικό ανά μονάδα μάζας του. Η απορροφούμενη δόση σε βιολογικό ιστό είναι το βασικό μέγεθος για την εκτίμηση αφ' ενός μεν της διακινδύνευσης επαγωγής βιολογικών επιπτώσεων, αφ' ετέρου δε του μεγέθους των επιπτώσεων: μεγαλύτερη απορροφούμενη δόση συνεπάγεται μεγαλύτερη διακινδύνευση και ενδεχομένως μεγαλύτερο μέγεθος επίπτωσης. Η σύγχρονη μονάδα απορροφούμενης δόσης ονομάζεται Gray, συμβολίζεται με Gy και ορίζεται ως η απορροφούμενη δόση 1 Joule ανά Kg υλικού.

$$1\text{Gy} = 1 \text{ Joule/Kg}$$

Δεδομένου ότι η απορροφούμενη δόση ενός Gy είναι μεγάλη ως προς τις βιολογικές επιπτώσεις, χρησιμοποιούνται στην πράξη τα υποπολλαπλάσιά του.

$$1\text{mGy} = 10^{-3} \text{ Gy} \text{ και } 1\mu\text{Gy} = 10^{-6}\text{Gy}$$

Η βιολογική επίπτωση εξαρτάται όχι μόνο από την απορροφούμενη δόση αλλά και από τον ρυθμό της δόσης. Επίσης η βιολογική επίπτωση εξαρτάται όχι μόνο από την ενέργεια που εναποθέτει η ραδιενεργός ακτινοβολία, αλλά και από το είδος της ακτινοβολίας. Έτσι, η ίδια δόση σε Gy προκαλεί πολύ μεγαλύτερη βιολογική επίπτωση αν προέρχεται από σωματίδια α, απ' ότι αν προέρχεται από ακτινοβολία γ. Εισήχθη λοιπόν ο συντελεστής στάθμισης W_R της ακτινοβολίας. Ο καθαρός αριθμός W_R δίνει κατά προσέγγιση τη σχετική βιολογική αποτελεσματικότητα κάθε συγκεκριμένου είδους ακτινοβολίας, σε σχέση με την βιολογική αποτελεσματικότητα των ακτινών γ ή Χ.

Η **ισοδύναμη δόση** ορίζεται ως το γινόμενο της απορροφούμενης δόσης σε Gy επί τον συντελεστή στάθμισης W_R . Η ισοδύναμη δόση μετράται σε Sievert (Sv). Τα μεν Gy της απορροφούμενης δόσης δίνουν την ενέργεια που εναποθέτει η ακτινοβολία ανά χιλιόγραμμο ιστού. Τα δε Sv της ισοδύναμης δόσης είναι μέτρο της διακινδύνευσης από την εναπόθεση αυτής της ενέργειας, από συγκεκριμένη ακτινοβολία.

Δεδομένου ότι για τα φωτόνια γ $W_R = 1$, το μέγεθος της απορροφούμενης δόσης είναι ίσο με της ισοδύναμης δόσης. Επειδή η δόση του 1 Sv είναι μεγάλη, χρησιμοποιούνται στην πράξη τα εξής υποπολλαπλάσιά του:

$$1\text{mSv} = 10^{-3}\text{ Sv και } 1\mu\text{Sv} = 10^{-6}\text{ Sv}$$

Η διακινδύνευση αυξάνεται με την αύξηση της ισοδύναμης δόσης. Οι εκθέσεις σε ακτινοβολία και οι αντίστοιχες δόσεις διακρίνονται σε ολόσωμες και σε δόσεις μεμονωμένων ιστών ή οργάνων. Η ίδια ποσότητα ισοδύναμης δόσης δεν επιφέρει τις ίδιες βιολογικές συνέπειες και δεν συνεπάγεται την ίδια διακινδύνευση για τα διάφορα όργανα και τους ιστούς. Ως εκ τούτου ορίστηκε ως μέτρο της διακινδύνευσης για τα διάφορα όργανα και ιστούς η **ενεργός δόση**, μετρούμενη και αυτή σε Sievert, ως εξής:

$$\text{Ενεργός δόση} = (\text{ισοδύναμη δόση}) \cdot W_T$$

Όπου ο καθαρός αριθμός W_T είναι συντελεστής στάθμισης για κάθε ιστό, ή όργανο.

Για ολόσωμη δόση ο συντελεστής W_T είναι 1. Έτσι π.χ. αν οι γεννητικοί αδένες λάβουν ισοδύναμη δόση 100 mSv, η ενεργός δόση είναι $100\text{mSv} \times 0,2 = 20\text{ mSv}$, ενώ αν η ισοδύναμη δόση για όλο το σώμα είναι 100 mSv, τότε η αντίστοιχη ενεργός δόση είναι 100 mSv. (Αντωνόπουλος n.d.)

1.2 Ραδιενέργεια τροφίμων

Ο άνθρωπος εκτίθεται στην ραδιενεργό ακτινοβολία: (i) εξωτερικά και (ii) εσωτερικά δια μέσου της αναπνευστικής οδού (εισπνοή) και πεπτικής οδού (κατάποση). Τα ραδιονουκλίδια που εκπέμπουν αυτή την ακτινοβολία ενυπάρχουν στα τρόφιμα και περνούν στον άνθρωπο μέσω της απορρόφησης. Επομένως, η γνώση των συγκεντρώσεων τους στα τρόφιμα είναι σημαντική για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων της ακτινοβολίας των φυσικών όσο και των τεχνητών ραδιονουκλιδίων. Ακόμα είναι σημαντική για την εκτίμηση των δόσεων που λαμβάνει το κοινό, όπως και για την τήρηση αρχείων δεδομένων αναφοράς για την ραδιενέργεια περιβάλλοντος.

Τα κυριότερα ραδιονουκλίδια στα τρόφιμα είναι αυτά που απαντώνται στη φύση δηλαδή οι δύο φυσικές ραδιενεργές σειρές ^{238}U και ^{232}Th , το ραδιενεργό ισότοπο του καλίου ^{40}K καθώς και το τεχνητό ραδιονουκλίδιο ^{137}Cs . Εκτενέστερη αναφορά για τα συγκεκριμένα ραδιονουκλίδια γίνεται στα κεφάλαια που ακολουθούν.

Ανάλογα με τις διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές αλλά και ανάλογα τις γεωλογικές συνθήκες, η ραδιενέργεια του φυσικού περιβάλλοντος εμφανίζει διάφορα επίπεδα από περιοχή σε περιοχή. Αν και, σε γενικές γραμμές τα επίπεδα της ενεργότητας του εδάφους είναι σε χαμηλά επίπεδα, οι συγκεντρώσεις αυτές μπορεί να φτάσουν σε υψηλά επίπεδα με τις βιομηχανικές δραστηριότητες και με τη χρήση λιπασμάτων.

Τα φυσικά και τεχνητά ραδιονουκλίδια που υπάρχουν στο έδαφος περνούν στα φυτά. Είναι οι πρώτοι αποδέκτες και έχουν την τάση της συσσώρευσής τους σε διάφορα μέρη του φυτού. (Abojassim, Hady και Mohammed 2016) Το αρχικό και σημαντικότερο βήμα της μεταφοράς ραδιονουκλιδίων από το έδαφος στα φυτά της τροφικής αλυσίδας είναι η πρόσληψη δια μέσου των ριζών. Μέσω της κατανάλωσης των φυτών γίνεται η μεταφορά των ραδιονουκλιδίων στα ζώα. Από τα ζώα περνούν στο γάλα και τα γαλακτοκομικά προϊόντα. Συνεπώς, μέσω της κατανάλωσης γάλακτος και γαλακτοκομικών προϊόντων, κρέατος αλλά και τροφίμων φυτικής προέλευσης γίνεται η μεταφορά των διαφόρων ραδιονουκλιδίων στον άνθρωπο. Οι προσλαμβανόμενες ποσότητες ραδιονουκλιδίων εξαρτώνται από την κατανάλωση αλλά και από τις συγκεντρώσεις τους στα διάφορα τρόφιμα. (ΑΓΥΣ 2017) Γίνεται σαφές πως είναι αδύνατη η πλήρης αποφυγή της πρόσληψης δια μέσου της τροφής των ραδιονουκλιδίων που απαντώνται στο φυσικό περιβάλλον του ανθρώπου.

Η αξιολόγηση των συγκεντρώσεων των ραδιονουκλιδίων στη διατροφή αποτελεί έναν σημαντικό προβληματισμό στη σύγχρονη ασφάλεια των τροφίμων. Τα ραδιονουκλίδια μπορεί να προέρχονται από μια ποικιλία πηγών και διαδικασιών. Η κατανόηση του εύρους των ραδιονουκλιδίων στη διατροφή και των αντίστοιχων συγκεντρώσεων δραστηριότητάς τους είναι απαραίτητη για να είναι δυνατή η ποσοτικοποίηση του κινδύνου από την έκθεση. Υπολογίζοντας την ενεργότητα των ραδιονουκλιδίων στη διατροφή καθίσταται δυνατή η καλύτερη ταυτοποίηση μελλοντικών περιστατικών ρύπανσης και η πρόβλεψη των επιπτώσεων στην υγεία σε συνάρτηση με συγκεκριμένες συνθήκες. Έτσι, καθίσταται δυνατή η μείωση του αριθμού των περιστατικών πριν η αύξησή τους γίνει σημαντικός κίνδυνος για την υγεία του πληθυσμού.

1.3 Σειρές φυσικών ραδιονουκλιδίων

Ο άνθρωπος εκτίθεται σε ιοντίζουσα ακτινοβολία διαφόρων ενεργειών και ποικίλης προελεύσεως. Οι πηγές των ιοντίζουσών ακτινοβολιών διακρίνονται σε : α) αυτές που υπάρχουν ανεξάρτητα από την ανθρώπινη δραστηριότητα (φυσικές πηγές) και β) σε εκείνες που έχουν προκύψει ως αποτέλεσμα των τεχνολογικών δραστηριοτήτων του ανθρώπου (τεχνητές πηγές). Οι φυσικές πηγές ευρίσκονται στο κοσμικό διάστημα και στο γήινο περιβάλλον του ανθρώπου. Οι τεχνητές πηγές προκύπτουν από ιατρική χρήση ιοντίζουσών ακτινοβολιών, από λειτουργία πυρηνικών εργοστασίων, από πυρηνικές δοκιμές, από πυρηνικά ατυχήματα και από άλλες δραστηριότητες.

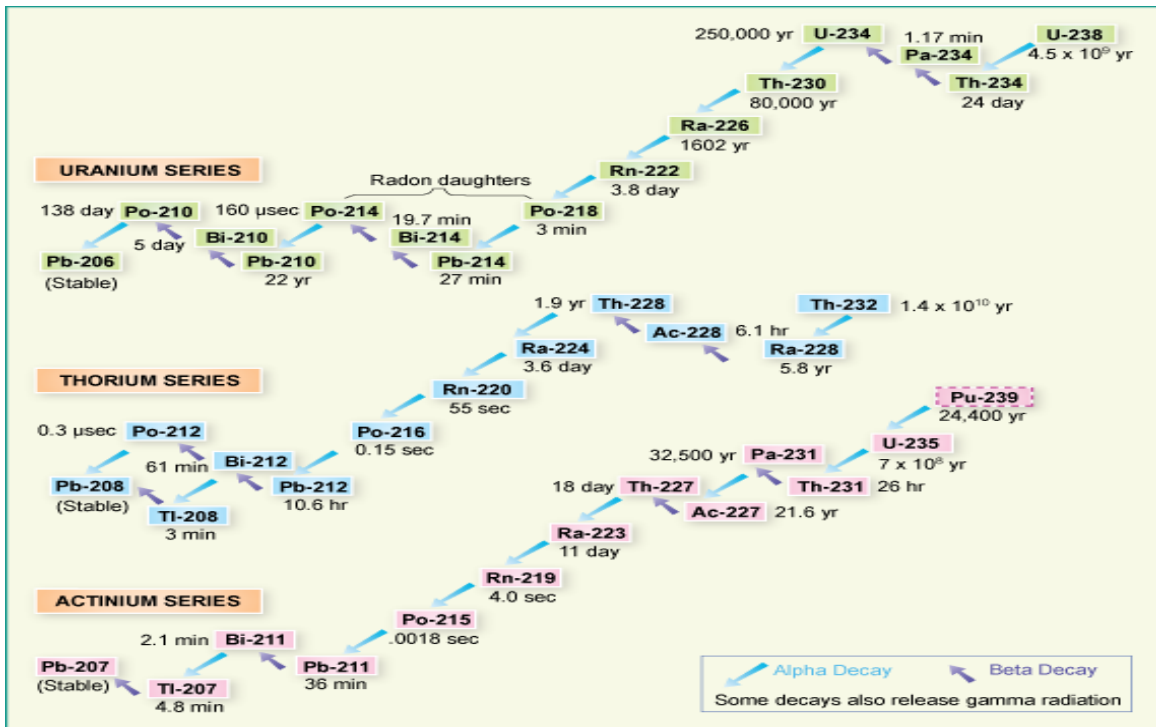
Η έκθεση του ανθρώπου στην ιονίζουσα ακτινοβολία μπορεί να είναι εσωτερική, εξωτερική και ολόσωμη εξαιτίας εγγύτητας. Η εσωτερική οφείλεται σε εισπνοή ραδιενεργών ισοτόπων, σε κατάποση ραδιονουκλιδίων και σε χορήγηση ραδιοφαρμάκων. Η εξωτερική οφείλεται σε ραδιοστοιχεία του εδάφους, σε αιωρούμενα ραδιενεργά σωματίδια ή συσσωματώματα, σε φωτόνια και σε σωματίδια κοσμικής προέλευσης.

Η φυσική γ-ακτινοβολία που προέρχεται από τον φλοιό της γης οφείλεται σε ραδιοϊσότοπα που υπάρχουν σε αυτόν. Τα ραδιοϊσότοπα αυτά διακρίνονται σε:

- α) Ραδιοϊσότοπα που παράγονται από διασπάσεις φυσικών ραδιενεργών σειρών και
- β) Μειμονωμένα ραδιοϊσότοπα που δεν ανήκουν σε ραδιενεργές σειρές

Οι φυσικές ραδιενεργές σειρές που υπάρχουν σήμερα στη φύση είναι τρεις.

- α) Η σειρά του ^{238}U (σειρά του ουρανίου) με μητρικό ισότοπο ^{238}U (χρόνος ημιζωής $4,468 \times 10^9$ έτη)
- β) Η σειρά του ^{232}Th (σειρά του θορίου) με μητρικό ισότοπο το ^{232}Th (χρόνος ημιζωής $1,41 \times 10^{10}$ έτη)
- γ) Η σειρά του ^{235}U (σειρά ακτινίου) με μητρικό ισότοπο το ^{235}U (χρόνος ημιζωής $7,038 \times 10^8$ έτη)



Εικόνα 1: Οι τρεις φυσικές σειρές ραδιονουκλιδίων με τα μητρικά και τα θυγατρικά τους στοιχεία.

Στην **Εικόνα 1** φαίνονται οι τρεις φυσικές ραδιενεργές σειρές με τα μητρικά και τα θυγατρικά τους στοιχεία, τους χρόνους ημιζωής καθώς και τον τρόπο διάσπασής τους.

Οι χρόνοι της ημίσειας ζωής των ισοτόπων των παραπάνω σειρών είναι συγκρίσιμοι με τη γεωλογική ηλικία της γης που θεωρείται περίπου 10⁹ έτη. Έτσι όλα αυτά τα μέλη των σειρών αυτών μπορούν να ανιχνευθούν στη φύση σήμερα.

Από τα ραδιοϊσότοπα που υπάρχουν στο φλοιό της γης και δεν είναι μέλη των φυσικών ραδιενεργών σειρών το σημαντικότερο σε ότι αφορά την εξωτερική έκθεση του ανθρώπου στη γ ακτινοβολία είναι το ^{40}K (χρόνος ημιζωής 1,28 x 10⁹ έτη). Το ραδιενεργό κάλιο (^{40}K) απαντάται στη φύση σε σταθερό ποσοστό 0.0118% του συνολικού καλίου.

1.4 Συγκεντρώσεις ραδιονουκλιδίων στον άνθρωπο.

Όπως προαναφέρθηκε, ο άνθρωπος εκτίθεται στις φυσικές πηγές ιοντιζουσών ακτινοβολιών αφ' ενός μεν εσωτερικά μέσω της εισπνοής και της κατάποσης ραδιονουκλιδίων, αφ' ετέρου δε μέσω της εξωτερικής έκθεσης σε αυτά. η έκθεση λόγω κατάποσης οφείλεται σε φυσικά ραδιονουκλίδια από το έδαφος, τα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα και το φαγητό.

Οι δόσεις λόγω κατάποσης οφείλονται κυρίως στα ραδιονουκλίδια ^{238}U , ^{232}Th και ^{40}K . Τα νουκλίδια αυτά υπάρχουν στις τροφές και στο νερό που καταναλώνει ο άνθρωπος. Η επιβάρυνση εξαρτάται από το ρυθμό κατανάλωσης και από την περιεκτικότητα τους στα εν λόγω ραδιονουκλίδια. Γενικά, οι δόσεις λόγω κατάποσης παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις σε παγκόσμιο επίπεδο, γεγονός που οφείλεται στις μεγάλες διαφοροποιήσεις που υπάρχουν ανάμεσα στους πληθυσμούς της γης, αναφορικά με τις διατροφικές τους συνήθειες. Ένας σημαντικός επίσης λόγος για τις σημειούμενες μεγάλες διακυμάνσεις των δόσεων λόγω κατάποσης και της μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων των ραδιονουκλιδίων στα τρόφιμα, είναι κυρίως λόγω της διαφορετικής περιεκτικότητας των τοπικών εδαφών, του διαφορετικού κλίματος και των διαφορετικών αγροτικών προσεγγίσεων. Η διαφοροποίηση ανιχνεύεται σε όλα τα είδη τροφής ακόμα και στο νερό.

Όσον αφορά τα ανιχνευόμενα ποσά φυσικώς εμφανιζόμενων ραδιοϊσοτόπων αναφέρονται τα παρακάτω:

Το ^{238}U ανιχνεύεται στον ανθρώπινο σκελετό. Έχουν αναφερθεί διαφοροποιήσεις των συγκεντρώσεων που ανιχνεύονται σε ανθρώπινα οστά μεταξύ διαφορετικών ηλικιών και τόπων. Σύμφωνα με την UNSCEAR 2008 η μέση συγκέντρωση ενεργότητας ^{238}U στα ανθρώπινα οστά είναι 100 mBq/Kg. Η ίδια επιτροπή αναφέρει ότι η παραπάνω τιμή αντιστοιχεί ολικά σε περίπου 500 mBq/Kg στα οστά και 700 mBq/Kg για όλο το σώμα.

Το ^{232}Th εντοπίζεται κι αυτό, ως επί το πλείστον στα ανθρώπινα οστά όπου και παραμένει για μεγάλες περιόδους. Σύμφωνα με μεταβολικά μοντέλα το 70% του ^{232}Th παραμένει στον ανθρώπινο σκελετό. Η ολική συγκέντρωσή ενεργότητας του είναι 70 mBq/Kg. Η συνολική ενεργός δόση λόγω της εσωτερικής έκθεσης στα ισότοπα των φυσικών σειρών του ουρανίου και του θορίου ανέρχεται σε 0,12 mSv/έτος.

Η συγκέντρωση ενεργότητα του ^{40}K στο ανθρώπινο σώμα είναι κατά μέσο όρο $2,6 \times 10^8$ Bq/Kg. Η τιμή αυτή αλλάζει σε αθλητές και σε ανθρώπους με αυξημένη μυϊκή μάζα. Η μέση τιμή της ενεργού δόσης σε παιδιά είναι 0,165 mSv/έτος και σε ενήλικες 0,180 mSv/έτος. (Νικολόπουλος, Κόττου, & Γιαννακόπουλος, 2015)

Το ^{137}Cs είναι τεχνητό ραδιονουκλίδιο που απορροφάται και κατανέμεται σε βιολογικά συστήματα με παρόμοιο τρόπο με το κάλιο. Επειδή είναι διαθέσιμο σε ίχνη σε σύγκριση με το κάλιο η απορρόφηση του καλίου δεν επηρεάζεται σημαντικά από αυτό. Σε ανθρώπους και ζώα το κάλιο βρίσκεται σε υψηλότερες συγκεντρώσεις σε φυσιολογικούς μαλακούς ιστούς. Όπως το κάλιο, έτσι και το κάισιο μεταφέρεται στο γάλα.

Τέλος, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ^{137}Cs ανιχνεύονται σε προϊόντα από μη καλλιεργούμενες εκτάσεις, όπως άγρια μανιτάρια, θηράματα και αιγοπρόβατα. (VKM, 2017)

1.5 Επιπτώσεις ιοντίζουσας ακτινοβολίας στον άνθρωπο

Ο καθένας μας εκτίθεται σε φυσική ακτινοβολία. Οι φυσικές πηγές είναι η κοσμική ακτινοβολία και τα φυσικά ραδιενεργά στοιχεία που υπάρχουν στη γη και στο ανθρώπινο σώμα. Τα επίπεδα της φυσικής έκθεσης ποικίλλουν σε ολόκληρο τον κόσμο. Σε κάποιες περιοχές η διαφορά από τα μέσα επίπεδα παγκοσμίως είναι 10 φορές μεγαλύτερη και μερικές φορές μπορεί να φτάσει και τις 100 φορές. Η ανθρώπινη δραστηριότητα στο περιβάλλον προκαλεί επιπλέον έκθεση στη φυσική ακτινοβολία όπως για παράδειγμα η εξόρυξη και χρήση μεταλλευμάτων που περιέχουν φυσικά ραδιενεργά στοιχεία καθώς και η καύση του άνθρακα για παραγωγή ενέργειας. Τέτοιες ανθρώπινες δραστηριότητες γενικά προκαλούν μικρή αύξηση του παγκόσμιου μέσου όρου, ωστόσο άτομα που κατοικούν κοντά σε τέτοιες εγκαταστάσεις ενδέχεται να υπόκεινται σε υψηλότερη έκθεση.

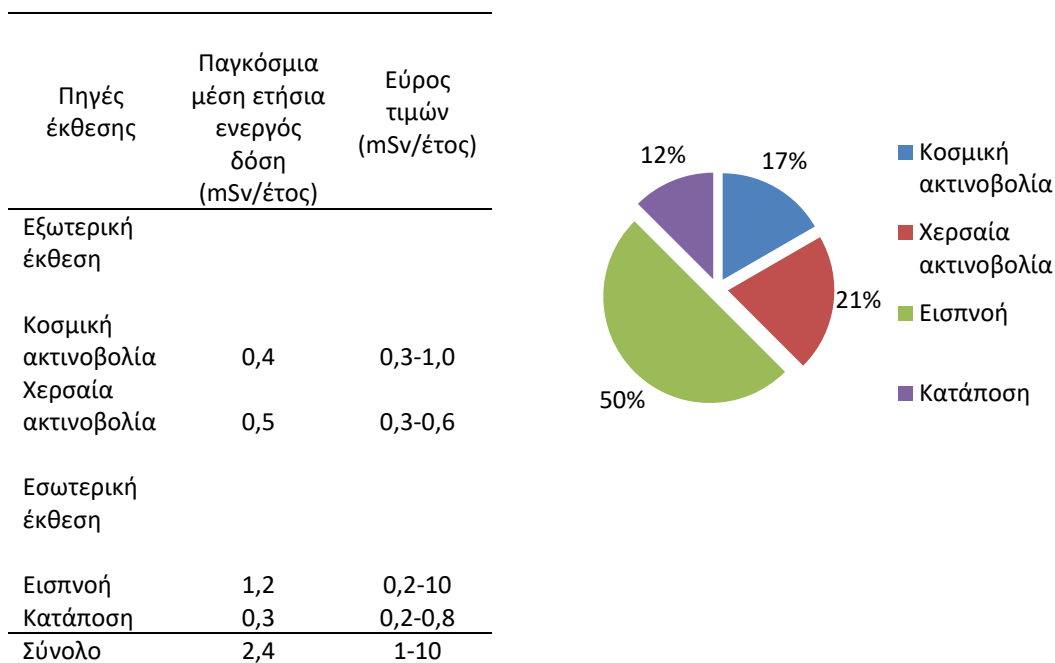
Η έκθεση στην ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει βλάβες στα κύτταρα, προκαλώντας θάνατο σε κάποια από αυτά και τροποποίηση σε άλλα. Τα περισσότερα όργανα και ιστοί του σώματος δεν επηρεάζονται από την απώλεια ακόμα και αξιοσημείωτου αριθμού κυττάρων. Ωστόσο, αν οι απώλειες είναι αρκετά μεγάλες, θα υπάρξει εμφανής βλάβη στα όργανα που ίσως οδηγήσει και στην νέκρωσή τους. Τέτοιες βλάβες συμβαίνουν σε άτομα που εκτίθενται σε ακτινοβολία που υπερβαίνει μια οριακή τιμή. Τα κύτταρα μπορεί να εκτεθούν στην ακτινοβολία χωρίς όμως

να επέλθει απαραίτητα νέκρωση αλλά να προκύψουν τροποποιήσεις. Τέτοιες βλάβες συνήθως επιδιορθώνονται. Αν η επιδιόρθωση δεν είναι τέλεια, η προκύπτουσα τροποποίηση θα μεταδοθεί μέσω του αρχικού κυττάρου (μητρικό) σε περαιτέρω κύτταρα (μητρικά) και μπορεί τελικά να οδηγήσει σε καρκίνο. Αν τα τροποποιημένα κύτταρα είναι κύτταρα αναπαραγωγής (δηλ. ωάρια και σπερματοζωάρια) μπορεί να υπάρξουν επιπτώσεις στους απογόνους. Τα τελευταία χρόνια, έρευνες έχουν δείξει ότι ιοντίζουσα ακτινοβολία σε σχετικά χαμηλές και μέτριες δόσεις μπορεί να αλληλεπιδράσει και με άλλους τύπους μορίων παρά με το DNA. Αυτό μπορεί να έχει συνέπειες σε διάφορες κυτταρικές διεργασίες, όπως στην μεταγωγή σήματος εντός και μεταξύ κυττάρων και στην γονιδιακή έκφραση.

Η έκθεση σε ακτινοβολία συσχετίστηκε με τις περισσότερες μορφές λευχαιμίας και με καρκίνους πολλών οργάνων, όπως των πνευμόνων, του μαστού και του θυρεοειδούς αδένα αλλά όχι με άλλα όργανα όπως ο προστάτης. Ωστόσο μια μικρή έκθεση σε ακτινοβολία (π.χ. περίπου όσο το παγκόσμιο μέσο επίπεδο φυσικής έκθεσης στην ακτινοβολία) θα προκαλούσε υπερβολικά μικρή αύξηση στην πιθανότητα εμφάνισης καρκίνου. Ακόμα μπορεί να εκδηλωθούν καρκίνοι δεκαετίες μετά την έκθεση χωρίς να διαφέρουν από καρκίνους που προκύπτουν αυθόρμητα ή από καρκίνους που αποδίδονται σε άλλους παράγοντες.

Ακόμα έχει τη δυνατότητα να προκαλέσει κληρονομικές επιπτώσεις στους απογόνους των ατόμων που εκτίθενται. Ωστόσο οι κληρονομικές επιπτώσεις της ακτινοβολίας δεν έχουν ακόμη εντοπιστεί στους ανθρώπους που εκτίθεται, αν και είναι γνωστή η επίδραση σε άλλα είδη.

Στον **Πίνακα 1** δίνονται οι ετήσιες μέσες τιμές ενεργού δόσης από διάφορες φυσικές πηγές ακτινοβολίας παγκοσμίως. Η συνολική έκθεση είναι 2,4 mSv/έτος. Ωστόσο το εύρος των τιμών είναι αρκετά μεγάλο. Σε οποιονδήποτε μεγάλο πληθυσμό το 65% αναμένεται να έχει ετήσια ενεργό δόση μεταξύ 1mSv/έτος και 3mSv/έτος, περίπου το 25% θα έχει μικρότερη από 1mSv/έτος και το 10% μεγαλύτερη από 3mSv/έτος.



Πίνακας 1: Παγκόσμια μέση τιμή της ετήσιας ενεργού δόσης από φυσική ραδιενέργεια UNSCEAR 2000.

Στον **Πίνακα 2** δίνονται οι παγκόσμιες μέσες ετήσιες δόσεις που δέχεται ο άνθρωπος από διάφορες πηγές έκθεσης. Οι δόσεις αυτές δεν είναι κατ' ανάγκην οι δόσεις που θα λάβει κάθε άτομο. Αυτό εξαρτάται από την τοποθεσία, τις προσωπικές συνήθειες, τη διατροφή και διάφορους άλλους παράγοντες.

Πηγές έκθεσης	Παγκόσμια μέση ετήσια ενεργός δόση (mSv/έτος)
Ακτινοβολία υποβάθρου	2,4
Διαγνωστικές ιατρικές εξετάσεις	0,4
Ατμοσφαιρικοί πυρηνικοί έλεγχοι	0,005
Ατύχημα Τσερνομπίλ	0,002
Παραγωγή πυρηνικής ενέργειας	0,0002

Πίνακας 2: Μέση ετήσια κατά κεφαλήν ενεργός δόση από φυσικές και τεχνητές πηγές.

Η μεγαλύτερη συμβολή στην ετήσια έκθεση προέρχεται από την φυσική ακτινοβολία (ακτινοβολία υποβάθρου) με ετήσια ενεργό δόση τα 2,4mSv/έτος και εύρος τιμών που

κυμαίνονται από 1-10mSv/έτος. Τα άτομα που κατοικούν σε περιοχές με υψηλό υπόβαθρο ενδέχεται να εκτίθενται σε μεγαλύτερες δόσεις. (Αντωνόπουλος n.d.)

1.6 Επιπτώσεις από χαμηλές δόσεις ακτινοβολίας

Αρκετές μελέτες διεξάγονται για τις επιπτώσεις της ακτινοβολίας υποβάθρου στους ανθρώπους και σε ζώα. Οι βασικότερες επιδημιολογικές μελέτες σε ανθρώπους διεξάγονται σε περιοχές πυρηνικών ατυχημάτων και σε περιοχές επιθέσεων με ατομικές βόμβες. Τα πράγματα ακόμα δεν είναι ξεκάθαρα σχετικά με τις επιπτώσεις σε πολύ χαμηλών δόσεων ακτινοβολίας, ωστόσο η πολύπλευρη μελέτη και η γνώση των δόσεων που δέχεται ο άνθρωπος από τις διάφορες πηγές έκθεσης προσφέρει διαθεσιμότητα των δεδομένων για συσχετίσεις.

Οι βλάβες του DNA στον πυρήνα του κυττάρου, είναι το κύριο γεγονός εκκίνησης με το οποίο η ακτινοβολία προκαλεί βλάβες με μακροχρόνιες επιπτώσεις στους ιστούς και τα όργανα. Η διπλή έλικα του DNA θεωρείται ο πιο πιθανός υποψήφιος για την πρόκληση κάποιας βλάβης. Οι μεμονωμένες ακτίνες είναι πολύ πιθανό να προκαλέσουν σπάσιμο της διπλής έλικας με αδυναμία για πλήρη επιδιόρθωση της βλάβης, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μακροχρόνιες βλάβες ακόμα και στις χαμηλότερες δόσεις. Βλάβες σε άλλα κυτταρικά στοιχεία (επιγενετικές αλλαγές) μπορεί να επηρεάσουν τη λειτουργία του κυττάρου και να οδηγήσει σε κακοήθειες.

Στο βαθμό που είναι γνωστό, ακόμη και σε χαμηλές δόσεις η ακτινοβολία μπορεί να δράσει ως εκκινητής της ογκογένεσης. Τα δεδομένα που παρέχονται από την μελέτη *The Life Span Study* αποδεικνύουν ότι η ακτινοβολία μπορεί να ευθύνεται για καρκίνους του στομάχου, του παχέος εντέρου, του ήπατος, του πνεύμονα, των ωθηκών και της ουροδόχου κύστης. Επίσης υπάρχει μεγάλος κίνδυνος πρόκλησης καρκίνου του θυρεοειδούς καθώς και για καρκίνου του δέρματος. Στατιστικά σημαντικοί κίνδυνοι παρατηρήθηκαν σε δόσεις πάνω από περίπου 100mSv/έτος. Ακόμα έχει γίνει συσχέτιση της ακτινοβολίας με τους περισσότερους τύπους λευχαιμίας αλλά όχι με το λέμφωμα ή το πολλαπλό μυέλωμα. Πρέπει να σημειωθεί, ότι η αδυναμία της ανίχνευσης του βαθμού της αύξησης του κινδύνου σε πολύ χαμηλές δόσεις δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχει αύξηση του κινδύνου.

Από μελέτες που έγιναν σε πληθυσμούς στη Χιροσίμα και στο Ναγκασάκι φαίνεται ότι σε δόσεις 100mSv/έτος η αύξηση του κινδύνου για εμφάνιση καρκίνου είναι της τάξεως του 0,5%. Ο μέσος όρος της πιθανότητας εμφάνισης καρκίνου από οποιαδήποτε αίτια στην Ιαπωνία, καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του ανθρώπου, είναι για μεν τους άνδρες 26% για δε τις γυναίκες 16%. Αν προσθέσουμε την πιθανότητα από την έκθεση σε ακτινοβολία τα ποσοστά γίνονται 26,5% και 16,5% για άνδρες και γυναίκες αντίστοιχα. Κάτω από το επίπεδο των 100mSv/έτος η εικόνα γίνεται λιγότερο σαφής. Υπάρχουν ελάχιστα ενδεικτικά στοιχεία που φανερώνουν κάποια σχέση με τη δόση της ακτινοβολίας. Ωστόσο οποιαδήποτε δόση αυξάνει τον κίνδυνο καρκίνου: δεν υπάρχει κατώτατο όριο. Παρά ταύτα κάποιοι επιστήμονες υποστηρίζουν πως η έκθεση σε χαμηλές δόσεις, κάτω από ένα όριο, είναι αβλαβείς, άλλοι ότι έχουν ευεργετικά αποτελέσματα στην επιδιόρθωση του DNA και άλλοι ότι οι κίνδυνοι από τις χαμηλές δόσεις μπορεί να είναι υψηλότεροι από τους υπολογιζόμενους σήμερα. Σε έναν πληθυσμό όπου οι εκθέσεις ακτινοβολίας είναι πολύ χαμηλές, μπορεί να είναι δύσκολο να ανιχνευτεί σημαντική μεταβολή των ποσοστών καρκίνου.

Σε γενικές γραμμές οι δόσεις από κατάποση φυσικών ραδιονουκλιδίων, που προέρχονται στα τρόφιμα και το πόσιμο νερό, έχουν υπολογιστεί από τις μετρούμενες συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων σε ιστούς ή όργανα του σώματος. Ο οργανισμός διατηρεί σταθερά τα επίπεδα καλίου στο σώμα ανεξάρτητα από την πρόσληψή του- άρα και του (ραδιενεργού) ⁴⁰K. Για τα ραδιονουκλίδια της σειράς του θορίου και του ουρανίου αυτό δεν συμβαίνει, άρα οι συγκεντρώσεις τους στα τρόφιμα και το νερό καθώς και οι διατροφικές συνήθειες είναι στοιχεία χρήσιμα για τον προσδιορισμό των φορτίων του σώματος ανάλογα με τις γεωγραφικές περιοχές.

Η βασική οδός μεταφοράς ραδιολογικά σημαντικών ραδιονουκλιδίων, όπως το ¹³⁷Cs, από τα ζώα στον άνθρωπο, είναι η κατανάλωση γάλακτος. Το καίσιο μεταφέρεται εύκολα από τις ζωοτροφές στο γάλα. Ακόμα μεταφέρεται με την βοήθεια συμπλόκων καλίου στους μαλακούς ιστούς των ζώων και ιδιαίτερα στους μύες.

Η έκθεση σε χαμηλές δόσεις τείνει να επηρεάζει: (i) τα γονίδια που εμπλέκονται στη μεταγωγή σήματος, (ii) τη διακυτταρική σηματοδότηση, (iii) την ανάπτυξη και (iv) την απόκριση σε βλάβες του DNA. (UNSCEAR, BIOLOGICAL MECHANISMS OF RADIATION ACTIONS AT LOW DOSES 2012)

1.7 Μεταβολές κατά την προετοιμασία των τροφίμων

Η ξήρανση των τροφίμων αυξάνει την συγκέντρωση των ραδιονουκλιδίων, σε σύγκριση με τα φρέσκα τρόφιμα.

Ο βρασμός του κρέατος και η απόρριψη του νερού μειώνει την περιεκτικότητα των ραδιονουκλιδίων. Αυτό δεν ισχύει όταν το νερό του βρασμού επαναχρησιμοποιείται, όπως φερ' ειπείν στην παρασκευή σαλτσών.

Στα γαλακτοκομικά συναντάμε μικρότερες συγκεντρώσεις σε κρέμες, ενώ τα φρούτα και τα λαχανικά επηρεάζονται σημαντικά από το πλύσιμο, το ξεφλούδισμα και το μαγείρεμα. (UNSCEAR, Sources and effects of ionizing radiation, 2000)

2. ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν ο υπολογισμός της συγκέντρωσης των φυσικών ραδιονουκλιδίων ^{238}U , ^{232}Th και ^{40}K και του τεχνητού ραδιονουκλιδίου ^{137}Cs , σε γαλακτοκομικά προϊόντα και σε διάφορα τρόφιμα φυτικής προέλευσης. Έγινε προσπάθεια να υπολογισθούν η ετήσια ενεργότητα και η ετήσια ισοδύναμη δόση για το σύνολο των τροφίμων που καταναλώνονται. Ο υπολογισμός της ετήσιας κατανάλωσης τροφίμων έγινε με βάση τα πρότυπα της Μεσογειακής Διατροφής κατά προσέγγιση, λόγω της αδυναμίας ανεύρεσης στοιχείων σχετικά με την ετήσια κατά κεφαλήν κατανάλωση τροφίμων των Ελλήνων.

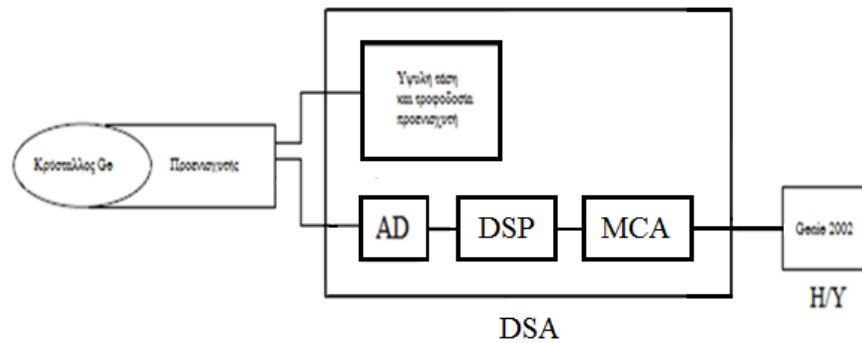
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Περιγραφή ανιχνευτικής διάταξης

Για τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε η ανιχνευτική διάταξη της **Εικόνας 2**, όπου απεικονίζεται ο ανιχνευτής υπερκαθαρού Γερμανίου της εταιρίας Canberra, που είναι διαθέσιμος στο τμήμα Αυτοματισμού του Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης. Στο **Σχήμα 1** παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα της διάταξης.



Εικόνα 2: Η ανιχνευτική διάταξη HPGe της εργασίας.



Σχήμα 1: Σχηματικό διάγραμμα της ανιχνευτικής διάταξης.

Η ανιχνευτική διάταξη αποτελείται από τα εξής επιμέρους στοιχεία:

- 1) **Κρύσταλλος:** Πρόκειται για κρύσταλλο υπερκαθαρού Γερμανίου, κατασκευασμένο από την εταιρία Canberra. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο BE2020 της σειράς Broad Energy Germanium Detectors. Η συγκεκριμένη σειρά ανιχνευτών είναι ειδικά κατασκευασμένη για μετρήσεις δειγμάτων, προσφέροντας πολύ καλή διακριτική ικανότητα για ενέργειες μεταξύ 3 και 3000 keV και βέλτιστη απόδοση για ενέργειες κάτω από 1 MeV, όπου έχουμε συνήθως τη μεγαλύτερη δραστηριότητα ακτινοβολιών γ . Το μοντέλο BE2020 είναι κυλινδρικού σχήματος, διατομής 50,5 mm και πάχους 20 mm. Παρουσιάζει σχετική απόδοση 9%, τάση λειτουργίας 3500 V και διακριτική ικανότητα (Full Width at Half Maximum) 0,35 keV στα 5,9 keV, 0,65 keV στα 122 keV και 1,9 keV στα 1332 keV. Ο



Εικόνα 3: Το πάνω μέρος του κρυοστάτη μέσα στην θωράκιση του ανιχνευτή.

κρύσταλλος, βρίσκεται μέσα στον κρυοστάτη, όπου στο εσωτερικό αυτού υπάρχει κενό αέρος για την αποφυγή αγωγής θερμότητας, ώστε να διατηρείται ο κρύσταλλος σε θερμοκρασία $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Στην Εικόνα 3 φαίνεται το πάνω μέρος του κρυοστάτη καθώς και η θωράκιση του ανιχνευτή, που αποτελείται από μόλυβδο μεγάλου πάχους και εσωτερικά αυτής λεπτό φύλλο χαλκού.

- 2) **Δοχείο υγρού Αζώτου (LN₂):** Για την αποθήκευση του υγρού Αζώτου και την επαγωγή της θερμότητας στον κρύσταλλο χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο 7500sl της εταιρίας Canberra (Εικόνα 4). Περιλαμβάνει ένα δοχείο Dewar (διπλού τοιχώματος, κενό αέρος μεταξύ των τοιχωμάτων) για την αποθήκευση του υγρού Αζώτου και για την ψύξη τον ανιχνευτή μέσω μιας ράβδου χαλκού (cold finger). Η ράβδος αυτή είναι βυθισμένη στο υγρό άζωτο από τη μία πλευρά, και διερχόμενη μέσα από τον κρυοστάτη, εφάπτεται στον κρύσταλλο από την άλλη.



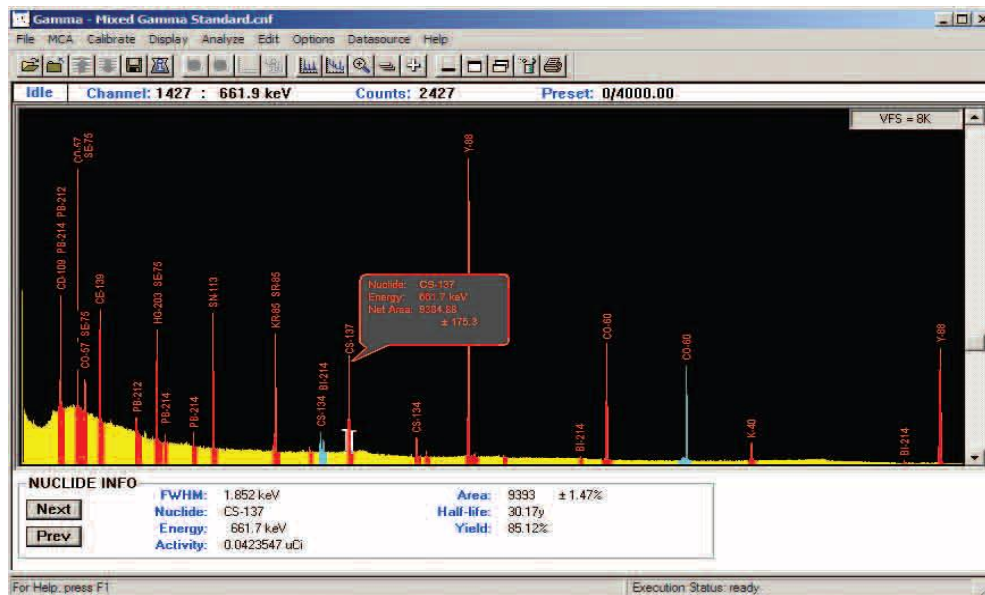
Εικόνα 4: Δοχείο υγρού αζώτου Canberra.

- 3) **Προενισχυτής:** Χρησιμοποιήθηκε ο προενισχυτής 2002 csl της Canberra, ευαίσθητος σε φορτία. Σκοπός του προενισχυτή είναι η συλλογή των φορτίων που παράγονται στον κρύσταλλο και η μετατροπή τους σε βηματικό παλμό (ολοκλήρωση), ύψους ανάλογο του συσσωρευμένου φορτίου σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (event). Ο παλμός μειώνεται εκθετικά με χρονική σταθερά 50 μ s για την αποφυγή επικάλυψης διαδοχικών παλμών. Έτσι μπορεί να επιτύχει μετρήσεις 200.000 κρούσεων ανά δευτερόλεπτο. Για τη μείωση του ηλεκτρικού θορύβου ο προενισχυτής είναι και αυτός τοποθετημένος στον κρουστάτη και ψύχεται από το υγρό άζωτο μέσω της χάλκινης ράβδου. Παράλληλα ο προενισχυτής επιβλέπει με κατάλληλο κύκλωμα τη θερμοκρασία του κρυστάλλου και με ενδεικτική λυχνία προειδοποιεί για ενδεχόμενη βλάβη. Στο πάνω μέρος της **Εικόνας 4** φαίνεται το σημείο του κρουστάτη που είναι τοποθετημένος ο προενισχυτής με τα καλώδια τροφοδοσίας και εξόδου.
- 4) **Ψηφιακός Αναλυτής Φάσματος:** Πρόκειται για το μοντέλο DSA-1000 της Canberra. Ο αναλυτής είναι υπεύθυνος για την παραλαβή του σήματος από τον προενισχυτή, τη μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, και χρησιμοποιώντας αλγόριθμους ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (εφαρμόζοντας τραπεζοειδή φίλτρα), τη διαμόρφωση του σήματος σε κατάλληλη μορφή. Έχοντας πλέον το σήμα σε κατάλληλη μορφή είναι υπεύθυνος για την κατανομή του παλμού ανάλογα με το ύψος του στο αντίστοιχο κανάλι. Ο ψηφιακός αναλυτής DSA-1000 προσφέρει τεχνικές ταχύτατης μετατροπής AD, υψηλής ταχύτητας ψηφιακούς υπολογισμούς, πολυκαναλικό αναλυτή 16000 καναλιών και συχνότητα δειγματοληψίας 10 MHz (1 μ s). Χρησιμοποιώντας ψηφιακές τεχνικές έχουμε μεγαλύτερη σταθερότητα, καλύτερη απόδοση επί του ρυθμού κρούσεων και καλύτερη ανάλυση, σε σύγκριση με τις παλαιότερες αναλογικές τεχνικές. Στην **Εικόνα 5** φαίνεται ο ψηφιακός αναλυτής που χρησιμοποιήθηκε, με τις ενδεικτικές λυχνίες υψηλής τάσης.



Εικόνα 5: Ψηφιακός αναλυτής φάσματος DSA-1000

- 5) **Λογισμικό Η/Υ:** Πρόκειται για το ηλεκτρονικό λογισμικό Genie-2000 της εταιρίας Canberra. Μέσω ενός γραφικού περιβάλλοντος (**Εικόνα 6**) γίνεται ο έλεγχος της μονάδας του ψηφιακού αναλυτή, η παρουσίαση με τη μορφή φάσματος και η ανάλυση των αποτελεσμάτων της μέτρησης. Επιπλέον το λογισμικό έχει δυνατότητες αυτόματης ανίχνευσης, υπολογισμού του κέντρου και του συνολικού αριθμού κρούσεων της φωτοκορυφής, των κρούσεων του υποβάθρου και των αβεβαιοτήτων των υπολογισμών.



Εικόνα 6: Το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού Genie-2000.

3.2 Βαθμονόμηση ανιχνευτή HPGē

3.2.1 Βαθμονόμηση ενέργειας

Πριν την εκτέλεση οποιοσδήποτε μέτρησης, ήταν απαραίτητη η ενεργειακή βαθμονόμηση του ανιχνευτή. Η διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω είχε πραγματοποιηθεί για τις ανάγκες προηγούμενης εργασίας και έτσι για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε η υπάρχουσα βαθμονόμηση. Η έξοδος ενός ανιχνευτή ακτινοβολίας γ είναι ηλεκτρικοί παλμοί, ύψους ανάλογου με την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Ο πολυκαναλικός αναλυτής παραλαμβάνει αυτούς τους παλμούς και μέσω της διαδικασίας μετατροπής του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, τους κατατάσσει ανάλογα με το ύψος τους σε κανάλια.

Σκοπός της ενεργειακής βαθμονόμησης ήταν η αντιστοίχιση του ύψους των ηλεκτρικών παλμών, που εκφράζεται από τον αριθμό του καναλιού, με τις αντίστοιχες ενέργειες των ακτινών γ που τους προκάλεσαν. Η πειραματική διαδικασία της συνιστά τον προσδιορισμό της γραμμικής συνάρτησης ($\gamma = ax+b$):

$$E_{\gamma} = a * CH + b$$

Όπου:

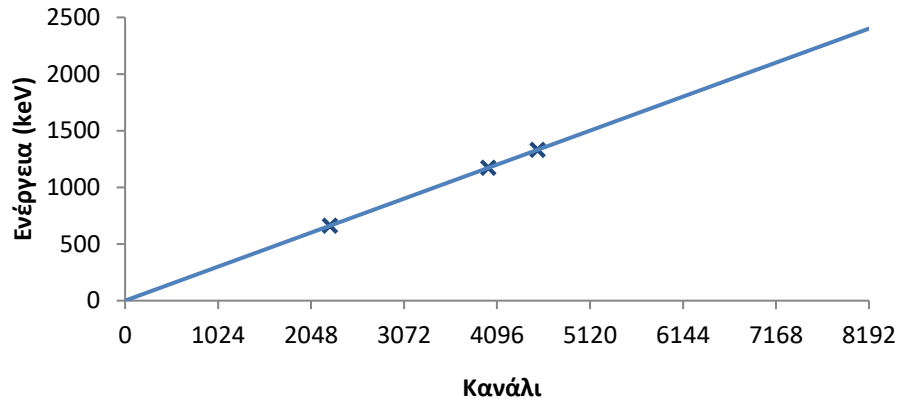
- **a:** Η ενεργειακή κλίμακα (keV/κανάλι) του πολυκαναλικού αναλυτή,
- **b:** Το σημείο τομής με τον κάθετο άξονα,
- **CH:** Ο αριθμός του καναλιού που βρίσκεται η φωτοκορυφή στο φάσμα.

Για τον προσδιορισμό της ευθείας μετρήθηκε το φάσμα πηγών γνωστών ενεργειών ακτινοβολίας γ , και συγκρίνουμε την θέση των φωτοκορυφών αυτού (κανάλια) με τις αντίστοιχες ενέργειες. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι σημειακές πηγές Co-60 (1173 και 1333 keV) και Cs-137 (661 keV), όπως φαίνονται στην **εικόνα 7**.



Εικόνα 7: Σημειακές πηγές ακτινοβολίας γ .

Έχοντας πλέον μερικά σημεία του γραφήματος ενέργειας φωτονίου συναρτήσει του αριθμού καναλιού, το λογισμικό υπολογίζει την καλύτερη ευθεία που περνάει από αυτά τα σημεία με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Αυτή η ευθεία είναι που εκφράζει την ενεργειακή βαθμονόμηση του ανιχνευτή και θα χρησιμοποιήθηκε για όλες τις μετρήσεις της εργασίας.



Σχήμα 2: Καμπύλη ενεργειακής βαθμονόμηση ανιχνευτή.

3.2.2 Βαθμονόμηση απόδοσης

Έχοντας ολοκληρώσει την ενεργειακή βαθμονόμηση είμαστε σε θέση να προχωρήσουμε στη βαθμονόμηση απόδοσης του ανιχνευτή, στον προσδιορισμό δηλαδή της απόδοσης του ανιχνευτή για τις διάφορες ενέργειες ακτινοβολίας γ που μας ενδιαφέρουν. Ολοκληρώνοντας αυτή τη διαδικασία κατέστη δυνατή η μετατροπή του αριθμού των ακτινοβολιών γ που προσπίπτουν σε κάποιο δεδομένο χρονικό διάστημα στον ανιχνευτή στη συνολική ενεργότητα της ραδιενεργού πηγής που τις εκπέμπει.

Η απόδοση του ανιχνευτή είναι διαφορετική για κάθε ενεργειακό επίπεδο ακτινοβολίας γ , καθώς επίσης και για κάθε γεωμετρία δείγματος. Για την πειραματική διαδικασία η σχέση θα έχει ως εξής:

$$\varepsilon = \frac{cps}{gps}$$

Όπου:

- **cps** (counts per second): Το άθροισμα των κρούσεων της φωτοκορυφής διαιρεμένο με τον συνολικό χρόνο μέτρησης. Εκφράζει τον αριθμό ακτινοβολιών γ συγκεκριμένης ενέργειας που αλληλεπιδρούν με τον ανιχνευτή ανά δευτερόλεπτο.
- **gps** (gammas per second): Ο αριθμός των ακτινοβολιών γ συγκεκριμένης ενέργειας που εκπέμπει η πηγή ανά δευτερόλεπτο. Υπολογίζεται από τις συνολικές διασπάσεις του νουκλιδίου ανά δευτερόλεπτο (ενεργότητα), πολλαπλασιασμένη με το Fractional Yield

(FY), μέγεθος που εκφράζει την πιθανότητα να προκύψει ακτινοβολία γ συγκεκριμένης ενέργειας σε κάποια διάσπαση του νουκλιδίου και βρίσκεται βιβλιογραφικά.

Ο πειραματικός προσδιορισμός της απόδοσης του ανιχνευτή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ειδικών πρότυπων δειγμάτων, που περιέχουν πηγές γνωστής ραδιενέργειας και συνοδεύονται συνήθως από έγγραφα που αναγράφουν αναλυτικά τα διάφορα νουκλίδια που εκπέμπουν τη ραδιενέργεια, τις διάφορες ενέργειες που αυτά εκπέμπουν, την ενεργότητα των νουκλιδίων καθώς και άλλες χρήσιμες πληροφορίες όπως τη χρονολογία της μέτρησης, τα FY, τα grs και τους χρόνους ημιζωής των διαφόρων ραδιενεργών νουκλιδίων που περιέχονται στην πηγή. Τα πρότυπα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία προέρχονται από την εταιρία Eckert & Ziegler Isotope Products. (Ζέικος n.d.)

3.3 Συλλογή και προετοιμασία δειγμάτων

Τα προς μέτρηση επιλεγθέντα τρόφιμα που επιλέχθηκαν ανήκουν στις ομάδες των γαλακτοκομικών και των τροφίμων φυτικής προέλευσης. Η προέλευση των τροφίμων ήταν από διάφορες περιοχές της Ελλάδας και προμηθεύτηκαν από την τοπική αγορά της Θεσσαλονίκης. Η επιλογή των τροφίμων έγινε με κριτήρια την προέλευσή τους, την θέση τους στη μεσογειακή διατροφή καθώς και τις επιλογές άλλων ερευνητών.

Ο συνολικός αριθμός μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν ανήλθε στις 24. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων επιλέχθηκαν 21 τρόφιμα. Για τα 19 πραγματοποιήθηκε από μία μέτρηση για το καθένα. Εξαιρέση αποτέλεσαν το δείγμα ζοχών όπου πραγματοποιήθηκαν τρεις μετρήσεις και το δείγμα τσαγιού όπου πραγματοποιήθηκαν 2 μετρήσεις.

Λόγω της χαμηλής πυκνότητας του δείγματος ζοχών στη γεωμετρία των 260ml (<0,8 gr/ml), όπως αυτή διαμορφώθηκε κατά την προετοιμασία του δείγματος, και της απουσίας βαθμονόμησης του ανιχνευτή για τόσο χαμηλή πυκνότητα, πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις στη γεωμετρία των 100ml όπου υπήρχε διαθέσιμη βαθμονόμηση για πυκνότητα δείγματος κάτω του 0,8 gr/ml καθώς και μια μέτρηση σε γεωμετρία 260ml. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δύο διαφορετικών γεωμετριών συγκρίθηκαν μεταξύ τους για να διαπιστωθούν τυχόν διαφορές που οφείλονται στη βαθμονόμηση.

Στο δείγμα τσαγιού πραγματοποιήθηκε εκχύλιση με βραστό νερό. Κατά την εκχύλιση χρησιμοποιήθηκαν δυο διαφορετικές ποσότητες φύλλων τσαγιού όπου προέκυψαν δύο δείγματα διαφορετικών συγκεντρώσεων (ένα πυκνό και ένα αραιό).

Πίνακας 3: Στοιχεία δειγμάτων.

<i>Αγελαδινό Γιαούρτι Αμερικανικής Γεωργικής Σχολής</i>	<i>Τσάι Του Βουνού</i>
<i>Αγελαδινό Γιαούρτι Φάρμα Κουκάκη</i>	<i>BIO Καρότα</i>
<i>Αγελαδινό γάλα 8 γυναίκες</i>	<i>BIO Μπανάνες</i>
<i>Αγελαδινό γάλα Οικολογικό Αγρόκτημα Λιθαδερού</i>	<i>Μανιτάρια Pleurotus</i>
<i>Τυρί φέτα Θεσσαλίας ΠΟΠ Υφαντής</i>	<i>Πατάτες</i>
<i>Τυρί φέτα Ηπείρου ΠΟΠ Καράλης</i>	<i>Φιστίκια Αιγίνης</i>
<i>BIO Κατσικίσιο γάλα Μενοίκιο</i>	<i>Καρύδια</i>
<i>Κατσικίσιο γάλα Τέμπη</i>	<i>Αμύγδαλα</i>
<i>Κασέρι ΠΟΠ Προίκα</i>	<i>Αλεύρι</i>
<i>Γραβιέρα ΠΟΠ ΕΑΣ Νάξου</i>	<i>Φλούδα μπανάνας</i>
<i>BIO Ζοχοί</i>	

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τους μήνες Μάρτιο και Απρίλιο 2018. Στον **Πίνακα 3** δίνονται τα στοιχεία των δειγμάτων. Το καθαρό βάρος, η πυκνότητα καθώς και ο τρόπος επεξεργασίας και οι ημερομηνίες έναρξης και λήξης των μετρήσεων δίνονται στον **Πίνακα 4**.

Τα δείγματα συλλέχτηκαν φρέσκα, μέχρι και δύο μέρες πριν από τη μέτρηση. Τα γαλακτοκομικά (γάλα, γιαούρτι και τυρί) αποθηκεύτηκαν σε οικιακό ψυγείο σε θερμοκρασίες 2-4 °C. Τα υπόλοιπα τρόφιμα αποθηκεύτηκαν σε θερμοκρασία δωματίου.

Όλα τα τρόφιμα προετοιμάστηκαν έτσι ώστε να είναι έτοιμα προς κατανάλωση. Έγινε καθαρισμός, απόρριψη των μη βρώσιμων μερών τους και πλύσιμο όπου κρίθηκε απαραίτητο. Στη συνέχεια, για τα υγρά και ημιστερεά τρόφιμα (γάλα και γιαούρτι) έγινε μια ήπια ανάδευση

και τοποθέτησή τους στο ειδικό δοχείο της μέτρησης, όγκου 260ml. Για τα υπόλοιπα τρόφιμα έγινε άλεση σε γουδί (π.χ. ξηροί καρποί) ή τρίψιμο σε τρίφτη (π.χ. τυρί) ή άλεση σε μπλέντερ. Για το τσάι του βουνού ακολουθήθηκε η ίδια τεχνική με τη μελέτη των (Pearson, Gaw, Hermanspahn, & Glover, 2016) που αφορούσε στον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των φυσικών και τεχνητών ραδιονουκλιδίων στη δίαιτα της Νέας Ζηλανδίας. Έτσι, λήφθηκε εκχύλισμα 2,6γρ. τσαγιού σε 260ml νερού (δηλ. 1γρ. ανά 100ml) με θερμοκρασία νερού μέχρι 80°C. Για να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων, παρασκευάστηκε και δεύτερο δείγμα, πυκνότερο του πρώτου, όπου έγινε εκχύλιση 60γρ. τσαγιού σε 260ml νερό (πυκνό δείγμα). Και στα δύο δείγματα έγινε καλή ανάδευση του νερού πριν από τον βρασμό για την αποφυγή ύπαρξης ραδονίου. Με την ανάδευση, το εγκλωβισμένο ραδόνιο που βρίσκεται σε αέρια κατάσταση, διαφεύγει στην ατμόσφαιρα και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η απαλλαγή του νερού από αυτό.

Κάθε δείγμα προετοιμάστηκε την ημέρα της μέτρησης και στη συνέχεια τοποθετήθηκε στο ειδικό δοχείο όγκου 260ml (Εικόνα 8). Έπειτα τοποθετήθηκαν πάνω στον ανιχνευτή, και αφού σφραγίστηκε μέσα στη θωράκιση, περάστηκαν τα στοιχεία του δείγματος στο πρόγραμμα του Η/Υ (όνομα δείγματος, περιγραφή, προέλευση και βάρος), και ακολούθησε η έναρξη της μέτρησης.



Εικόνα 8: Δοχείο μέτρησης 260ml.

Οι μετρήσεις και οι αλλαγές των δειγμάτων πραγματοποιούνταν κάθε Δευτέρα, Τετάρτη και Παρασκευή. Κάθε δείγμα παρέμεινε στον ανιχνευτή για τουλάχιστον δύο εικοσιτετράωρα. Αφού έγινε η παραλαβή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων από το ειδικό πρόγραμμα, τοποθετήθηκαν σε φύλλο excel για τον υπολογισμό της ενεργότητας του κάθε ραδιονουκλιδίου. Η προετοιμασία κάθε τροφίμου όπως και η συλλογή και αποθήκευσή τους έγινε σύμφωνα με τις οδηγίες της IAEA (Measurement of Radionuclides in Food and the Environment, A Guidebook, 1989).

3.4 Μετρήσεις ραδιενέργειας δειγμάτων

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για μεγάλα χρονικά διαστήματα με σκοπό ακριβέστερα στατιστικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα όλα τα δείγματα μετρήθηκαν για πάνω από 160000sec. Με τη συλλογή του φάσματος από την ανιχνευτική διάταξη, υπολογίστηκαν οι ενεργότητες του U-238, του U-235, του Th-232, του K-40 και του Cs-137.

Για τον υπολογισμό των ενεργοτήτων των εκάστοτε νουκλιδίων των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση:

$$A = \frac{cps}{\epsilon * FY * M}$$

Όπου:

- **A**: Η ενεργότητα του νουκλιδίου εκφρασμένη σε Bq/kg,
- **cps**: Οι καθαρές κρούσεις που ανιχνεύονται και οφείλονται μόνο στην ακτινοβολία γ που εκπέμπει το συγκεκριμένο νουκλίδιο ανά δευτερόλεπτο. Υπολογίζεται από τις συνολικές κρούσεις του φάσματος, αφαιρώντας τις κρούσεις υποβάθρου και τυχόν παρεμβολές από γειτονικής ενέργειας ακτίνες γ άλλων νουκλιδίων.
- **ε**: Η απόδοση του ανιχνευτή για τη συγκεκριμένη γεωμετρία και ενέργεια που έχει προσδιοριστεί από τη βαθμονόμηση απόδοσης.
- **FY**: Η πιθανότητα εκπομπής ακτινοβολίας γ κατά τη διάσπαση του νουκλιδίου. Οι τιμές βρίσκονται βιβλιογραφικά.
- **M**: Η μάζα του δείγματος σε χιλιόγραμμα.

Για τους υπολογισμούς των ενεργοτήτων, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά μέσα στο κείμενο, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των πιθανοτήτων εκπομπής ακτινοβολίας-γ της βάσης πυρηνικών δεδομένων του Διεθνή Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency- I.A.E.A.). Γενικά έγινε προσπάθεια επιδιόρθωσης, όπου ήταν αυτή δυνατή, ακτινοβολιών-γ που έχουν σοβαρές από άλλα νουκλίδια, ή που υπόκεινται στο αθροιστικό φαινόμενο. (Ζέικος n.d.)

3.4.1 ΣΕΙΡΑ ΟΥΡΑΝΙΟΥ

Επειδή δεν είναι δυνατή η απευθείας μέτρηση του U-238, διότι κατά τη διάσπαση του δεν εκπέμπεται σημαντική ακτινοβολία γ , μπορούμε να μετρήσουμε την ενεργότητα των θυγατρικών του και, εφόσον υπάρχει ραδιενεργός ισορροπία, να έχουμε μια αρκετά ακριβή εκτίμηση της ενεργότητας του. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω φωτοκορυφές:

- **Th-234 (63,28 keV)** Απαιτείται διόρθωση της φωτοκορυφής του φάσματος, λόγω παρεμβολών από το Th-232 στα 63,81 keV. Διορθώνουμε πολλαπλασιάζοντας τις συνολικές κρούσεις της φωτοκορυφής επί 0,982 (συμμετοχή στην φωτοκορυφή κατά 98,2%) (Gilmore, 2008). Αφαιρώντας τυχόν κρούσεις λόγω υποβάθρου, έχουμε τις καθαρές κρούσεις που οφείλονται στο Th-234, οπότε προχωράμε στον υπολογισμό της ενεργότητάς του στο δείγμα μας.
- **Pa-234m (1001,03 keV)** Δεν απαιτείται κάποια διόρθωση, εκτός εάν υπάρχουν κρούσεις στο υπόβαθρο.
- **Ra-226 (186,2 keV)** Η φωτοκορυφή που παρουσιάζεται περίπου στα 186 keV συνιστάται στην πραγματικότητα από την ακτινοβολία γ του Ra-226 κατά 57,1% και του U-235 κατά 42,8% (Gilmore, 2008). Οπότε για τον υπολογισμό της ενεργότητας του Ra-226 είναι απαραίτητη η διόρθωση των συνολικών κρούσεων της φωτοκορυφής ως προς το παραπάνω ποσοστό. Εναλλακτικά η διόρθωση μπορεί να γίνει αφαιρώντας τις κρούσεις ανά δευτερόλεπτο που οφείλονται στο U-235 που υπολογίζονται είτε βάσει της αναλογίας U-238/U-235, είτε βάσει της ενεργότητας του U-235 που προκύπτει από τη φωτοκορυφή του στα 143,76 keV.
- **Pb-214 (351,93 keV)** Δεν απαιτείται κάποια διόρθωση πέραν της αφαίρεσης κρούσεων του υποβάθρου.
- **Bi-214 (609,31 keV και 1764 keV)** Δεν απαιτείται κάποια διόρθωση πέραν της αφαίρεσης κρούσεων του υποβάθρου.

3.4.3 ΣΕΙΡΑ ΘΟΡΙΟΥ

Όπως και στη σειρά Ουρανίου, το μητρικό νουκλίδιο της σειράς Θορίου Th-232 δεν είναι άμεσα μετρήσιμο, δεδομένης όμως της ραδιενεργού ισορροπίας, μπορούμε να μετρήσουμε τα θυγατρικά του και να εκτιμήσουμε την ενεργότητά του σύμφωνα με τις ενεργότητες των θυγατρικών του νουκλιδίων. Οι φωτοκορυφές που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- **Ac-228 (911,2 keV)** Δεν απαιτείται κάποια διόρθωση πέραν του υποβάθρου.
- **Pb-212 (238,6 keV)** Δεν απαιτείται κάποια διόρθωση πέραν του υποβάθρου.
- **Bi-212 (727,3 keV)** Απαιτείται διόρθωση των κρούσεων της φωτοκορυφής στα 727 keV κατά 91.6% (Gilmore, 2008), λόγω συμμετοχής του Ac-228 με χαρακτηριστική ακτινοβολία γ στα 726.86 keV.
- **Tl-208 (583,2 keV)** Η διάσπαση του Bi-212 είναι διακλαδωμένη. Μόνο το 35.94% των συνολικών διασπάσεων παράγει νουκλίδια του Tl-208. Άρα για τη σωστή εκτίμηση της ενεργότητας του Th-232 πρέπει να γίνει ανάλογη διόρθωση της ενεργότητας του Tl-208. Επιπλέον το Tl-208 υπόκειται σε μεγάλης έκτασης φαινόμενα TCS (Garcia-Talavera et al, 2000) κάνοντας τη χρήση του για την εκτίμηση της ενεργότητας του Th-232 ανακριβή.

3.4.4 K-40

Όπως αναφέραμε το K-40 είναι ευρέως διαδεδομένο στο περιβάλλον. Λόγω αυτής ακριβώς της αφθονίας, είναι πάντα παρόν στο υπόβαθρο με αρκετές κρούσεις που χρειάζεται να τις αφαιρέσουμε από τη φωτοκορυφή του φάσματος. Κατά τα άλλα η μέτρηση του με τη μέθοδο της γ φασματοσκοπίας δεν παρουσιάζει κάποια δυσκολία και δεν απαιτεί κάποια άλλη ιδιαίτερη διόρθωση. Η φωτοκορυφή που χρησιμοποιήθηκε είναι στα 1460,8keV.

3.4.5 Cs-137

Το κάισιο-137 είναι ένα τεχνητό ραδιονουκλίδιο που αποτελεί προϊόν σχάσης. Το μεγάλο ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας οφείλεται στο γεγονός ότι έχει αρκετά μεγάλο χρόνο ημιζωής (30,17 χρόνια), μεγαλύτερο από το κάισιο-134 και το ιώδιο-131. Ακόμα έχει μεγάλη χημική ομοιότητα με το κάλιο με αποτέλεσμα να απορροφάται γρήγορα από την κυκλοφορία του αίματος και να διανέμεται σε όλα τα κύτταρα του σώματος και κυρίως στους μαλακούς ιστούς. Η φωτοκορυφή που χρησιμοποιήθηκε είναι στα 661,6 keV. (Ζέικος n.d.)

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Αποτελέσματα ενεργότητας τροφίμων

Όπως προαναφέρθηκε, κατά την διάρκεια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν 24 μετρήσεις γ-φασματοσκοπίας σε 21 για τον υπολογισμό της ενεργότητας φυσικών και τεχνητών ραδιονουκλιδίων που μπορεί να περιέχονται σε αυτά. Από τα τρόφιμα αυτά τα 11 ήταν φυτικής προέλευσης ενώ τα υπόλοιπα 10 γαλακτοκομικά. Τα ραδιονουκλίδια που μετρήθηκαν είναι οι δύο φυσικές ραδιενεργές σειρές ραδιονουκλιδίων ^{238}U και ^{232}Th καθώς και το φυσικό ραδιενεργό ^{40}K . Ακόμα έγινε μέτρηση και για ένα τεχνητό ραδιονουκλίδιο, το ^{137}Cs , που αποτελεί προϊόν σχάσης.

Στον Πίνακα 5 δίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και στον Πίνακα 4 δίνονται αναλυτικά τα στοιχεία των δειγμάτων .

Στα δείγματα ζοχών πραγματοποιήθηκαν τρεις μετρήσεις ώστε να διαπιστωθούν τυχόν διαφορές που μπορεί να υπήρχαν στα δείγματα διαφορετικών γεωμετριών. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως στο πρώτο δείγμα των 260ml χαμηλής πυκνότητας υπάρχει μια υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων σε σχέση με τα άλλα δύο. Ωστόσο, οι διαφορές των δειγμάτων δεν είναι αρκετά μεγάλες. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της γεωμετρίας των 100ml.

A/A	Τρόφιμο	Καθαρό βάρος δείγματος	Πυκνότητα	Ημερομηνία έναρξης μέτρησης	Ημερομηνία λήξης μέτρησης
1	Αγελαδινό γιαούρτι Αμερικανικής Γεωργικής Σχολής 3.9%	272,75γρ.	1,049	Τετάρτη 7 Μαρτίου	Παρασκευή 9 Μαρτίου
2	Αγελαδινό Γιαούρτι Φάρμα Κουκάκη 3.85%	264,92γρ.	1,019	Παρασκευή 9 Μαρτίου	Δευτέρα 12 Μαρτίου
3	Αγελαδινό γάλα 8 γυναίκες 3.7-4%	271,01γρ.	1,042	Δευτέρα 12 Μαρτίου	Τετάρτη 14 Μαρτίου
4	Αγελαδινό γάλα πλήρες Οικολογικό Αγρόκτημα Λιβαδερού	264,92γρ.	1,019	Τετάρτη 14 Μαρτίου	Παρασκευή 16 Μαρτίου
5	Τυρί φέτα ΠΟΠ Θεσσαλίας Υφαντής	223,55γρ.	0,860	Παρασκευή 16 Μαρτίου	Δευτέρα 19 Μαρτίου
6	Τυρί φέτα ΠΟΠ Ηπείρου Κάραλης	219,39γρ.	0,844	Δευτέρα 19 Μαρτίου	Τετάρτη 21 Μαρτίου
7	ΒΙΟ Κατσικίσιο γάλα Μενοίκιο	261,58γρ.	1,006	Τετάρτη 21 Μαρτίου	Παρασκευή 23 Μαρτίου
8	Κατσικίσιο γάλα Τέμπη	261,42γρ.	1,005	Παρασκευή 23 Μαρτίου	Δευτέρα 26 Μαρτίου
9	Κασέρι ΠΟΠ Προίκα από Αιγοπρόβειο γάλα	206,93γρ.	0,796	Δευτέρα 26 Μαρτίου	Τετάρτη 28 Μαρτίου
10	Γραβιέρα ΠΟΠ ΕΑΣ Νάξου	177,91γρ.	0,684	Τετάρτη 28 Μαρτίου	Παρασκευή 30 Μαρτίου
11	ΒΙΟ Ζοχοί Τρίγλια Χαλκιδικής	139,29γρ.	0,536	Παρασκευή 30 Μαρτίου	Δευτέρα 2 Απριλίου
12	ΒΙΟ Ζοχοί Τρίγλια Χαλκιδικής	85,11γρ.	0,851	Δευτέρα 2 Απριλίου	Τετάρτη 4 Απριλίου
13	ΒΙΟ Ζοχοί Τρίγλια Χαλκιδικής	85,11γρ.	0,851	Τετάρτη 4 Απριλίου	Τετάρτη 11 Απριλίου
14	Τσάι Του Βουνού Δυτικής Μακεδονίας	248,97γρ.	0,957	Τετάρτη 11 Απριλίου	Παρασκευή 13 Απριλίου
15	Τσάι Του Βουνού Δυτικής Μακεδονίας	259,71γρ.	0,999	Παρασκευή 13 Απριλίου	Δευτέρα 16 Απριλίου
16	ΒΙΟ Καρότα Καλή Σκύδρας	232,69γρ.	0,895	Δευτέρα 16 Απριλίου	Τετάρτη 18 Απριλίου
17	ΒΙΟ Μπανάνα Άρβη Ηρακλείου	286,28γρ.	1,101	Τετάρτη 18 Απριλίου	Παρασκευή 20 Απριλίου
18	Μανιτάρια Μάνδρες Κιλκίς	259,73γρ.	0,998	Παρασκευή 20 Απριλίου	Δευτέρα 23 Απριλίου
19	Πατάτες Νευροκοπίου	260,92γρ.	1,002	Δευτέρα 23 Απριλίου	Τετάρτη 25 Απριλίου
20	Φιστίκια Αιγίνης	222,59γρ.	0,856	Τετάρτη 25 Απριλίου	Παρασκευή 27 Απριλίου
21	Καρύδια Γρεβενών	229,01γρ.	0,881	Παρασκευή 27 Απριλίου	Δευτέρα 30 Απριλίου
22	Αμύγδαλα Καβάλας	210,80γρ.	0,811	Δευτέρα 30 Απριλίου	Τετάρτη 2 Μαΐου
23	Αλεύρι Σερρών	240,34γρ.	0,924	Τετάρτη 2 Μαΐου	Παρασκευή 4 Μαΐου
24	Φλούδα μπανάνας	261,11γρ.	1,004	Παρασκευή 4 Μαΐου	Δευτέρα 7 Μαΐου

Πίνακας 4α: Αναλυτικός πίνακας με τα στοιχεία των δειγμάτων.

A/A	Τρόφιμο	Επεξεργασία	Περιοχή παραγωγής/προέλευσης
1	Αγελαδινό γιαούρτι Αμερικανικής Γεωργικής Σχολής 3.9%	Ήπια ανάδευση	Δυτική Θεσσαλονίκη
2	Αγελαδινό Γιαούρτι Φάρμα Κουκάκη 3.85%	Ήπια ανάδευση	Κάτω Απόστολοι Ν. Κιλκίς
3	Αγελαδινό γάλα 8 γυναίκες 3.7-4%	Ήπια ανάδευση	Παλιό Γυναικόκαστρο Ν. Κιλκίς
4	Αγελαδινό γάλα πλήρες Οικολογικό Αγρόκτημα Λιβαδερού	Ήπια ανάδευση	Λιβαδερό Κοζάνης
5	Τυρί φέτα ΠΟΠ Θεσσαλίας Υφαντής	Θρυμματισμός σε μπλέντερ	Δήμος Φαρκαδόνας Ν. Τρικάλων Θεσσαλία
6	Τυρί φέτα ΠΟΠ Ηπείρου Κάραλης	Θρυμματισμός σε μπλέντερ	Ήπειρος
7	ΒΙΟ Κατσικίσιο γάλα Μενοίκιο	Ήπια ανάδευση	Προσοτσάνη Δράμα
8	Κατσικίσιο γάλα Τέμπη	Ήπια ανάδευση	Πρόποδες Κισσάβου Θεσσαλία
9	Κασέρι ΠΟΠ Προίκα από Αιγοπρόβειο γάλα	Τρίψιμο σε τρίφτη	Σοχό Θεσσαλονίκης
10	Γραβιέρα ΠΟΠ ΕΑΣ Νάξου	Τρίψιμο σε τρίφτη	Νάξος Κυκλάδες
11	ΒΙΟ Ζοχοί Τρίγλια Χαλκιδικής	Θρυμματισμός σε μπλέντερ	Τρίγλια Χαλκιδικής
12	ΒΙΟ Ζοχοί Τρίγλια Χαλκιδικής	Θρυμματισμός σε μπλέντερ	Τρίγλια Χαλκιδικής
13	ΒΙΟ Ζοχοί Τρίγλια Χαλκιδικής	Θρυμματισμός σε μπλέντερ	Τρίγλια Χαλκιδικής
14	Τσάι Του Βουνού Δυτικής Μακεδονίας	Εκχύλισμα τσαγιού 2,6γρ. σε 260ml	Δυτικής Μακεδονίας
15	Τσάι Του Βουνού Δυτικής Μακεδονίας	Εκχύλισμα τσαγιού 60γρ. σε 260ml.	Δυτικής Μακεδονίας
16	ΒΙΟ Καρότα Καλή Σκύδρας	Τρίψιμο σε τρίφτη	Καλή Σκύδρας
17	ΒΙΟ Μπανάνα Άρβη Ηρακλείου	Κονιορτοποίηση σε μπλέντερ	Άρβη Ηρακλείου
18	Μανιτάρια Μάνδρες Κιλκίς	Κονιορτοποίηση σε μπλέντερ	Μάνδρες Κιλκίς
19	Πατάτες Νευροκοπίου	Τρίψιμο σε τρίφτη	Νευροκόπι
20	Φιστίκια Αιγίνης	Άλεσμα σε μπλέντερ	Αίγινα
21	Καρύδια Γρεβενών	Άλεσμα σε μπλέντερ	Γρεβενών
22	Αμύγδαλα Καβάλας	Άλεσμα σε μπλέντερ	Καβάλας
23	Αλεύρι Σερρών	-	Σερρών
24	Φλούδα μπανάνας	Άλεσμα σε μπλέντερ	Κρήτης

Πίνακας 5β: Αναλυτικός πίνακας με τα στοιχεία των δειγμάτων.

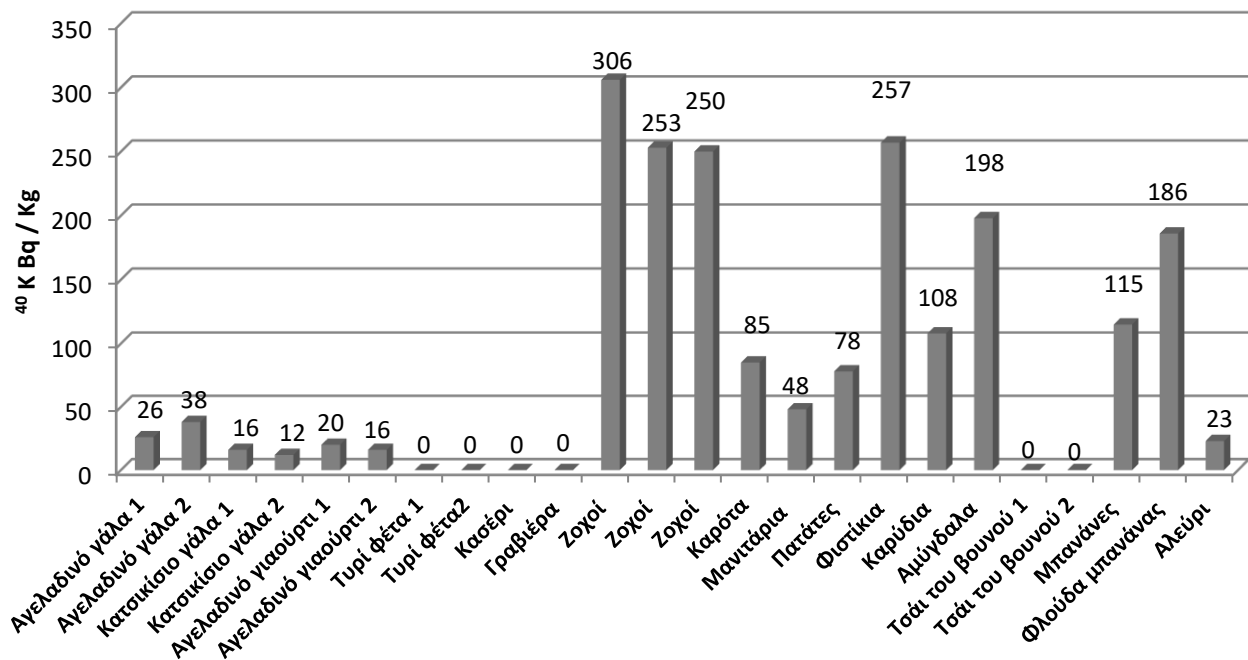
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ γ-ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ							
A/A	Υλικό	⁴⁰ K	²³² Th	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²¹⁴ Pb/ ²¹⁴ Bi	¹³⁷ Cs
(Bq kg ⁻¹)*							
1	Αγελαδινό γάλα 8 γυναίκες	26±1	BDL**	BDL	BDL	BDL	0,35±0,05
2	Αγελαδινό γάλα ΑΛ	38±1	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
3	Αγελαδινό Γιαούρτι ΑΓΣ	20±0,5	BDL	BDL	BDL	BDL	0,44±0,04
4	Αγελαδινό Γιαούρτι ΦΚ	16±0,4	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
5	Τυρί φέτα Θεσσαλίας	BDL	1±0.1	BDL	BDL	BDL	BDL
6	Τυρί φέτα Ηπείρου	BDL	1±0.1	BDL	BDL	BDL	0,48±0,07
7	ΒΙΟ Κατσικίσιο γάλα Μενοίκιο	16±0,4	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
8	Κατσικίσιο γάλα Τέμπη	12±0,3	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
9	Κασέρι Σοχού	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0,31±0,06
10	Γραβιέρα Νάξου	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
11	ΒΙΟ Ζοχοί Χ. (260ml)	306±6	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
12	ΒΙΟ Ζοχοί Χ. (100ml-1)	253±5	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
13	ΒΙΟ Ζοχοί χ.(100ml-2)	250±5	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
14	Τσάι του βουνού Δ.Μ. (60γρ.)	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
15	Τσάι του βουνού Δ.Μ. (2,6γρ.)	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
16	ΒΙΟ Καρότα Σκύδρας	85±2	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
17	Μπανάνες Κρήτης	115±3	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
18	Μανιτάρια Κιλκίς	48±1	BDL	12±1	BDL	BDL	BDL
19	Πατάτες Νευροκοπίου	78±2	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
20	Φιστίκια Αιγίνης	257±5	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
21	Καρύδια Γρεβενών	108±2	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
22	Αμύγδαλα Καβάλας	198±4	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
23	Αλεύρι Σερρών	23±1	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
24	Φλούδα μπανάνας	186±4	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
MDA***		4	0,1	1	0,8	0,2	0,2

* Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων γίνεται σε Bq/Kg φρέσκου τροφίμου(fresh mass)

**BDL:Below Detection Limit

*** MDA: Minimum Detectable Activity (Ελάχιστη Ανιχνεύσιμη Ενεργότητα)

Πίνακας 6: Αποτελέσματα μετρήσεων γ-φασματοσκοπίας.



Γράφημα 1: Ενεργότητα ⁴⁰K (Bq / Kg) για το σύνολο των τροφίμων.

Στον Πίνακα 5 απεικονίζονται οι ενεργότητες των ραδιονουκλιδίων που μετρήθηκαν για το κάθε τρόφιμο. Στη σειρά του θορίου, μόλις σε δύο δείγματα ήταν δυνατή η ανίχνευση μιας πολύ μικρής συγκέντρωσης της τάξεως του 1Bq/Kg για τα δύο δείγματα φέτας.

Στη σειρά του ουρανίου υπήρξε ανιχνεύσιμη συγκέντρωση μόνο στα μανιτάρια, 12 Bq/Kg. Ωστόσο στην περιοχή του φάσματος που λήφθηκε η μέτρηση ο ανιχνευτής παρουσιάζει μικρή απόδοση λόγω του μεγάλου αριθμού παρεμβολών και ως εκ τούτου η μέτρηση δεν θεωρείται πολύ αξιόπιστη. Για το ²²⁶Ra δεν ανιχνεύτηκε συγκέντρωση άνω του MDA (Minimum Detectable Activity). Το ίδιο ισχύει και για τα ²¹⁴Pb και ²¹⁴Bi.

Για το ⁴⁰K υπήρξαν ανιχνεύσιμες συγκεντρώσεις στα περισσότερα τρόφιμα. Οι ενεργότητες των τροφίμων σε ⁴⁰K απεικονίζονται στο Γράφημα 1. Οι μικρότερες ανιχνεύσιμες συγκεντρώσεις είναι αυτές των γαλακτοκομικών και πιο συγκεκριμένα αυτές του κατσικίσιου γάλακτος (12±0,3 και 16±0,4Bq/Kg για τα γάλατα “Τέμπη” και “Μενοίκιο” αντίστοιχα) έπειτα του γιαουρτιού, του αγελαδινού γάλακτος και των μανιταριών. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ανιχνεύτηκαν στους

ζοχούς, 306 ± 6 , 253 ± 5 και 250 ± 5 Bq/Kg για τα τρία δείγματα, στα φιστικά Αιγίνης 257 ± 5 Bq/Kg και στα αμύγδαλα 198 ± 4 Bq/Kg. Ακολουθούν η μπανάνα και η φλούδα μπανάνας, τα καρύδια και τα καρότα με τις πατάτες. Στα μόνα τρόφιμα που δεν ανιχνεύτηκε κάποια ποσότητα καλίου ήταν στα τρία είδη τυριών και στο τσάι.

Ενδιαφέρον προκαλεί η μη ανίχνευση ^{40}K στα τυριά, δηλαδή στη φέτα, στη γραβιέρα και στο κασέρι, ενώ στο γάλα και στο γιαούρτι υπήρξαν ανιχνεύσιμες συγκεντρώσεις. Κάνοντας μια σύγκριση με τα αποτελέσματα μιας Ιταλικής μελέτης για τον προσδιορισμό των ραδιονουκλιδίων στην Ιταλική διατροφή (Desideri, και συν. 2014), στο γάλα η μέση ενεργότητα ^{40}K είναι $70,5 \pm 34,6$ Bq/Kg και στο τυρί $92,9 \pm 31,8$ Bq/Kg. Παρότι τα δείγματα τυριών που επιλέχθηκαν στις δύο εργασίες είναι διαφορετικά (στην Ιταλική εργασία επιλέχθηκαν η μοτσαρέλα, η παρμεζάνα, η ρικότα, η φοντίνα και το γιαούρτι) τα αποτελέσματα δεν δικαιολογούν αυτή την διαφορά. Στην εργασία της Ιταλίας η μέση ενεργότητα των τυριών είναι κατά 20 Bq/Kg μεγαλύτερη από του γάλακτος ενώ η μέση ενεργότητα του γάλακτος της Ιταλίας είναι έως και 50 Bq/Kg μεγαλύτερη του γάλακτος που μετρήθηκε στην παρούσα εργασία.

Δεδομένου ότι κατά την παρασκευή του τυριού γίνεται διαχωρισμός του τυροπήγματος και του τυρόγαλου, και απόρριψη του δεύτερου (η διαδικασία αυτή είναι ίδια για όλα τα είδη τυριών), θεωρήθηκε ότι μια ποσότητα καλίου υπάρχει σε αυτό κατά την απομάκρυνσή του με αποτέλεσμα να λαμβάνουμε μετρήσεις μικρότερες από το γάλα. Τα αποτελέσματα όμως της Ιταλικής μελέτης μάλλον αποκλείουν αυτό το ενδεχόμενο. Μετά από αρκετή αναζήτηση στη βιβλιογραφία δεν ήταν δυνατή η ανεύρεση μιας πιθανής εξήγησης. Συνεπώς το παραπάνω φαινόμενο χρήζει περαιτέρω έρευνας.

Ένα ακόμα ενδιαφέρον στοιχείο είναι η συγκέντρωση ^{40}K στη μπανάνα. Η μπανάνα θεωρείται ως ένα από τα πιο ραδιενεργά φυσικά τρόφιμα. Είναι σύνηθες το φαινόμενο ανιχνευτές ραδιενέργειας που είναι εγκατεστημένοι στα σύνορα να ενεργοποιούνται σε μεγάλα φορτία μπανάνας. Γι' αυτό, αναμενόταν ανίχνευση μεγάλης συγκέντρωσης ^{40}K σε αυτή.

Η συγκέντρωση που ανιχνεύτηκε στην σάρκα της μπανάνας είναι 115 ± 3 Bq/Kg. Επειδή το αποτέλεσμα αυτό θεωρήθηκε αρκετά χαμηλό, πραγματοποιήθηκε μια μέτρηση σε φλούδα από μπανάνα. Το αποτέλεσμα της μέτρησης είναι 186 ± 4 Bq/Kg. Ο σκοπός αυτής της μέτρησης ήταν η επαλήθευση των ανωτέρω ισχυρισμών και έτσι τα αποτελέσματα θα εμφανίζονται ξεχωριστά για τα δύο δείγματα.

Τέλος πραγματοποιήθηκε μέτρηση και για ένα τεχνητό ραδιονουκλίδιο, το ^{137}Cs . Η μοναδική περίπτωση ανιχνεύσιμης ποσότητας υπήρξε σε ορισμένα από τα γαλακτοκομικά και σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις. Πιο συγκεκριμένα, υπήρξαν ανιχνεύσιμες συγκεντρώσεις σε ένα από τα τέσσερα δείγματα γάλακτος, σε ένα από τα δύο γιαούρτια, στο κασέρι και σε ένα από τα δύο τυριά φέτα. Οι συγκεντρώσεις που ανιχνεύτηκαν στο γάλα σε μελέτη που διεξήχθη στη Νέο Ζηλανδία ήταν κάτω του MDA (0,08 και 0,07 Bq/Kg). Ωστόσο, οι πολύ μικρές συγκεντρώσεις που ανιχνεύτηκαν στα δείγματα της παρούσας εργασίας δεν είναι ικανές να καταδείξουν μια σαφή διαφορά μεταξύ των δύο.

Μέχρι στιγμής ο Codex Alimentarius δεν έχει θεσπίσει ανώτατα όρια για τα φυσικά ραδιονουκλίδια. Ωστόσο, για το ^{137}Cs οι κατευθυντήριες γραμμές του C.A. που ισχύουν σε έκτακτες καταστάσεις για τα τρόφιμα είναι 1000 Bq/Kg ενώ σύμφωνα με τον Κανονισμό 737/90 της ΕΟΚ του 1990 το ανώτατο όριο για γαλακτοκομικά και γάλα που εισάγεται από τρίτες χώρες είναι 370 Bq/Kg. (European Council Regulation No 737/90. n.d.) (Codex Alimentarius Standard n.d.)

4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία

Στους παρακάτω πίνακες δίνονται αποτελέσματα άλλων εργασιών, για τα τρόφιμα ή τις ομάδες τροφίμων που είναι κοινά ή έχουν άμεση σχέση με όσα επιλέχθηκαν στην παρούσα εργασία και πραγματοποιείται σύγκριση των αντίστοιχων τιμών.

Στον **Πίνακα 6** φαίνονται τα αποτελέσματα από τη μελέτη της Νέας Ζηλανδίας για το ^{137}Cs . Οι ποσότητες που ανιχνεύτηκαν είναι κάτω του MDC. Τα αποτελέσματά τους δεν διαφέρουν πολύ από της παρούσας εργασίας η οποία έδειξε ότι στα περισσότερα τρόφιμα δεν υπήρξε ανιχνεύσιμη συγκέντρωση ^{137}Cs . Η βασική διαφορά αφορά τα γαλακτοκομικά στα οποία υπήρξαν μεν ανιχνεύσιμες συγκεντρώσεις ελάχιστα όμως άνω του ορίου ανίχνευσής τους (0,2 Bq/Kg).

Πίνακας 8

Αποτελέσματα μελέτης Νέας Ζηλανδίας ¹³⁷ Cs σε Bq/Kg			
A/A	Τρόφιμα	MDC*	¹³⁷ Cs
1	Μπανάνα	<0,15	0,09
2	Γάλα	<0,15	0,08
3	Γάλα	<0,13	0,07
4	Φιστίκια	<0,26	0,15
5	Τσάι	<0,36	0,27
6	Πατάτα	<0,14	0,07

*Minimum Detectable Concentration (MDC)

Η συγκέντρωση ²³⁸U που ανιχνεύτηκε στην παρούσα εργασία για τα περισσότερα τρόφιμα είναι κάτω του MDA εκτός από τα μανιτάρια στα οποία ανιχνεύτηκαν 12 Bq/Kg. Ωστόσο, όπως αναφέρεται και πιο πάνω το αποτέλεσμα αυτό δεν θεωρείται πολύ αξιόπιστο. Η συγκέντρωση που ανιχνεύτηκε στη μελέτη της Νέας Ζηλανδίας (Πίνακας 7) για το ίδιο τρόφιμο είναι 0,004 Bq/Kg .

Πίνακας 9

Αποτελέσματα μελέτης Ιταλίας (μέση ενεργότητα ⁴⁰ K και ²²⁶ Ra σε Bq/Kg)			
A/A	Τρόφιμα	²²⁶ Ra	⁴⁰ K
1	Λαχανικά	1,3	112,9
2	Λαχανικά	1,7	157,7
3	Φρούτα	1,3	91,9
4	Γάλα	1,1	70,5
5	Τυρί	2,6	92,9
6	Αλεύρι	4,2	156,6

Πίνακας 7

Αποτελέσματα μελέτης Νέας Ζηλανδίας ²³⁸ U σε Bq/Kg		
A/A	Τρόφιμα	²³⁸ U
1	Μπανάνα	0,004
2	Αλεύρι	<0,002
3	Γάλα	0,001
4	Μανιτάρια	0,004
5	Πατάτα	<0,005
6	Τσάι	<0,002

Τα τρόφιμα που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις για κάθε ομάδα τροφίμων της Ιταλικής μελέτης (Πίνακας 8) δεν είναι όλα ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Ωστόσο, η ύπαρξη ομοειδών τροφίμων δίνει τη δυνατότητα συγκρίσεων.

Έτσι, όσον αφορά το ²²⁶Ra, στην παρούσα εργασία δεν ανιχνεύτηκε σε κανένα τρόφιμο, εν αντιθέσει με την Ιταλική μελέτη όπου ανιχνεύτηκαν μικρές συγκεντρώσεις σε όλα τα τρόφιμα.

Το ^{40}K που ανιχνεύτηκε στα τρόφιμα της εργασίας αυτής είναι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις σύγκρισης με τα αποτελέσματα της Ιταλική μελέτη σε μικρότερες συγκεντρώσεις. Εξάιρεση αποτελεί το δείγμα ζοχών όπου ανιχνεύτηκε 40% μεγαλύτερη συγκέντρωση από τον μέσο όρο των λαχανικών της Ιταλίας.

Πίνακας 10

Συγκεντρώσεις ραδιονουκλιδίων σε τρόφιμα της Τουρκίας.				
A/A	Τρόφιμο	^{226}Ra	^{238}U	^{40}K
1	Αλεύρι	1,15	0,21	51,2±20
2	Γάλα	N.D.	N.D.	42,04±5
3	Καρότα	N.D.	N.D.	43,3±6
4	Πατάτα	0,94	N.D.	61,3±12,4

Τα αποτελέσματα μιας ακόμα μελέτης που έλαβε χώρα στην Τουρκία (Kam, και συν. 2016) απεικονίζονται στον Πίνακα 9. Για τα 4 τρόφιμα του Πίνακα 9 οι μετρήσεις που λάβαμε για το ^{226}Ra και το ^{238}U ήταν κάτω του MDA. Ωστόσο, στην μελέτη της Τουρκίας ανιχνεύτηκαν ελάχιστες ποσότητες ^{226}Ra στο αλεύρι και την πατάτα αλλά και ^{238}U στο αλεύρι.

Για το ^{40}K οι συγκεντρώσεις που ανιχνεύτηκαν στην παρούσα εργασία στο γάλα και στο αλεύρι είναι μικρότερες κατά 25% και 65% από τις αντίστοιχες τιμές στη μελέτη της Τουρκίας, ενώ για τα καρότα και τις πατάτες βρέθηκαν μεγαλύτερες κατά 50% και 22% αντίστοιχα.

Μολονότι, όσον αφορά τις συγκεντρώσεις του ^{40}K στα τέσσερα παραπάνω τρόφιμα, οι διαφορές των δύο εργασιών είναι μεγάλες σε ποσοστιαίες μονάδες, δεν ισχύει το ίδιο σε απόλυτους αριθμούς διότι οι συγκεντρώσεις που ανιχνεύτηκαν και στις δύο εργασίες είναι χαμηλές.

4.3 Υπολογισμός ετήσιας ενεργότητας και ετήσιας ισοδύναμης δόσης

Ο υπολογισμό της ισοδύναμης δόσης (Sv) που λαμβάνει ένας μέσος ενήλικας στην Ελλάδα από το σύνολο των τροφίμων που καταναλώνει ετησίως, απαιτεί στοιχεία σχετικά με την ενεργότητα των τροφίμων από έναν αρκετά μεγάλο αριθμό δειγμάτων όλων των ομάδων τροφίμων, καθώς και πληροφορίες σχετικά με την κατά κεφαλήν κατανάλωση. Ωστόσο, μετά από αρκετή βιβλιογραφική έρευνα δεν κατέστη δυνατή η συγκέντρωση των απαραίτητων στοιχείων για τον σκοπό αυτό.

Πίνακας 11

Τρόφιμο	Μερίδα σε gr.	Αριθμός μερίδων ανά εβδομάδα
Πατάτα	80	3
Γάλα	250	14
Γιαούρτι	200	14
Καρύδια	15	14
Αμύγδαλα	25	14
Φιστίκια	12	14
Μπανάνα	114	7
Ζοχοί	190	1
Καρότα	50	3
Μανιτάρια	100	1
Αλεύρι	60	14

Αντ' αυτής, υπολογίστηκαν οι ενεργότητες (Bq) καθώς και οι αντίστοιχες ισοδύναμες δόσεις (Sv) ^{40}K που θα λάβει ένας μέσος ενήλικας ετησίως καταναλώνοντας τα τρόφιμα που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία, με βάση τα πρότυπα της μεσογειακής διατροφής.

Για τους υπολογισμούς αυτούς χρησιμοποιήθηκε η πυραμίδα της μεσογειακής διατροφής του Οργανισμού Μεσογειακής Διατροφής η οποία απεικονίζεται στην **Εικόνα 9** (The mediterranean diet n.d.). Η πυραμίδα αυτή ακολουθεί τα προηγούμενα πρότυπα της μεσογειακής διατροφής και έχει εξελιχθεί ώστε να μπορεί να υιοθετηθεί από τον νέο τρόπο ζωής. Με βάση τις συνιστώμενες μερίδες υπολογίστηκαν οι ποσότητες τροφίμων που καταναλώνονται από τον μέσο ενήλικα (**Πίνακας 11**). Οι μερίδες που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον **Πίνακα 10**. (Κατσαρόλη n.d.)

Πίνακας 12: Ετήσια κατανάλωση τροφίμων και οι αντίστοιχες ετήσιες προσλαμβανόμενες ενεργότητες.

Τρόφιμο	Ετήσια κατανάλωση σε Kg.	Ετήσια προσλαμβανόμενη ενεργότητα ^{40}K σε Bq.	Ετήσια προσλαμβανόμενη ενεργότητα ^{137}Cs σε Bq.
Πατάτα	12,5	975	-
Γάλα αγελαδινό	182	5824	63,7
Γάλα κατσικίσιο	182	2548	-
Γιαούρτι	145,6	2621	64
Καρύδια	10,9	1962	-
Αμύγδαλα	18,2	3603	-
Φιστίκια	8,7	2236	-
Μπανάνα	41,5	4772	-
Ζοχοί	4,6	1157	-
Καρότο	7,8	663	-
Μανιτάρια	5,2	250	-
Αλεύρι	43,7	1005	-

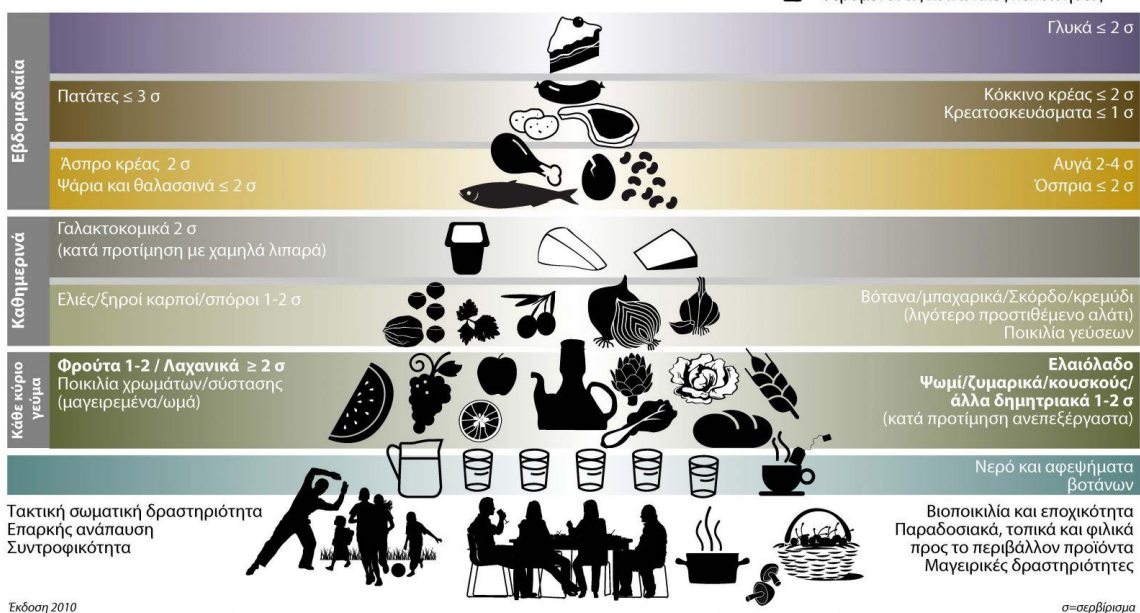
Η μέση ετήσια ενεργότητα ^{40}K που θα προσλάβει ένας μέσος ενήλικας από την κατανάλωση δύο μερίδων γαλακτοκομικών ημερησίως είναι 3.664 Bq/έτος. Στη μελέτη της Ιταλίας η ετήσια πρόσληψη καλίου για τα γαλακτοκομικά για τους ενήλικες είναι 9.757 Bq/έτος.

Για τα λαχανικά στην μελέτη της Ιταλίας η μέση ετήσια ενεργότητα είναι 9.803 Βq/έτος. Η μέση ετήσια πρόσληψη από τα 4 λαχανικά που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι 761 Βq/έτος. Ακόμα η μέση ετήσια ενεργότητα για τους ξηρούς καρπούς είναι 2600 Βq/έτος. Δεν υπάρχουν συγκρίσιμα αποτελέσματα για τους ξηρούς καρπούς από άλλες μελέτες.

Οι διαφορές των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας από της Ιταλικής μελέτης είναι φανερές. Ωστόσο, η σύγκριση μεταξύ των γαλακτοκομικών των δύο εργασιών είναι στατιστικά ακριβέστερη σε σχέση με τα υπόλοιπα τρόφιμα λόγω του μεγάλου αριθμού δειγμάτων γαλακτοκομικών που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Μεσογειακή διατροφή: ένας τρόπος ζωής για το σήμερα
 Διατροφικές οδηγίες για ενήλικες

Σερβίρισμα (σ): μικρότερο της τυπικής μερίδας εστιατορίου, ποικίλει ανά τρόφιμο
 Κατανάλωση κρασιού με μέτρο, σεβόμενοι τις κοινωνικές πεποιθήσεις



Εικόνα 9: Πυραμίδα μεσογειακής διατροφής "Οργανισμού Μεσογειακής Διατροφής"

Στον Πίνακα 12 δίνονται οι ετήσιες ισοδύναμες δόσεις για κάθε τρόφιμο καθώς και η μέση ετήσια ισοδύναμη δόση για τα γαλακτοκομικά και τα λαχανικά. Η ισοδύναμη δόση ανά μονάδα ενεργότητας του ⁴⁰K που χρησιμοποιήθηκε για την μετατροπή της ενεργότητας σε ισοδύναμη δόση, είναι αυτή που προτείνει η UNSCEAR 2000 για την κατάποση φυσικών ραδιονουκλιδίων από ενήλικες η οποία είναι 6,2 nSv/Bq. (UNSCEAR, Sources and effects of ionizing radiation 2000)

Τρόφιμα	μSv/έτος
Γαλακτοκομικά	22.7
Γάλα αγελαδινό	30.1
Γάλα κατσικίσιο	15.8
Γιαούρτι	16.3
Ξηροί καρποί	16.1
Καρύδια	12.2
Αμύγδαλα	22.3
Φιστίκια	13.9
Λαχανικά	4.7
Πατάτα	6
Ζοχοί	7.2
Καρότο	4.1
Μανιτάρια	1.6
Μπανάνα	29.6
Αλεύρι	6.2
	93,5
Σύνολο	μSv/έτος (0,09 mSv/έτος)

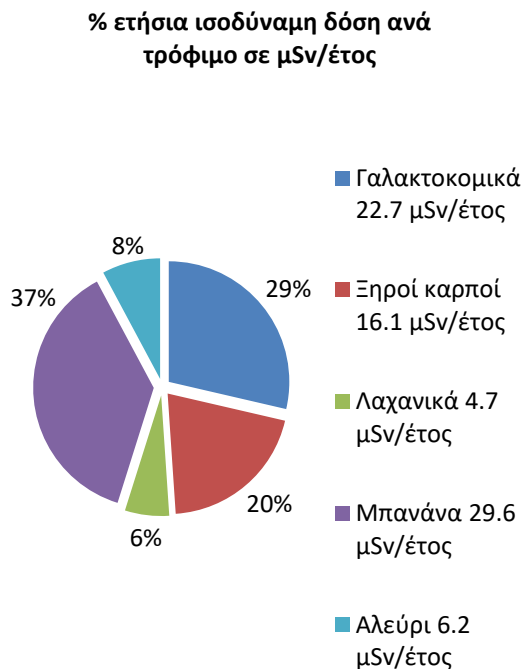
Πίνακας 13: Ετήσια ισοδύναμη δόση αν τρόφιμο και ανά ομάδα τροφίμου.

Η συνολική ετήσια ισοδύναμη δόση από ^{40}K που δέχεται ο μέσος ενήλικας από την κατανάλωση των τροφίμων του **Πίνακα 12** ακολουθώντας τις συστάσεις για τη μεσογειακή διατροφή είναι 0,09 mSv/έτος. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκαν οι μέσοι όροι των δόσεων του συνόλου των γαλακτοκομικών και των ξηρών καρπών. Οι μέσοι όροι που προέκυψαν αθροίστηκαν με τις δόσεις των υπολοίπων τροφίμων.

Φυσικά, η προκύπτουσα δόση, αποτελεί προσέγγιση ενός ποσοστού της δόσης που θα δεχθεί ο μέσος ενήλικας από το σύνολο της Μεσογειακής Διατροφής. Ακόμα η δόση που υπολογίστηκε δεν είναι κατ' ανάγκην η δόση που θα δεχθεί καταναλώνοντας τα συγκεκριμένα τρόφιμα. Αυτή, εξαρτάται από την περιοχή προέλευσης των τροφίμων, από τις προσωπικές προτιμήσεις, από τη σύνθεση του διαιτολογίου του ατόμου καθώς και από τις ποσότητες τροφίμων που θα καταναλώσει. Για να ληφθεί μια πιο αντιπροσωπευτική τιμή για το σύνολο της μεσογειακής διατροφής απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός δειγμάτων από κάθε ομάδα τροφίμων.

Κάνοντας ακόμα μια σύγκριση των τροφίμων μεταξύ τους, προκύπτει ότι τη μεγαλύτερη συνεισφορά στη συνολική ετήσια δόση την έχουν το αγελαδινό γάλα και ακολουθούν οι μπανάνες ενώ τη μικρότερη συνεισφορά έχουν τα μανιτάρια, τα καρότα, η πατάτα, το αλεύρι και οι ζοχοί.

Γράφημα 2



Στο **Γράφημα 2** απεικονίζονται οι % ισοδύναμες δόσεις σε $\mu\text{Sv}/\text{έτος}$ για τις τρεις ομάδες τροφίμων καθώς και για τη μπανάνα και το αλεύρι. Τη μεγαλύτερη συνεισφορά την έχουν οι μπανάνες ενώ τη μικρότερη τα λαχανικά και το αλεύρι. Τα γαλακτοκομικά έρχονται δεύτερα ενώ οι ξηροί καρποί τρίτοι.

Η ετήσια ισοδύναμη δόση λόγω κατάποσης ραδιονουκλιδίων, όπως αυτή υπολογίστηκε από την UNSCEAR 2000 για έναν μέσο ενήλικα, είναι $0,3 \text{ mSv}/\text{έτος}$ και με εύρος τιμών από $0,2-0,8 \text{ mSv}/\text{έτος}$. Η τιμή αυτή απέχει από την δόση των $0,09 \text{ mSv}/\text{έτος}$ που υπολογίστηκε στην παρούσα εργασία.

Ωστόσο, η δόση αυτή αποτελεί ένα κλάσμα

της δόσης που θα δεχθεί ο μέσος ενήλικας στην Ελλάδα διότι τα τρόφιμα που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό της αποτελούν ένα μέρος μόνο των τροφίμων που καταναλώνονται συνολικά στη Μεσογειακή Διατροφή. Συνεπώς, δεν μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι είναι μικρότερη της μέσης παγκόσμιας δόσης. Απαιτείται επιπλέον έρευνα στον τομέα αυτό, με περισσότερες μετρήσεις σε τρόφιμα, προκειμένου να εξαχθούν ακριβέστερα συμπεράσματα.

Τέλος, δεν έγινε υπολογισμός των δόσεων για τα υπόλοιπα ραδιονουκλίδια, διότι οι συγκεντρώσεις που ανιχνεύτηκαν ήταν πολύ μικρές.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν 24 μετρήσεις γ-φασματοσκοπίας σε 21 τρόφιμα φυτικής προέλευσης και γαλακτοκομικά της εγχώριας αγοράς, για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης της ενεργότητας φυσικών αλλά και τεχνητών ραδιονουκλιδίων. Για τις δύο φυσικές ραδιενεργές σειρές ^{238}U και ^{232}Th , για τα περισσότερα τρόφιμα δεν ανιχνεύτηκαν συγκεντρώσεις άνω του MDA ενώ σε όσα υπήρξαν ανιχνεύσιμες συγκεντρώσεις ήταν λίγο πάνω από το όριο ανίχνευσης. Το ίδιο ισχύει και για το ανθρωπογενές ραδιονουκλίδιο ^{137}Cs , το οποίο ανιχνεύτηκε σε μόλις 4 τρόφιμα και σε πολύ χαμηλή συγκέντρωση.

Το πιο διαδεδομένο ήταν το ^{40}K του οποίου ανιχνεύσιμες ποσότητες ανευρέθησαν σχεδόν σε όλα τα τρόφιμα, επιβεβαιώνοντας το πόσο ευρέως διαδεδομένο είναι στη φύση. Οι μικρότερες συγκεντρώσεις ανιχνεύτηκαν στα γαλακτοκομικά ενώ οι μεγαλύτερες στους ζοχούς, στα φιστίκια και στα αμύγδαλα. Στο τσάι και στα τρία είδη τυριών δεν ανιχνεύτηκε κάποια ποσότητα καλίου.

Ένα ενδιαφέρον στοιχείο είναι η αδυναμία ανίχνευσής ^{40}K στα τυριά. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της παρούσας εργασίας δεν επιβεβαιώνονται από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία όπου υπήρχαν ανιχνεύσιμες ποσότητες και σε κάποιες περιπτώσεις σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από το γάλα. Το φαινόμενο αυτό χρήζει περαιτέρω έρευνας.

Οι συγκεντρώσεις των ραδιονουκλιδίων που ανιχνεύτηκαν στο σύνολο των τροφίμων της παρούσας εργασίας στις περισσότερες περιπτώσεις ήταν ίσες ή μικρότερες από εκείνες άλλων χωρών ενώ σε λίγες περιπτώσεις ήταν μεγαλύτερες.

Υπολογίστηκαν οι ισοδύναμες δόσεις για το σύνολο των τροφίμων και η συνολική δόση που θα λάβει ο μέσος ενήλικας καταναλώνοντας τα τρόφιμα που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία ακολουθώντας τις οδηγίες της μεσογειακής διατροφής. Η δόση αυτή υπολογίστηκε σε 0,09 mSv/έτος και αποτελεί μέρος της ετήσιας δόσης που θα λάβει ο μέσος ενήλικας. Η δόση αυτή είναι πολύ χαμηλότερη από τη μέση παγκόσμια δόση των 0,3 mSv/έτος, ωστόσο λόγω του μικρού αριθμού τροφίμων που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία δεν μπορεί να γίνει σύγκριση με τη μέση παγκόσμια δόση. Για να καταστεί αυτό εφικτό απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός δειγμάτων.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων διαφορετικών χωρών παρέχουν μια αναφορά για τον καθορισμό του τρέχοντος διατροφικού ακτινολογικού προφίλ της Ελλάδας καθώς και των δόσεων που δέχεται ο μέσος Έλληνας από την διατροφή του. Φυσικά για να γίνει κάτι τέτοιο απαιτείται η γνώση των διατροφικών συνηθειών των Ελλήνων και ο έλεγχος των συγκεντρώσεων των ραδιονουκλιδίων που υπάρχουν σε αυτά. Για να γίνει ένας ακόμα πιο αντιπροσωπευτικός υπολογισμός θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ποσοστά των εισαγόμενων τροφίμων που καταναλώνονται καθώς και η προέλευσή τους. Οι δόσεις που θα προκύψουν δεν θα είναι απαραίτητα οι δόσεις που θα προσλαμβάνει κάθε άτομο αλλά θα αφορούν το σύνολο του πληθυσμού.

Η μέτρηση ενός μόνο δείγματος από κάθε τρόφιμο ενέχει τον κίνδυνο λήψης μη αντιπροσωπευτικών τιμών. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου συνίσταται η επιλογή μεγάλων αριθμών δειγμάτων από το ίδιο τρόφιμο και η λήψη του μέσου όρου αυτών. Έτσι δημιουργείται μια βάση δεδομένων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό των ετησίων ισοδύναμων δόσεων με σχετικά μικρή πιθανότητα σφάλματος.

Βιβλιογραφία

1. Abojassim, Ali Abid, Heiyam Najy Hady, και Zahrah Baqer Mohammed. «Natural radioactivity levels in some vegetables and fruits commonly used in Najaf Governorate, Iraq.» 2016.
2. AĞUŞ, Yusuf. «Radioactivity concentrations of the milk and dairy products.» 2017.
3. Codex Alimentarius Standard. *CODEX GENERAL STANDARD FOR CONTAMINANTS AND TOXINS IN FOOD AND FEED*. FAO.
4. Desideri, Donatella, Maria Assunta Meli, Carla Roselli, Nevio Forini, Alba Rongoni, και Laura Feduzi. «Natural radionuclides in Italian diet and their annual intake.» 2014.
5. «European Council Regulation No 737/90.»
6. Gilmore, Gordon R. *Practical Gamma-ray Spectrometry*. 2nd Edition. John Wiley & Sons, Ltd., 2008.
7. Kam, E., G. Karahan, H. Aslyuksek, και A. Bozkurt. «Natural Radioactivity in Foods Consumed in Turkey.» *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Nutrition and Food Engineering*, 2016.
8. Knoll, Glenn F. *Radiation Detection and Measurement*.
9. *Measurement of Radionuclids in Food and the Environment, A Guidebook*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1989.
10. Pearson, Andrew J., Sally Gaw, Nikolaus Hermanspahn, και Chris N. Glover. «Natural and anthropogenic radionuclide activity concentrations in the New Zealand diet.» *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016: 601-608.
11. *The mediterranean diet*.
http://mediterradiet.org/nutrition/mediterranean_diet_pyramid.

12. UNSCEAR. *BIOLOGICAL MECHANISMS OF RADIATION ACTIONS AT LOW DOSES*. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2012.
13. UNSCEAR. *Sources and effects of ionizing radiation*. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000.
14. VKM, Alexander J et. al. *Report from the Norwegian Scientific Committee for Food Safety*. Norwegian Scientific Committee for Food Safety (VKM), 2017.
15. Αντωνόπουλος, Ντομης. *Πυρηνική τεχνολογία: εισαγωγή στις εφαρμογές*.
16. Ζέικος, Χρήστος. «Βαθμονόμηση ανιχνευτικής διάταξης γ-φασματοσκοπίας.»
17. Κατσαρόλη, Ιωαννα. *Μερίδες: το μέγεθος μετράει* . medNutrition publications.
18. Νικολόπουλος, Δημήτριος, Σοφία Κόττου, και Παναγιώτης Γιαννακόπουλος. *Ακτινοβολία περιβάλλοντος και άνθρωπος*. Σ.Ε.Α.Β., 2015.