



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ**

ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΛΕΣΒΟ ΜΕ
ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΓΑΜΜΑ**

ΑΥΓΕΡΙΝΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ – ΚΑΠΗΛΑΡΗΣ ΕΚΤΟΡΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΜΑΤΣΟΥΚΑΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΜΥΤΙΛΗΝΗ, 2022

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κ. Χρήστο Ματσούκα, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Αιγαίου, για την επίβλεψη και την υπομονή του όσον αφορά στην ολοκλήρωση και τη συγγραφή της πτυχιακής μας εργασίας.

Παράλληλα, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους συνεργάτες του Εργαστηρίου Ποιότητας Υδάτων και Αέρα του Τμήματος Περιβάλλοντος, Φιλοθέη Παππά, Γιώργο Πουλή και φυσικά τον κ. Γιώργο Κουμπούρα, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση τους όλον αυτόν τον καιρό.

Θερμές ευχαριστίες θα θέλαμε να απευθύνουμε και στα μέλη του Εργαστηρίου Εδαφολογίας, κ. Νίκη Γεωργή, κ. Εριφύλη Ζαφειρίου και στον φίλο μας, Χρήστο Ξαγοράρη, για την παροχή εξοπλισμού και συμβουλών κατά τη διάρκεια επεξεργασίας των δειγμάτων μας. Για τον ίδιο ακριβώς λόγο θα θέλαμε να απευθύνουμε ευχαριστίες και στην κ. Μαρία Αλούπη, για την εκπαίδευση και πρόσβαση στον εξοπλισμό του Εργαστηρίου Ποιότητας Υδάτων και Αέρα.

Κλείνοντας, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ολόψυχα τις οικογένειες μας, για όλη την στήριξη τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μας.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	6
1. Εισαγωγή.....	7
1.1 Γενικά	7
1.2 Ιστορία.....	7
1.3 Ραδιενεργές διασπάσεις.....	8
1.3.1 Διάσπαση άλφα	10
1.3.2 Διάσπαση βήτα.....	10
1.3.3 Αποδιέγερση γάμμα	12
1.4 Ενεργότητες και ημιζωές	12
1.5 Φυσική Ραδιενέργεια	13
1.5.1 Κοσμική ακτινοβολία	13
1.5.2 Ραδιενέργεια περιβάλλοντος.....	14
1.5.3 Εσωτερική ραδιενέργεια.....	16
1.6 Τεχνητή Ραδιενέργεια	17
1.6.1 Το ατύχημα του Τσερνόμπιλ.....	18
1.7 Τεχνικώς επαυξημένη φυσική ραδιενέργεια (TENORM).....	20
1.8 Ραδιοπροστασία	20
1.8.1 Ραδιενεργές δόσεις.....	21
1.8.2 Αρχές της ραδιοπροστασίας.....	24
1.9 Ραδιοοικολογία	24
1.10 Ραδιοχρονολόγηση.....	26
1.11 Φασματοσκοπία γάμμα	27
1.11.1 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας – ύλης.....	28
1.12 Ανιχνευτικά συστήματα και διατάξεις	33
1.12.1 Ανιχνευτής κρυστάλλου υπερκαθαρού γερμανίου (High purity Germanium – HPGe)	33
1.12.2 Ανιχνευτές σπινθηρισμού.....	36
2. Μεθοδολογία	37
2.1 Περιοχή μελέτης	37
2.2 Μεθοδολογία πεδίου	40
2.3 Μεθοδολογία εργαστηρίου	42
2.4 Ανάλυση.....	46
3. Αποτελέσματα	49

3.1 Ανάλυση δειγμάτων και υπολογισμός ενεργότητας και δόσεων	49
3.1.1 Μετρήσεις δειγμάτων χόματος	50
3.1.2 Μετρήσεις δειγμάτων ιζήματος.....	56
4. Σχολιασμός επί των αποτελεσμάτων - Συζήτηση	61
5. Συμπεράσματα	63
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	64
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	68
Α.1 Διαδραστικός χάρτης σημείων δειγματοληψίας	68
Α.2 Πίνακες δόσεων.....	68
Α.3 Διαγράμματα συγκεντρώσεων ενεργότητας ραδιοϊσοτόπων Ανατολικής – Δυτικής Λέσβου	70

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, είναι πλέον γνωστό πως η ραδιενεργός ακτινοβολία, τόσο φυσικής όσο και ανθρωπογενούς προελεύσεως, υπάρχει/εισέρχεται στο γήινο οικοσύστημα, επηρεάζοντας άμεσα ή έμμεσα κάθε μορφής έμβιους οργανισμούς και ειδικά τον ίδιο τον άνθρωπο. Ωστόσο, μέσω μελέτης των υπαρχόντων ραδιενεργών ισοτόπων αλλά και της δημιουργίας νέων, τεχνητών ραδιοϊσοτόπων, ο άνθρωπος κατάφερε να φέρει μια επανάσταση σε τομείς όπως η ιατρική και η βιομηχανία αλλά και στο σύνολο της Επιστήμης γενικότερα. Όμως οι φυσικές διεργασίες και οι ανθρώπινες δραστηριότητες που σχετίζονται με την ραδιενέργεια αφήνουν κατάλοιπα. Τα κατάλοιπα αυτά συνεχίζουν να υπάρχουν στο φυσικό περιβάλλον, ανάλογα με τις γεωλογικές και κλιματολογικές συνθήκες της κάθε περιοχής. Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε η συλλογή 20 δειγμάτων χώματος και 10 δειγμάτων ιζήματος προκειμένου να προσδιοριστεί το ραδιενεργό υπόβαθρο της Λέσβου. Οι μετρήσεις ραδιενεργού δόσης πραγματοποιήθηκαν με φορητό ανιχνευτή σπινθηρισμού με κρύσταλλο NaI και έπειτα πραγματοποιήθηκε ανάλυση των δειγμάτων με γάμμα φασματοσκοπία μέσω ανιχνευτή ημιαγωγού με κρύσταλλο υπερκαθαρού γερμανίου. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν τις συγκεντρώσεις των φυσικών ραδιοϊσοτόπων ^{234}Th , ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K αλλά και του τεχνητού ισοτόπου ^{137}Cs . Επίσης παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ του μετρούμενου ρυθμού απορροφούμενης δόσης που μετρήθηκε μέσω του φορητού ανιχνευτή και του εκτιμώμενου ρυθμού απορροφούμενης δόσης που υπολογίστηκε από τις συγκεντρώσεις ενεργότητας (ανιχνευτής γερμανίου) ενώ στο τέλος συγκρίνονται τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας με ευρήματα παλαιότερης μελέτης που διεξήχθη στη δυτική πλευρά του νησιού.

ABSTRACT

During the last decades, it is known that radioactivity, both natural and manmade, is directly or indirectly released into the Earth's ecosystem, affecting all forms of life and especially humans themselves. However, through the study of radioactive isotopes and the production of new artificial ones, man has managed to revolutionize scientific fields such as medicine, industry and Science in general. But natural processes and human activities related to radioactivity leave waste (residues). Some of these residues continue to exist in the natural environment, depending on the geological and climate conditions of every place. In this dissertation we collected 20 soil samples and 10 sediment samples in order to determine the radioactive background of Lesvos Island. Measurements in dose rate took place in-situ using a portable NaI scintillation detector and then gamma spectroscopy analysis was performed in soil and beach sand samples using a high purity germanium detector. The results include the concentrations of natural radioactive isotopes of ^{234}Th , ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K as well as the artificial isotope ^{137}Cs . Also, the comparison between the measured dose rate measured by the portable detector and the estimated dose rate determined via the activity concentrations (germanium detector) is presented in this work, followed by a comparison with the findings of an earlier study conducted on the western side of the island.

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Με τον όρο «ραδιενέργεια» αναφερόμαστε στη διαδικασία, κατά την οποία τα ασταθή νουκλίδια (ή αλλιώς, ραδιοϊσότοπα) διασπώνται, προκαλώντας τη δημιουργία νέων νουκλιδίων καθώς και την εκπομπή άλλων σωματιδίων και ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Οι ρυθμοί διάσπασης κυμαίνονται σε διάφορες χρονικές κλίμακες, με ορισμένους να ξεκινούν από κάποια μικροδευτερόλεπτα και άλλους να φτάνουν τα δισεκατομμύρια χρόνια. Στην πλειονότητα τους, τα νουκλίδια τα οποία είναι γνωστά στην επιστήμη θεωρούνται ασταθή και, ως εκ τούτου, ραδιενεργά. Ουσιαστικά, από τα σχεδόν 2.500 γνωστά νουκλίδια, μόνο τα 300 διαθέτουν σταθερούς πυρήνες. Η αστάθεια που χαρακτηρίζει τα ραδιοϊσότοπα οφείλεται στον ανταγωνισμό μεταξύ απωστικών ηλεκτρικών δυνάμεων και ελκτικών πυρηνικών δυνάμεων (Young & Freedman, 2004).

Ραδιοϊσότοπα υπάρχουν παντού στο περιβάλλον, από την ατμόσφαιρα μέχρι τα χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα. Οι συγκεντρώσεις τους ποικίλουν, βάσει των γεωλογικών και γεωγραφικών συνθηκών της κάθε περιοχής. Η φυσική ραδιενέργεια του περιβάλλοντος, δηλαδή η διάσπαση των ραδιοϊσοτόπων η οποία προκαλείται αυτόματα και όχι από κάποια τεχνητώς επιταχυνόμενα σωματίδια, προέρχεται κατά κύριο λόγο από τα αρχέγονα ισότοπα, όπως το ^{40}K . Τα αρχέγονα ισότοπα είναι νουκλίδια που δημιουργήθηκαν κατά την διαδικασία της πυρηνοσύνθεσης στα άστρα και τους υπερκαινοφανείς αστέρες και οι χρόνοι ημιζωής τους συναγωνίζονται σε ηλικία ακόμα και την Γη (Tzortzis, 2004).

Ωστόσο, εκτός από τις φυσικές πηγές, οι οποίες προϋπάρχουν του ανθρώπου και χρονολογούνται πριν από την εμφάνιση της ζωής στη Γη, υπάρχουν και τεχνητές πηγές ραδιενέργειας, οι οποίες επινοήθηκαν κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα. Κατασκευάστηκαν με σκοπό την κάλυψη ενεργειακών, ιατρικών και στρατιωτικών αναγκών αν και γρήγορα έγινε σαφές πως υπό ορισμένες προϋποθέσεις μπορούν να αποτελέσουν σημαντικό κίνδυνο για τον φυσικό κόσμο (Βεργανελάκης et al., 1989).

1.2 Ιστορία

Η ραδιενέργεια ως όρος αναφέρθηκε για πρώτη φορά το 1898 από την Πολωνή φυσικό και χημικό Μαρί Κιουρί. Ετυμολογικά, η λέξη «ραδιενεργός» προέρχεται από τον συνδυασμό της λατινικής λέξης *radium*, που σημαίνει «ακτίνα» και του γαλλικού *actinivité*, που σημαίνει «δραστηριότητα/ενέργεια». Χρησιμοποιήθηκε ως επίσημη επιστημονική ονομασία όταν κατά τη μελέτη της πάνω στην ακτινοβολία που εξέπεμπαν το ουράνιο και το θόριο, η Κιουρί παρατήρησε πως η ένταση της ακτινοβολίας που παράγονταν ήταν ανάλογη της ποσότητας των στοιχείων. Μετά από αυτή την ανακάλυψη, η νεαρή επιστήμων πρότεινε η ονομασία του φαινομένου, που μέχρι τότε ήταν «ακτίνες ουρανίου», να αλλάξει και να μετονομαστεί σε «ραδιενέργεια», η οποία προβλέπει γενικά την εκπομπή ακτινοβολίας διαφόρων στοιχείων, πέραν του ουρανίου (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

Ωστόσο, πριν την Κιουρί και προτού η ραδιενέργεια καθιερωθεί ως επίσημος επιστημονικός όρος, τα θεμέλια για την ανακάλυψη της έθεσε ο Γάλλος φυσικός, Ανρί Μπεκερέλ. Το 1896, κατά τη διάρκεια των ερευνών του, ο Μπεκερέλ τοποθέτησε φωσφορίζοντα άλατα ουρανίου πάνω σε μια φωτογραφική πλάκα και έπειτα την τύλιξε σε μαύρο χαρτί. Στη συνέχεια την άφησε στο φως του ήλιου και περίμενε

οι ηλιακές ακτίνες να διαπεράσουν το χαρτί και να αφήσουν το αποτύπωμα τους στην πλάκα. Με άλλα λόγια, πειραματιζόταν πάνω στις ακτίνες Χ. Παρατήρησε πως η πλάκα δεν επηρεαζόταν μόνο όταν ήταν εκτεθειμένη στο φως του ήλιου αλλά και όταν βρίσκονταν στο σκοτάδι. Ο Μπεκερέλ συμπέρανε πως τα άλατα ουρανίου εξέπεμπαν αυθόρμητα κάποια συγκεκριμένη μορφή ακτινοβολίας. Έτσι το φαινόμενο ονομάστηκε «ακτίνες ουρανίου» ή «ακτίνες Μπεκερέλ» προτού η Κιουρί, στα πειράματα που έκανε μαζί με τον σύζυγο της, το ονομάσει «ραδιενέργεια» (Young & Freedman, 2004).

Το 1903, ο Ανρί Μπεκερέλ, μαζί με την Μαρί Κιουρί και τον σύζυγο της Πιερ, τιμήθηκαν με το Βραβείο Νόμπελ Φυσικής για την ανακάλυψη τους. Ήταν τέτοια η συνεισφορά τους στον τομέα της πυρηνικής φυσικής και της επιστήμης γενικότερα, που ορισμένες μονάδες μέτρησης πήραν τα ονόματά τους. Για παράδειγμα, η μονάδα μέτρησης των ραδιενεργών διασπάσεων στο SI είναι το Bq ή ολογράφως becquerel και είναι ίση με μία διάσπαση ανά δευτερόλεπτο. Μια ακόμα μονάδα που χρησιμοποιείται ευρέως για τον υπολογισμό του ρυθμού διάσπασης είναι το curie (Ci), το οποίο ισούται με $3,7 \cdot 10^{10}$ διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο (Young & Freedman, 2004).

Η σχέση των δύο μονάδων μέτρησης συνοψίζεται ως εξής:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ διασπάσεις s}^{-1}$$

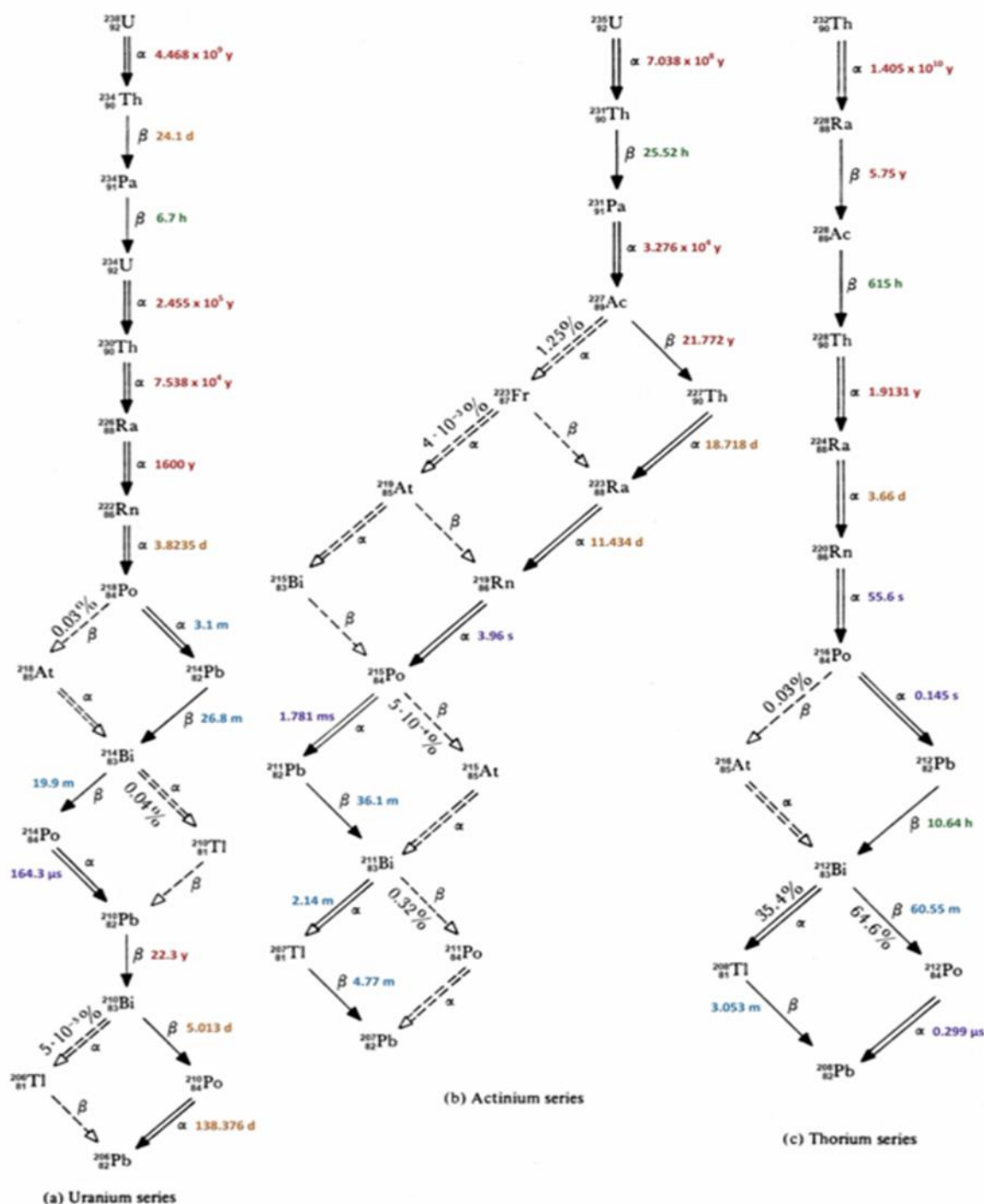
Ένας ακόμα σπουδαίος επιστήμονας που πραγματοποίησε εντατικές έρευνες ήταν και ο Βρετανός φυσικός Έρνεστ Ράδερφορντ, ο οποίος επικεντρώθηκε στις ακτινοβολίες των ενώσεων του θορίου. Οι μελέτες όλων των προαναφερθέντων επιστημόνων συνέκλιναν στο συμπέρασμα πως οι ακτινοβολίες που εκπέμπονται είναι προϊόντα θετικώς ή αρνητικώς φορτισμένων σωματιδίων και ουδέτερων ακτινών. Οι διάφοροι τύποι ακτινοβολίας πήραν ονόματα όπως «άλφα», «βήτα» ή «γάμμα», λόγω των ανόμοιων χαρακτηριστικών διεξόδου/εμβέλειας που έχει ο καθένας (Young & Freedman, 2004).

1.3 Ραδιενεργές διασπάσεις

Ένας ασταθής πυρήνας υφίσταται μετατροπή αυθόρμητα, χωρίς την επίδραση κάποιου εξωτερικού παράγοντα. Μετατρέπεται σε κάποιο άλλο είδος πυρήνα, διαφορετικό από τον αρχικό, εκπέμποντας, παράλληλα, σωματίδια ή αποδιεγείρεται σε χαμηλότερες ενεργειακές στάθμες εκπέμποντας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Είναι γνωστό πως αυτό το φαινόμενο αποτελεί μία ραδιενεργό αποδιέγερση. Τα σωματίδια ή κύματα που παράγονται και που αποτελούν την ραδιενεργό ακτινοβολία, φέρουν σημαντική ενέργεια και, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τα σωματίδια άλφα, τα σωματίδια βήτα και την ακτινοβολία γάμμα (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

Ένας απλοποιημένος και εκλαϊκευμένος ορισμός της ραδιενέργειας είναι η εκπομπή σωματιδίων ή/και ακτινοβολίας που πραγματοποιείται κατά την διάσπαση ή αποδιέγερση του πυρήνα. Αυτός ο πυρήνας είναι ο μητρικός, ενώ ο καινούργιος που δημιουργείται αποτελεί τον θυγατρικό. Πολλές φορές, παρατηρείται πως όχι μόνο ο μητρικός, αλλά και ο θυγατρικός πυρήνας είναι ραδιενεργός. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό μιας σειράς διαδοχικών, ραδιενεργών διασπάσεων/αποδιεγέρσεων οι οποίες συνεχίζονται ωσότου επιτευχθεί μια σταθερή κατάσταση στον πυρήνα. Στο περιβάλλον απαντώνται πολλές τέτοιες σειρές, όπως αυτές του θορίου (^{232}Th), του ακτινίου (^{235}U) και του ποσειδωνίου (^{237}Np), ωστόσο ο πιο διαδεδομένος ραδιενεργός πυρήνας στο γήινο περιβάλλον είναι το ισότοπο του ουρανίου ^{238}U . Το συγκεκριμένο ισότοπο αποδιεγείρεται με/ακολουθείται από μία αλληλουχία 14 διασπάσεων (8 εκπομπές α και 6 β^-) δημιουργώντας τη δική του σειρά και καταλήγοντας στο σταθερό ισότοπο του μόλυβδου, ^{206}Pb (Young & Freedman, 2004).

Μελέτες έχουν δείξει πως οι σεισμοί οφείλονται εν μέρει στη ραδιενεργό διάσπαση του ^{238}U , η οποία λαμβάνει χώρα μέσα στον γήινο μανδύα. Η θερμική ενέργεια που απελευθερώνεται από την διάσπαση του ραδιενεργού πυρήνα μεταφέρεται στον στερεό φλοιό της Γης και παράλληλα συμβάλλει στην διατήρηση της τήξης του εσωτερικού τμήματος του πλανήτη. Τμήματα του φλοιού, οι τεκτονικές πλάκες, ολισθαίνουν στο ρευστό μάγμα, υπερκαλύπτοντας το ένα το άλλο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία σεισμών (Young & Freedman, 2004).



Εικόνα 1 : Σχηματική αναπαράσταση των ραδιενεργών σειρών (Marmier, 1969). Η σειρά του ποσειδωνίου δεν παρουσιάζεται γιατί τα περισσότερα νουκλιδία της έχουν μικρούς χρόνους ημιζωής σχετικά με την ηλικία της Γης και οι συγκεντρώσεις τους είναι μικρές.

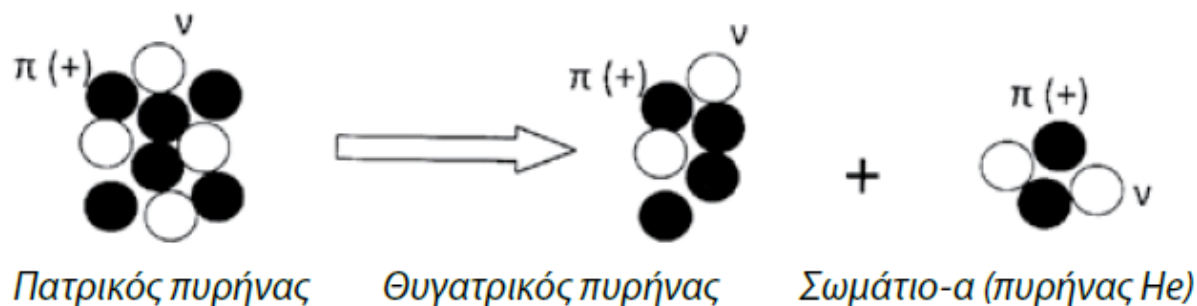
Με βάση τον τρόπο αποδιέγερσης, οι διασπάσεις ή/ και αποδιεγέρσεις που εντοπίζονται είναι οι εξής τρεις:

1.3.1 Διάσπαση άλφα

Ένα σωματίδιο άλφα αποτελείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια, σε δεσμευτική σύζευξη μεταξύ τους και με συνολικό σπιν (ιδιοπεριστροφή) ίσο με το μηδέν. Ουσιαστικά, το σωματίδιο άλφα είναι ένα πυρήνας ηλίου ^4He (Young & Freedman, 2004).

Τα σωματίδια αυτά εκπέμπονται με καθορισμένη κινητική ενέργεια ανά διάσπαση, μερικών MeV, η οποία αντιστοιχεί σε ταχύτητα της τάξεως των 20.000 km/s (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004). Η κινητική τους ενέργεια προκύπτει κυρίως από την αρχή διατήρησης της ορμής και λόγω του φορτίου και της μάζας τους μπορούν να κινηθούν ελάχιστα διαμέσου του αέρα ή στερεών σωμάτων προτού ακινητοποιηθούν (Young & Freedman, 2004).

Η διάσπαση άλφα παρατηρείται κατά κύριο λόγο σε πυρήνες τεραστίου μεγέθους, οι οποίοι εκ φύσεως δεν γίνεται να είναι ευσταθείς. Κατά τη διάρκεια της διάσπασης, οι τιμές του N και του Z του πυρήνα μειώνονται κατά δύο (για τον κάθε αριθμό), με αποτέλεσμα το A να μειωθεί κατά τέσσερα. Ένα γνωστό παράδειγμα διάσπασης άλφα αποτελεί το ράδιο ^{226}Ra το οποίο διασπάται σε ραδόνιο ^{222}Rn . (Young & Freedman, 2004).



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση της διάσπασης άλφα. Τα πρωτόνια είναι τα σκούρα σωματίδια, ενώ τα νετρόνια είναι λευκά (ΕΕΑΕ, 2011).

1.3.2 Διάσπαση βήτα

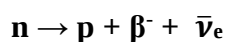
Η διάσπαση βήτα χωρίζεται σε τρεις διαφορετικούς τύπους: τη διάσπαση β^- , τη διάσπαση β^+ και την σύλληψη ηλεκτρονίου (Young & Freedman, 2004).

- **Διάσπαση β^-**

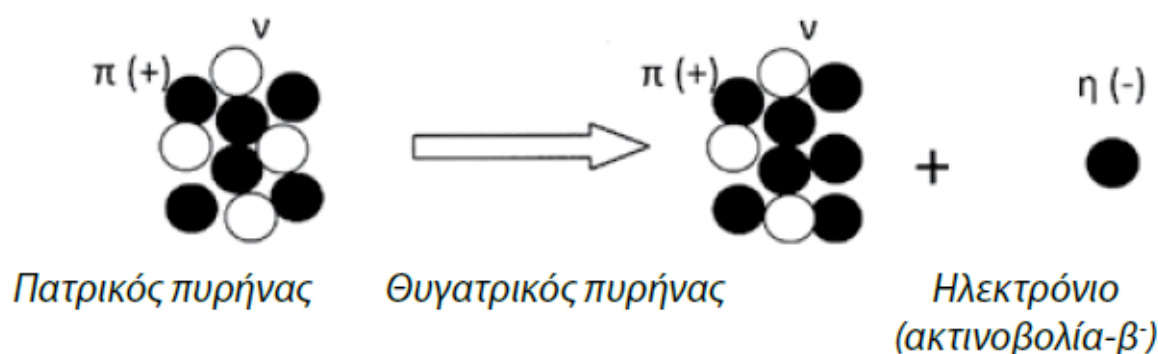
Ένα σωματίδιο β^- είναι ένα ηλεκτρόνιο το οποίο εκπέμπεται με ταχύτητα που μπορεί να φτάσει μέχρι και το 99,95% της ταχύτητας του φωτός. Το συγκεκριμένο σωματίδιο είναι προϊόν διάσπασης ενός νετρονίου, το οποίο μετασχηματίζεται σε πρωτόνιο, ηλεκτρόνιο και

αντινετρίνο. Το αντινετρίνο ($\bar{\nu}$) είναι αντισωματίδιο του νετρίνου, με μηδενικό ηλεκτρικό φορτίο, και μάζα εξαιρετικά μικρή, σε σύγκριση με την μάζα του ηλεκτρονίου (Young & Freedman, 2004).

Το αντινετρίνο που εκπέμπεται κατά τη διάσπαση β^- συμβολίζεται με $\bar{\nu}_e$ και η διαδικασία διάσπασης συνοψίζεται με την παρακάτω σχέση:



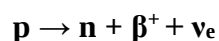
Η διάσπαση β^- λαμβάνει χώρα σε πυρήνες των οποίων ο λόγος $\frac{N}{Z}$ είναι υπερβολικά μεγάλος, κάτι που συνεπάγεται την απώλεια της σταθερότητας τους. Το N μειώνεται κατά μία μονάδα ενώ το Z αυξάνεται, επίσης κατά μία μονάδα, με συνέπεια το A να μένει αμετάβλητο (Young & Freedman, 2004).



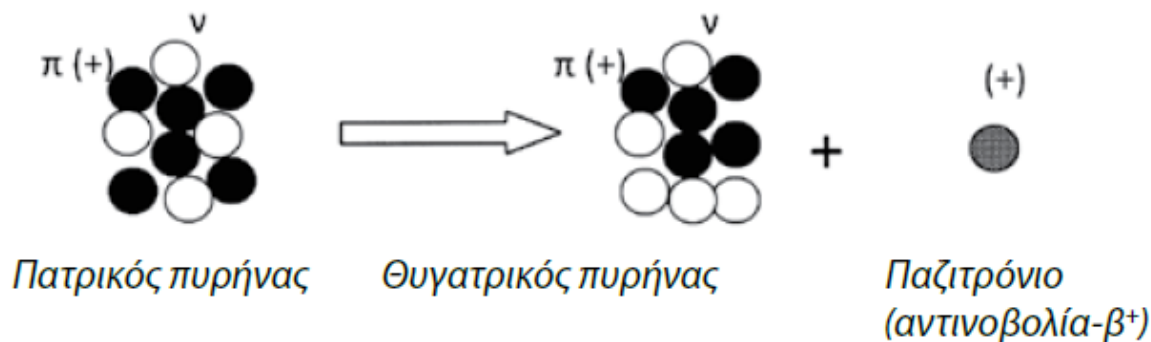
Σχήμα 2 : Σχηματική απεικόνιση της διάσπασης β^- . Τα σκούρα σωματίδια είναι φορτισμένα (πρωτόνια και ηλεκτρόνια), ενώ τα ουδέτερα νετρόνια είναι λευκά (ΕΕΑΕ, 2011).

• Διάσπαση β^+

Η διαδικασία που ακολουθείται εδώ είναι ακριβώς η αντίθετη από τη διάσπαση β^- . Ενώ η διάσπαση β^- πραγματοποιείται σε πυρήνες με πολύ μεγάλο λόγο $\frac{N}{Z}$, η διάσπαση β^+ συμβαίνει σε πυρήνες όπου ο λόγος του αριθμού νετρονίων προς τον αριθμό πρωτονίων είναι πολύ μικρός, κάτι που οδηγεί σε αστάθεια (Young & Freedman, 2004). Η σχέση είναι η εξής:



Με την διάσπαση αυτή εκπέμπεται ένα ποζιτρόνιο (αντισωματίδιο του ηλεκτρονίου), το οποίο προέρχεται από το μετασχηματισμό ενός πρωτονίου του πυρήνα σε νετρόνιο και ποζιτρόνιο. Όπως είναι αναμενόμενο, σε αντίθεση με την διάσπαση β^- , ο αριθμός των πρωτονίων μειώνεται κατά ένα ενώ ο αριθμός των νετρονίων αυξάνεται κατά ένα. Επίσης, η εκπομπή του σωματιδίου β^+ συνοδεύεται από την εκπομπή ενός νετρίνου (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

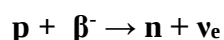


Σχήμα 3: Σχηματική απεικόνιση της διάσπασης β⁺. Τα σκούρα σωματίδια είναι φορτισμένα (πρωτόνια και ποζιτρόνια), ενώ τα ουδέτερα νετρώνια είναι λευκά (ΕΕΑΕ, 2011).

- **Σύλληψη ηλεκτρονίου**

Ο τρίτος και τελευταίος τύπος της διάσπασης βήτα είναι η σύλληψη ηλεκτρονίου. Όταν η διάσπαση β⁺ δεν είναι εφικτή ενεργειακά, πραγματοποιείται ένας συνδυασμός μεταξύ ενός τροχιακού ηλεκτρονίου, το οποίο συνήθως προέρχεται από την στοιβάδα Κ, με ένα πρωτόνιο του πυρήνα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός νετρονίου και ενός νετρίνου. Ενώ το νετρόνιο παραμένει στο πυρήνα, το νετρίνο εκπέμπεται εκτός (Young & Freedman, 2004).

Η σχέση είναι η εξής:



1.3.3 Αποδιέγερση γάμμα

Κάθε πυρήνας διαθέτει ορισμένες επιτρεπόμενες ενεργειακές καταστάσεις. Αυτές οι καταστάσεις περιλαμβάνουν τη θεμελιώδη ή βασική κατάσταση (ή στάθμη) και κάποιες διεγερμένες καταστάσεις. Διάσπαση γάμμα παρατηρείται όταν ένας πυρήνας μεταβεί από μία διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση σε κάποια άλλη χαμηλότερη. Τότε εκπέμπονται οι λεγόμενες ακτίνες γάμμα ή αλλιώς φωτόνια ακτινών γάμμα (Young & Freedman, 2004).

1.4 Ενεργότητες και ημιζωές

Η ενεργότητα (ρυθμός διάσπασης) ορίζεται ως ο αριθμός των ραδιενεργών διασπάσεων του πυρήνα που συμβαίνουν σε μια δεδομένη ποσότητα ύλης ανά μονάδα χρόνου. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, η μονάδα μέτρησης των ραδιενεργών διασπάσεων, δηλαδή της ενεργότητας, είναι το μπεκερέλ και συμβολίζεται με Bq (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός N πυρήνων, τόσο περισσότεροι είναι οι πυρήνες που διασπώνται. Συνεπώς η ενεργότητα είναι ανάλογη προς τον αριθμό N.

$$A = \lambda \cdot N$$

όπου A οι διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο (ενεργότητα), λ η σταθερά διάσπασης και N ο αριθμός πυρήνων του εκάστοτε ραδιοϊσοτόπου.

Η σταθερά λ έχει διαφορετικές τιμές για κάθε ραδιενεργό ισότοπο. Μεγάλη τιμή της λ ισοδυναμεί με υψηλό ρυθμό διάσπασης ενώ αντίστοιχα μια μικρή τιμή ισοδυναμεί με βραδύτερη διάσπαση (Young & Freedman, 2004).

Η ραδιενεργός διάσπαση καθορίζεται με βάση τον χρόνο ημιζωής ($t_{1/2}$) ή “ημιζωές” για ευκολία. Μια ημιζωή, ή αλλιώς ο χρόνος ημιζωής (υποδιπλασιασμού), ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο αριθμός των ραδιοϊσοτόπων να μειωθεί στο μισό του αρχικού τους αριθμού. Η ποσοστιαία μείωση του πλήθους των πυρηνικών ασταθών ισοτόπων συμβαίνει ανεξάρτητα από την ηλικία και την ποσότητα του. Για παράδειγμα, αν ένα ραδιενεργό ισότοπο έχει χρόνο ημιζωής τα 5.000 y, αυτό σημαίνει ότι μετά από 5.000 y η μισή ποσότητα από το εν λόγω ισότοπο θα έχει διασπαστεί και θα παραχθούν θυγατρικά ραδιοϊσότοπα (από το αρχικό ισότοπο που ονομάζεται και μητρικό) ή θα παραχθούν σταθερά ισότοπα από το ίδιο στοιχείο. Μετά από άλλα 5.000 y, το μισό του εναπομείναντος μητρικού ή αρχικού ισοτόπου θα έχει διασπαστεί και αυτό (Βεργανελάκης et al., 1989).

1.5 Φυσική Ραδιενέργεια

Στην φύση συναντάται πληθώρα ραδιενεργών στοιχείων. Αυτά τα στοιχεία, τα οποία αποτελούν την φυσική ραδιενέργεια του περιβάλλοντος, μελετώνται από το 1986 (Young & Freedman, 2004). Εκτιμάται ότι, κατά μέσο όρο, ο άνθρωπος εκτίθεται κατά 85% σε φυσική ραδιενέργεια, με το υπόλοιπο 15% να αντιστοιχεί σε τεχνητές πηγές (Kilic et al., 2007).

Η φυσική ραδιενέργεια που λαμβάνει ο άνθρωπος προέρχεται από τρεις πηγές: την **κοσμική ακτινοβολία**, τα ραδιενεργά κοιτάσματα της Γης (**ραδιενέργεια περιβάλλοντος**) αλλά και από τον ίδιο τον άνθρωπο (**εσωτερική ραδιενέργεια**).

1.5.1 Κοσμική ακτινοβολία

Ως κοσμική ακτινοβολία ορίζεται μια κατηγορία ακτινοβολίας που προέρχεται από κάποιο μέρος του διαστήματος μακριά από την Γη και η οποία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα του πλανήτη. Αποτελεί προϊόν κοσμολογικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στον διαστρικό χώρο, όπως για παράδειγμα η θερμοπυρηνική σύντηξη στο εσωτερικού του Ήλιου, η οποία αποτελεί πηγή θερμικής ενέργειας και κοσμικής ακτινοβολίας (Βεργανελάκης et al., 1989). Κάποια χαρακτηριστικά ραδιενεργά ισότοπα που δημιουργούνται από την κοσμική ακτινοβολία είναι τα ^7Be , ^3He και ^{14}C (Παππά, 2014).

Στο ηλιακό σύστημα, δύο είναι οι κυριότερες πηγές κοσμικής ακτινοβολίας: οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες (GCR) και οι ηλιακές κοσμικές ακτίνες (SCR). Οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες αποτελούνται κατά 98% από βαρυόνια και κατά 2% από ηλεκτρόνια. Η δομή των βαρυόνιων είναι κυρίως πρωτόνια (85%), σωματίδια άλφα (14%) και βαρύτερα ιόντα (περίπου 1%). Μια τρίτη πηγή κοσμικής ακτινοβολίας θεωρείται η ακτινοβολία που προέρχεται από την χαμηλή γήινη τροχιά (Low Earth Orbit ή LEO) και πρόκειται ουσιαστικά για τις λεγόμενες ζώνες Βαν Άλεν. Οι ζώνες Βαν Άλεν αποτελούν προϊόν αλληλεπίδρασης μεταξύ των γαλαξιακών και ηλιακών ακτινών με το μαγνητικό πεδίο της Γης και την γήινη ατμόσφαιρα (Kovar et al., 2020).

Ωστόσο, οι ασταθείς πυρήνες που καταλήγουν στην γήινη επιφάνεια δεν προέρχονται από το διάστημα. Είναι αποτελέσματα της σύγκρουσης της κοσμικής ακτινοβολίας με στοιχεία που βρίσκονται ελεύθερα στην ατμόσφαιρα της Γης, όπως είναι το οξυγόνο και το άζωτο. Τα σωματίδια που σχηματίζονται είναι διαφόρων τύπων και ο αριθμός τους εξαρτάται από το υψόμετρο στο οποίο λαμβάνει χώρα η σύγκρουση. Τελικά, μονάχα ένα πολύ μικρό ποσοστό από αυτά καταφέρνει να φτάσει στην επιφάνεια του πλανήτη, αφού το μεγαλύτερο μέρος της ραδιενεργούς ακτινοβολίας έχει ήδη απορροφηθεί από την ατμόσφαιρα (Βεργανελάκης et al., 1989).

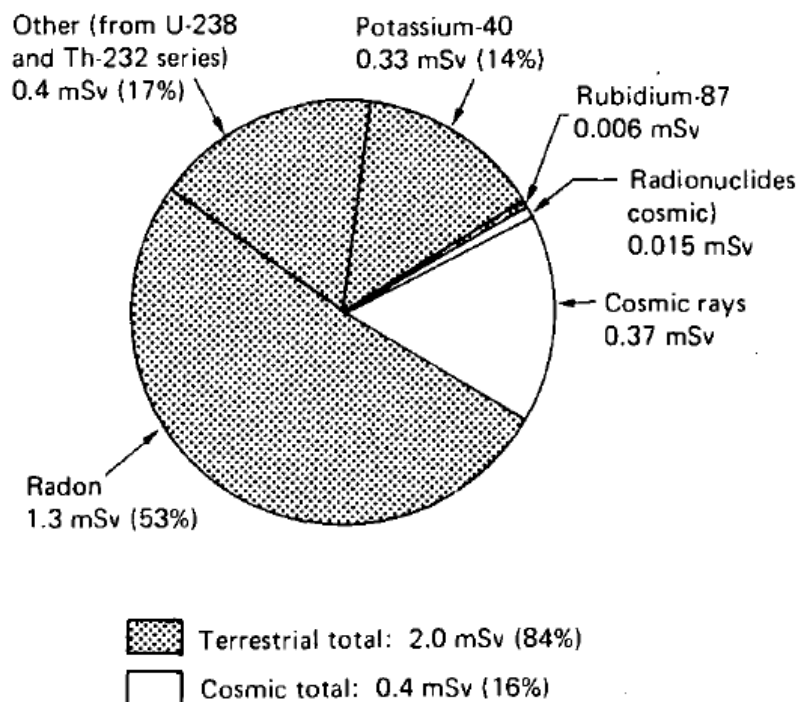
Element	Radioactive isotope	Half life /12/	Element	Radioactive isotope	Half life /12/
Tritium	H ³	12,46 years	Phosphorus . . .	P ³²	14,3 days
Beryllium	Be ⁷	52,9 days		P ³³	25,4 "
	Be ¹⁰	2,5·10 ⁶ years	Sulfur	S ³⁵	87,1 "
Carbon	C ¹⁴	5568 years	Chlorine	Cl ³⁹	55,5 min
Sodium	Na ²²	2,6 years			

Εικόνα 2: Φυσικά ραδιοϊσότοπα που δημιουργήθηκαν από την κοσμική ακτινοβολία (Pertsov, 1967)

Η κοσμική ακτινοβολία που φτάνει στη γήινη επιφάνεια έχει υποστεί τροποποιήσεις. Προτού εισέλθει στην ατμόσφαιρα, αποτελείται κατά 90% από πρωτόνια, 9% από σωματίδια άλφα και 1% από βαρύτερους πυρήνες. Μετά τη σύγκρουση της με πυρήνες ατόμων O, N και άλλων στοιχείων, στο έδαφος φτάνει ακτινοβολία γάμμα. Εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου της Γης, οι περιοχές κοντά στους πόλους δέχονται 4 φορές μεγαλύτερη ποσότητα ακτινοβολίας από ότι οι περιοχές κοντά στον Ισημερινό. Το υψόμετρο παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο. Η μέση συνεισφορά στη δόση που δέχεται ετησίως ο άνθρωπος είναι 0,3 mSv. Παρ' όλ' αυτά, στα 2.000 m από την επιφάνεια του εδάφους, η τιμή αγγίζει το 1 mSv (Βεργανελάκης et al., 1989).

1.5.2 Ραδιενέργεια περιβάλλοντος

Τον προηγούμενο αιώνα, περισσότερα από 40 διαφορετικά ραδιοϊσότοπα ανακαλύφθηκαν στο υπέδαφος. Η πλειοψηφία τους προέρχεται από διαδοχικές διασπάσεις άλλων ραδιοϊσοτόπων, των οποίων οι ηλικίες ανήκουν στην ίδια τάξη μεγέθους με την ηλικία της Γης. Πρόκειται για την ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ίδιο τον πλανήτη, από ραδιενεργά κοιτάσματα (Βεργανελάκης et al., 1989). Εξαιτίας μετεωρολογικών, υδρολογικών, γεωχημικών και ηφαιστειακών διεργασιών, οι οποίες εκτελούνται διαρκώς στην επιφάνεια της Γης, τα ραδιενεργά στοιχεία που περιέχονται στη λιθόσφαιρα, μέσω της αποσάθρωσης και διάβρωσης των πετρωμάτων, σταδιακά εντάσσονται σε έναν συνεχή κύκλο ανταλλαγής ουσιών στην βιόσφαιρα. Τα φυσικά ραδιοϊσότοπα απελευθερώνονται σε λεκάνες απορροής, συμμετέχοντας στον σχηματισμό ιζηματογενών πετρωμάτων. Επιπλέον, διεισδύουν στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας ενώ συγχρόνως αφομοιώνονται από τους ζωικούς και φυτικούς οργανισμούς. Κάποια από τα διαφυγόντα ραδιενεργά στοιχεία τα οποία εισέρχονται στην ατμόσφαιρα, επιστρέφουν στην επιφάνεια της Γης με τη μορφή κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι). Όλες οι παραπάνω συνθήκες οδηγούν σε μια ισορροπία μεταξύ των ραδιενεργών ισοτόπων στην επιφάνεια της Γης (Pertsov, 1967).



Σχήμα 4: Εκτιμώμενες ετήσιες δόσεις ανά άτομο από φυσικές ραδιενεργές πηγές (Gonzalez and Anderer, n.d.)

Αν και σε μικρές αναλογίες, ασταθή ισότοπα των δύο σημαντικότερων ραδιενεργών σειρών, το ^{238}U και το ^{232}Th και τα προϊόντα των διασπάσεων τους, βρίσκονται σχεδόν παντού στην επιφάνεια του πλανήτη αλλά και στον γήινο φλοιό. Ειδικότερα, το ουράνιο συναντάται στον περιβάλλον με τη μορφή διοξειδίου του ουρανίου (UO_2). Στα κοιτάσματα ουρανίου, η μέγιστη συγκέντρωση του UO_2 είναι περίπου 0,1-0,5% της μάζας του ορυκτού (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

Η ακτινοβολία που εκπέμπουν τα φυσικά ραδιενεργά κοιτάσματα της Γης είναι διαφορετική, ανάλογα με την γεωγραφική περιοχή. Για παράδειγμα στην Βραζιλία οι συνεισφορές σε βιολογικές δόσεις κυμαίνονται μεταξύ 10 και 250 mSv ενώ σε ορισμένες επαρχιακές πόλεις της Ινδίας, οι δόσεις δεν ξεπερνούν τα 15-30 mSv το χρόνο. Τα υψηλά επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας οφείλονται πολλές φορές σε πετρώματα όπως ο μοναζίτης, ένα φωσφορικό ορυκτό το οποίο είναι συνήθως εμπλουτισμένο με ραδιενεργό θόριο ^{232}Th (Βεργανελάκης et al., 1989).

Μια άλλη σημαντική πηγή ραδιενέργειας που συναντάται στο φυσικό περιβάλλον είναι και το ραδόνιο. Πρόκειται για ένα ευγενές αέριο το οποίο πηγάει από το έδαφος και θεωρείται επικίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. Τα ραδιοϊσότοπα του ραδονίου είναι το ^{222}Rn της σειράς του ουρανίου (^{238}U) και το ^{220}Rn της σειράς του θορίου. Το ισότοπο ^{222}Rn διαθέτει χρόνο ημιζωής 3,8 d προτού διασπαστεί σε πολώνιο, συνοδευόμενο από εκπομπή σωματιδίων άλφα και ακτινοβολίας γάμμα (Βεργανελάκης et al., 1989).

Άλλες πηγές φυσικής ραδιενέργειας που υπάρχουν στο περιβάλλον, των οποίων όμως η συνεισφορά στην ετήσια δόση παραμένει μικρή, είναι το κάρβουνο (λιγνίτης), η γεωθερμική ενέργεια και διάφορα φωσφατικά ορυκτά που χρησιμοποιούνται για λιπάσματα. Το κάρβουνο θεωρείται η πιο σημαντική πηγή εξ' αυτών, καθώς όταν καίγεται ελευθερώνει ραδιοϊσότοπα, τα οποία είτε φεύγουν με τον καπνό, είτε μένουν στη στάχτη. Τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής τα οποία χρησιμοποιούν για πηγή ενέργειας το κάρβουνο συνεισφέρουν στην ετήσια δόση με 0,001 mSv. Για θέρμανση, η συνολική συνεισφορά της καύσης κάρβουνου είναι 0,05 mSv ανά έτος (Βεργανελάκης et al., 1989).

Στην Ελλάδα, περίπου το 70% της παραγωγής ηλεκτρισμού πραγματοποιείται σε εργοστάσια καύσης λιγνίτη, τα οποία βρίσκονται κοντά στην πόλη της Πτολεμαΐδας, στα βορειοδυτικά της χώρας. Μετρήσεις με φασματοσκοπία γάμμα πραγματοποιήθηκαν στη περιοχή για τα φυσικά ραδιοϊσότοπα ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K . Ωστόσο τα αποτελέσματα έδειξαν πως παρά το γεγονός ότι οι ρύποι που εκπέμπονται από τα εργοστάσια περιέχουν υψηλά επίπεδα ραδιενεργών ισοτόπων της σειράς του ουρανίου, οι τιμές που βρέθηκαν συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό με το εύρος τιμών που βρέθηκαν στα δείγματα εδάφους της υπόλοιπης Ελλάδας. Πιο αναλυτικά, οι τιμές των τεσσάρων παραπάνω ισοτόπων ήταν 42 ± 11 , 27 ± 6 , 36 ± 5 και $496 \pm 56 \text{ Bq kg}^{-1}$, αντιστοίχως. Τα επίπεδα ραδονίου που μετρήθηκαν σε 66 κατοικίες με τη βοήθεια ανιχνευτή SSNTD (Solid State Nuclear Track Detection) κυμαίνονταν μεταξύ 12 και 129 Bq m^{-3} με την μέση τιμή να αγγίζει τα $36 \pm 2 \text{ Bq m}^{-3}$. Οι τιμές του ραδονίου είναι επίσης παρόμοιες με τις τιμές που έχουν μετρηθεί και στην υπόλοιπη χώρα. Η συνολική δόση που βρέθηκε για τα ισότοπα από την ραδιενεργό διάσπαση του ^{222}Rn ήταν $1,2 \text{ mSv y}^{-1}$ (Psichoudaki and Papaefthymiou, 2008).

Συνοψίζοντας, ραδιενέργεια μπορεί να υπάρξει παντού στο περιβάλλον. Στα πετρώματα, στο χώμα, στη θάλασσα, στα υπόγεια ύδατα, στην ατμόσφαιρα, στα φυτά, στα ζώα και στον άνθρωπο. Η τελευταία περίπτωση αναλύεται παρακάτω (Pertsov, 1967).

1.5.3 Εσωτερική ραδιενέργεια

Η εσωτερική ραδιενέργεια είναι η ακτινοβολία που εκπέμπεται από το εσωτερικό του ανθρώπινου σώματος. Στην ουσία πρόκειται για μια συνδυαστική επίπτωση της κοσμικής ακτινοβολίας και της ραδιενέργειας της Γης. Εφόσον όμως έχει πλέον αποδειχτεί πως λόγω του βιολογικού κύκλου τα ραδιενεργά ισότοπα έχουν σταθερό ρυθμό εξόδου και εισόδου από και προς τον ανθρώπινο οργανισμό, επιτυγχάνοντας τελικά μια κατάσταση δυναμικής ισορροπίας, η εσωτερική ραδιενέργεια μπορεί να θεωρηθεί ως μια τρίτη βασική πηγή φυσικής ραδιενέργειας. Το γεγονός αυτό ανοίγει τον δρόμο για πληθώρα κλάδων όπως η ραδιοβιολογία, η ραδιοοικολογία και η πυρηνική ιατρική (Βεργανελάκης et al., 1989).

Τα ραδιενεργά ισότοπα εισέρχονται στο ανθρώπινο σώμα κυρίως μέσω της αναπνοής ή της τροφής. Ο βαθμός της βλάβης που μπορούν να προξενήσουν στον οργανισμό και ο χρόνος παραμονής τους σε αυτόν διαφέρει, ανάλογα με το κάθε ραδιοϊσότοπο αλλά και τα εσωτερικά όργανα που πλήττονται από την εισερχόμενη ραδιενέργεια. Τα συνηθέστερα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα που εντοπίζονται στον άνθρωπο είναι ο ραδιενεργός άνθρακας ^{14}C , τα ισότοπα του ραδονίου (^{222}Rn και ^{220}Rn) και το ^{40}K (Βεργανελάκης et al., 1989). Έχει υπολογιστεί πως τα ισότοπα που εισέρχονται και μολύνουν την τροφική αλυσίδα, αποτελούν το 70% της συνολικής ενεργού δόσης από ιοντίζουσα ακτινοβολία που λαμβάνει ο ανθρώπινος πληθυσμός (Szymańska et al., 2020).

Μέσω της τροφής (ως επί το πλείστον ψάρια και άλλα θαλασσινά), ο άνθρωπος μπορεί να προσβληθεί και να υποστεί μόλυνση από ραδιενεργό μόλυβδο ^{210}Pb και ραδιενεργό πολώνιο ^{210}Po (Βεργανελάκης et al., 1989). Στην Ιαπωνία, για παράδειγμα, όπου τα θαλασσινά αποτελούν σημαντικό είδος διατροφής των ανθρώπων, έχει παρατηρηθεί ότι οι συγκεντρώσεις των παραπάνω νουκλιδίων είναι πέντε φορές υψηλότερες από ότι σε χώρες όπως η Γερμανία ή η Ινδία και δέκα φορές υψηλότερες από ότι στις Ηνωμένες Πολιτείες. Παρόμοια ευρήματα σχετικά με τα συγκεκριμένα ισότοπα έχουν καταγραφεί και σε χώρες του Βορρά, όπου ένα τεράστιο μέρος του πληθυσμού καταναλώνει κρέας τάρανδου. Είναι πλέον γνωστό ότι ο τάρανδος τρέφεται σε μεγάλο βαθμό από λειχήνες οι οποίες περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις ^{210}Pb και ^{210}Po , με αποτέλεσμα οι δόσεις που εντοπίζονται στους

τοπικούς πληθυσμούς να είναι δέκα φορές μεγαλύτερες από τα φυσιολογικά επίπεδα. Ραδιενεργός μόλυβδος ^{210}Pb και ραδιενεργό πολώνιο ^{210}Po έχουν επίσης εντοπιστεί στα φύλλα του καπνού, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παρασκευή τσιγάρων (Gonzalez and Anderer, n.d.).

Μια άλλη σημαντική πηγή τροφής για τον άνθρωπο στην οποία έχουν εντοπιστεί υψηλά επίπεδα ραδιενεργού μόλυνσης είναι τα μανιτάρια. Έχει παρατηρηθεί πως τα γένη *Leccinum* και *Leccinellum* περιέχουν ραδιενεργά ισότοπα του Ουρανίου (^{234}U , ^{238}U) και του Θορίου (^{230}Th , ^{232}Th), με αποτέλεσμα η κατανάλωση τους να αυξάνει την ετήσια ενεργό δόση που προσλαμβάνεται από τον άνθρωπο μέσω της τροφής (Szymańska et al., 2020).

Ένα ακόμα ισότοπο που εντοπίστηκε στο σώμα του ανθρώπου είναι το ραδιενεργό Καίσιο (^{137}Cs). Σε αντίθεση με τα προηγούμενα, αυτό το ραδιοϊσότοπο αποτελεί πηγή τεχνητής ραδιενέργειας, η οποία θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα, και προέρχεται από ανθρωπογενείς πηγές όπως το πυρηνικό ατύχημα του Τσερνόμπιλ που συνέβη τον Απρίλιο του 1986 στη Σοβιετική Ένωση. Η τιμή ισορροπίας του ^{137}Cs που μετρίεται στο εσωτερικό του ανθρώπινου σώματος φτάνει τις μερικές χιλιάδες Bq (Βεργανελάκης et al., 1989).

1.6 Τεχνητή Ραδιενέργεια

Η τεχνητή ραδιενέργεια προέρχεται από την διαδικασία μετατροπής σταθερών πυρήνων σε ασταθείς, δηλαδή ραδιενεργούς. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω βομβαρδισμών, οι οποίοι λαμβάνουν χώρα μέσα σε αντιδραστήρες και επιταχυντές. Φυσικά ραδιοϊσότοπα βομβαρδίζονται με νετρόνια, πυρήνες ή άλλα στοιχειώδη σωματίδια με αποτέλεσμα τη δημιουργία νέων ισοτόπων (Βεργανελάκης et al., 1989).

Ορισμένες από τις ανθρωπογενείς πηγές τεχνητής ραδιενέργειας παρατίθενται παρακάτω:

- Ιατρικές εφαρμογές

Οι πιο συχνές εφαρμογές πραγματοποιούνται από ακτινογραφίες στην ιατρική και την οδοντιατρική. Για παράδειγμα η δόση από μια ακτινογραφία θώρακος μπορεί να είναι περίπου 0,14 mSv ενώ μια ακτινογραφία οδόντων περίπου 0,02 mSv. Συγκεκριμένα ισότοπα χρησιμοποιούνται για την διάγνωση συγκεκριμένων ασθενειών και παθήσεων. Π.χ. το ισότοπο ^{131}I εφαρμόζεται για διαγνωστικό έλεγχο θυροειδούς ενώ το ραδιενεργό θάλλιο ^{201}Tl χρησιμοποιείται για τομογραφία καρδιάς. Η δόση από μια τέτοια τομογραφία είναι περίπου 10 με 20 mSv και από μια ολόσωμη αξονική περίπου 15 mSv (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

- Δοκιμές πυρηνικών όπλων

Αποτελούν τη μεγαλύτερη πηγή ανθρωπογενούς ραδιενεργού ρύπανσης του περιβάλλοντος. Τα προϊόντα της σχάσης των δοκιμών επικάθονται στα σωματίδια σκόνης και νερού και συσσωρεύονται στην ατμόσφαιρα. Μεγάλη συσσώρευση γίνεται κυρίως από τα πιο βαριά σωματίδια, τα οποία εναποτέθηκαν στην επιφάνεια της Γης με αποτέλεσμα την αύξηση της απορροφώμενης δόσης ανά άτομο παγκοσμίως. Υπολογίζεται ότι σε δοκιμές πυρηνικών όπλων μεγάλες ποσότητες πλουτωνίου καθώς και ^{238}U απελευθερώθηκαν στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα την παγκόσμια διασπορά 8 περίπου τόνων πλουτωνίου. (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

- Πυρηνική βιομηχανία

Η πυρηνική βιομηχανία είναι υπεύθυνη για την αύξηση της ραδιενέργειας του περιβάλλοντος, λόγω της παραγωγής πυρηνικών καυσίμων, της παραγωγής και διαχείρισης πυρηνικών καταλοίπων καθώς και της λειτουργίας πυρηνικών σταθμών. Κομμάτι της πυρηνικής βιομηχανίας είναι ο εμπλουτισμός του ουρανίου (^{238}U). Κατά την εξαγωγή του ουρανίου, το οποίο βρίσκεται σε αναλογίες 0,1 έως 5% κατά βάρος, απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα μεγάλες ποσότητες αερίου ραδονίου. Το αέριο του ραδονίου είναι ένας από τους κυριότερους παράγοντες κινδύνου στην υγεία των μεταλλωρύχων και για αυτό αφαιρείται από τις στοές με την βοήθεια κατάλληλου εξαερισμού. Μετά την ολοκλήρωση της εξαγωγής, το πέτρωμα αλέθεται σε μικρά κομμάτια στον «μύλο ουρανίου» και έπειτα επεξεργάζεται με συγκεκριμένη χημική διεργασία με σκοπό την αύξηση της συγκέντρωσής του. Το τελικό προϊόν της επεξεργασίας έχει ένα χαρακτηριστικό κίτρινο χρώμα και ονομάζεται «yellow cake», έχοντας φτάσει την περιεκτικότητά του σε ουράνιο σε ποσοστά 70-90%. Τα κατάλοιπα της επεξεργασίας του ορυκτού θεωρούνται άχρηστα και είναι γνωστά ως «tailing» (ουρές του ουρανίου). Πολλά ισότοπα όπως το ^{226}Ra και το μητρικό του ^{230}Th απομένουν στις ουρές (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).



Εικόνα 2: Οξείδιο του ουρανίου «yellow cake» (Nuclear Energy Agency, Uranium oxide yellowcake. Photo: ©Shamil Zhumatov/Reuters).

1.6.1 Το ατύχημα του Τσερνόμπιλ

Το πυρηνικό δυστύχημα του Τσερνόμπιλ σημειώθηκε στις 26 Απριλίου του 1986, στον αντιδραστήρα Ν° 4 του Πυρηνικού Σταθμού Παραγωγής Ενέργειας του Τσερνόμπιλ στην τότε Σοβιετική Ένωση. Το κοσμοϊστορικό γεγονός απασχόλησε την κοινή γνώμη και έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη της πυρηνικής ηλεκτροπαραγωγής. Οι χιλιάδες θάνατοι που συνδέθηκαν με το ατύχημα αναζωπύρωσαν τον παγκόσμιο προβληματισμό σχετικά με την αξιοπιστία και την ασφάλεια της πυρηνικής ενέργειας (Βεργανελάκης et al., 1989).

Το ραδιενεργό νέφος που εκλύθηκε από το ατύχημα πέρασε τα σύνορα των περισσότερων ευρωπαϊκών χωρών, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας. Επέφερε σημαντικές οικονομικές και οικολογικές συνέπειες, καθώς αχρήστευσε μεγάλος μέρος της αγροτικής παραγωγής του 1986.

Κυρίως στις βόρειες περιοχές της χώρας, το νέφος εναπόθεσε μεγάλες ποσότητες ραδιενεργού ιωδίου ^{131}I , το οποίο αποτελεί προϊόν πυρηνικής σχάσης στους αντιδραστήρες. Το αποτέλεσμα ήταν η ραδιενεργός ρύπανση του περιβάλλοντος και ειδικά των τοπικών αγροοικοσυστημάτων. Ρύπανση πέρασε από το γρασίδι στο οποίο βοσκούσαν τα βοοειδή, τα αιγοειδή και τα πρόβατα στο γάλα των ζώων με συνέπεια μετρήσεις του ίδιου έτους που έγιναν στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» να αναδείξουν υψηλές συγκεντρώσεις του ραδιοϊσοτόπου (περίπου 10.000 Bq g^{-1} γάλατος) (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

Ωστόσο η πιο σοβαρή και μακροχρόνια ρύπανση εδαφών παρατηρήθηκε στη Βόρεια Θεσσαλία και τη Δυτική Μακεδονία και ήταν από ραδιενεργό Καίσιο ^{137}Cs (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004). Το ισότοπο ^{137}Cs μετρήθηκε και στη παρούσα εργασία, σε δείγμα χώματος και άμμου παραλιών.

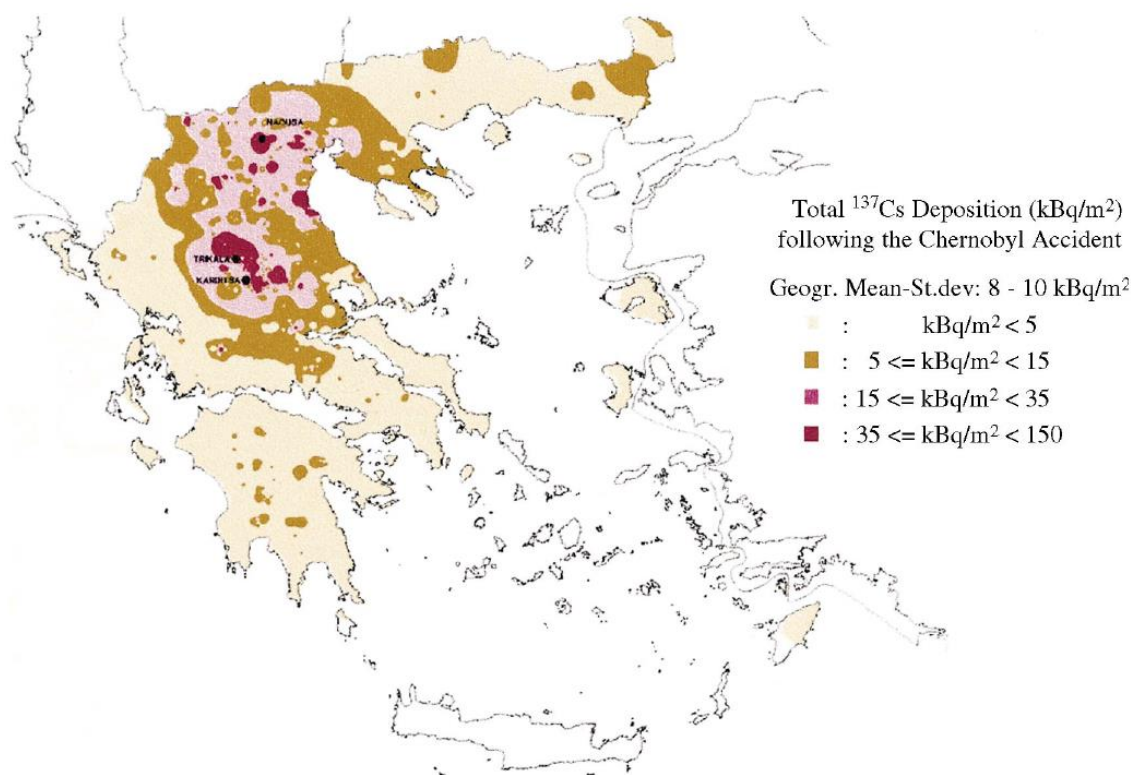


Fig. 1. Total ^{137}Cs deposition (kBq m^{-2}) following the Chernobyl accident.

Εικόνα 3: Περιοχές με εναπόθεση ^{137}Cs (Petropoulos et al., 2001)

Μετά το ατύχημα του Τσερνόμπιλ, διεξήχθη μεγάλος αριθμός ερευνών με στόχο τον προσδιορισμό της ραδιενέργειας περιβάλλοντος στην Ευρώπη, με επίκεντρο τον υπολογισμό του ^{137}Cs . Μια από τις σχετικές μελέτες στην Ελλάδα έγινε με τη βοήθεια γεωγραφικής χαρτογράφησης και γάμμα φασματοσκοπίας, αναλύοντας τα αποτελέσματα της εναπόθεσης των ισοτόπων ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{144}Ce , ^{141}Ce , ^{125}Sb , ^{110}Ag , ^{106}Ru , ^{103}Ru , ^{95}Zr και ^{54}Mn . Οι αντίστοιχες τιμές τους ήταν 149.5 ± 0.1 , 76.1 ± 0.1 , 32.9 ± 0.2 , 46 ± 2 , 4.56 ± 0.02 , 7.98 ± 0.02 , 79.1 ± 0.4 , 337 ± 2 , 20.1 ± 0.2 και $3.02 \pm 0.02 \text{ kBq m}^{-2}$ (Petropoulos et al., 2001).

1.7 Τεχνικώς επαυξημένη φυσική ραδιενέργεια (TENORM)

Με τον όρο τεχνικώς επαυξημένη φυσική ραδιενέργεια (TENORM) ονομάζεται η αλλαγή της συγκέντρωσης των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων (Ali et al., 2021). Αυτή η τεχνητή αύξηση της συγκέντρωσης των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων είναι ένα σχετικά καινούργιος τομέας της ραδιολογίας, με ιδιαίτερο ενδιαφέρον εξαιτίας των επιπτώσεων της στον ανθρώπινο πληθυσμό. Πηγές TENORM μπορούν να θεωρηθούν η εξόρυξη μετάλλων, πετρελαίου ή φυσικού αερίου, τα αστικά λύματα, η παραγωγή ενέργειας από γαιάνθρακα αλλά και οι βιομηχανίες τσιμέντου και βωξίτη (Παππά, 2014). Ακόμα και η εξόρυξη φωσφορικού άλατος, η χρήση λιπασμάτων ή η καύση ορυκτών καυσίμων μπορεί να αυξήσει τη συγκέντρωση των φυσικών ραδιοϊσοτόπων (Alam et al., 2013).

Μια ακόμα σημαντική πηγή τεχνικώς επαυξημένης φυσικής ραδιενέργειας είναι τα οικοδομικά υλικά, όπως η πέτρα, το μπετόν και ο γύψος, τα οποία εκλύουν αέριο ραδόνιο. Για παράδειγμα στη Σουηδία, ένα ραδιενεργό είδος τσιμέντου (1.400 Bq kg^{-1}) χρησιμοποιούνταν για δεκαετίες προτού απαγορευτεί τη δεκαετία του '70. Στο Κολοράντο και στο Οντάριο των ΗΠΑ, από το 1952 μέχρι το 1966, πραγματοποιούνταν συστηματική χρήση καταλοίπων από την επεξεργασία ουρανίου και ραδίου (4.600 Bq kg^{-1}) ως οικοδομικά υλικά. Ακόμα και τα συνηθισμένα τούβλα και οι γρανίτες της Αγγλίας δεν είναι εντελώς ακίνδυνα, καθώς εκπέμπουν ραδιενέργεια της τάξεως $130\text{-}170 \text{ Bq kg}^{-1}$. Πλέον στις ΗΠΑ, η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Προστασίας Περιβάλλοντος (ΟΕΠΠ) έχει θέσει ως όριο μέχρι 4 pCi l^{-1} αέρα για την συγκέντρωση ραδονίου στην ατμόσφαιρα (Βεργανελάκης et al., 1989).

Μελέτες σε περιοχές στην Ελλάδα και πιο συγκεκριμένα σε περιοχές της Πελοποννήσου, υπολόγισαν με τη βοήθεια γάμμα φασματοσκοπίας τις συγκεντρώσεις φυσικής ραδιενέργειας σε οικοδομικά υλικά, όπως το τσιμέντο, ο ασβεστόλιθος, το μάρμαρο και η άμμος. Πιο αναλυτικά, στα δείγματα τσιμέντου βρέθηκαν οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K (Papaefthymiou and Gouseti, 2008).

1.8 Ραδιοπροστασία

Η ραδιοπροστασία (ή αλλιώς ακτινοπροστασία ή ραδιολογική προστασία) εστιάζει στις μεθόδους και στις μελέτες, οι οποίες αποσκοπούν στην προστασία του ανθρώπινου πληθυσμού από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004). Αρχικά, οι πρακτικές που αφορούν στη ραδιοπροστασία επικεντρώθηκαν αποκλειστικά στον άνθρωπο, με την προϋπόθεση ότι η προστασία του ανθρώπου από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες εξασφαλίζει και την προστασία των υπόλοιπων έμβιων οργανισμών (Delistraty, 2008). Τις τελευταίες δεκαετίες, όμως, σημειώνεται σημαντική εξέλιξη στις έρευνες σχετικά με την ραδιολογική προστασία, μετατρέποντας την από ένα σύστημα απευθυνόμενο αμιγώς στον άνθρωπο σε ένα που στοχεύει στην προφύλαξη για την διατήρηση του ευρύτερου φυσικού περιβάλλοντος (Bréchignac et al., 2016). Παρά την πρόοδο που έχει σημειωθεί, η έννοια της ραδιοπροστασίας περιβάλλοντος διαφέρει από χώρα σε χώρα και εξαρτάται απόλυτα από τις συνθήκες που επικρατούν στην εκάστοτε περιοχή (Pentreath, 2009).

Οι έρευνες με επίκεντρο την ραδιολογική προστασία εντάσσονται στο γνωστικό αντικείμενο της ραδιοοικολογίας, ενός κλάδου της οικολογίας που ασχολείται με την παρουσία ραδιενέργειας στα γήινα οικοσυστήματα και ο οποίος θα αναλυθεί περεταίρω στο επόμενο υποκεφάλαιο.

Σημαντικό ρόλο στις πρωτοπόρες αυτές μελέτες έπαιξε η Διεθνής Ένωση Ραδιοοικολογίας (IUR). Ιδρύθηκε το 1970 ως ένας «διεθνής επιστημονικός οργανισμός με σκοπό να αναπτύσσει, να πληροφορεί και να συμβουλεύει οτιδήποτε σχετίζεται με την ραδιενέργεια στο περιβάλλον». Το 1997 επιχείρησε να θέσει τα πρώτα ρυθμιστικά πλαίσια σχετικά με την περιβαλλοντική ραδιοπροστασία. Το 2000, στο 10^ο Συνέδριο της Διεθνούς Οργάνωσης Ραδιοπροστασίας (IRPA-10), οι ιδέες αυτές παρατέθηκαν λεπτομερώς στην ευρύτερη επιστημονική κοινότητα (Brechignac et al., 2003).

Το 2001, η IUR συγκάλεσε τη Διάσκεψη Συναίνεσης στην Περιβαλλοντική Ραδιολογική Προστασία, με σκοπό να θίξει το μείζον περιβαλλοντικό ζήτημα των συνεπειών των ιοντίζουσων ακτινοβολιών. Έκτοτε, η επιστημονική έρευνα, τόσο σε επίπεδο εργαστηρίου, όσο και σε επίπεδο πεδίου, έχει προσφέρει σημαντικές γνώσεις σχετικά με τις επιπτώσεις της ραδιενέργειας στο περιβάλλον (Bréchignac et al., 2016).

Νομοθεσίες σχετικά με την προστασία του ανθρώπου από την ραδιενέργεια έχουν προωθηθεί και από την Διεθνή Επιτροπή Ραδιολογικής Προστασίας (ICRP). Οι πρώτες σκέψεις δημιουργήθηκαν από την ανάγκη να υπάρξει έλεγχος της έκθεσης σε ακτινοβολία στους χώρους εργασίας και ειδικά εκεί όπου πραγματοποιούνται ιατρικές και ακτινολογικές διαδικασίες. Αργότερα το σύστημα επεκτάθηκε προκειμένου να προφυλάσσει το ευρύ κοινό από ραδιενεργά απόβλητα, προερχόμενα από την παραγωγή πυρηνικών όπλων (Delistraty, 2008).

1.8.1 Ραδιενεργές δόσεις

Η ανάπτυξη της ραδιοπροστασίας βασίζεται κυρίως στο γεγονός ότι ο άνθρωπος δεν διαθέτει αισθητήρια όργανα για να ανιχνεύει τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Αυτό φυσικά σημαίνει ότι η παρουσία, η ένταση τους και οι διακυμάνσεις ραδιενεργών στοιχείων κατά το απώτερο παρελθόν δεν επηρέασαν την εξέλιξη και την επιβίωση του ανθρώπινου είδους (Βεργανελάκης et al., 1989).

Η ποσοτική περιγραφή των επιδράσεων της ιοντίζουσας ακτινοβολίας στους ιστούς των ζωντανών οργανισμών ονομάζεται δοσιμετρία ακτινοβολίας και επικεντρώνεται στον υπολογισμό των δόσεων της ραδιενέργειας (Young & Freedman, 2004). Επιπροσθέτως, η δοσιμετρία αφορά στα επιτρεπτά επίπεδα των δόσεων ακτινοβολίας ως μέτρα εκτίμησης της διακινδύνευσης από την εξωτερική ακτινοβολία. Η λέξη «διακινδύνευση» αναφέρεται στην πιθανότητα βιολογικής επίδρασης ή στο αναμενόμενο ποσοστό περιπτώσεων στις οποίες ενδέχεται να υπάρξει βιολογική επίδραση της ακτινοβολίας (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

Κάθε φορά που μια ποσότητα ραδιενεργών σωματιδίων προσπίπτει σε κάποιον βιολογικό ιστό, ένα μέρος της ιοντίζουσας ακτινοβολίας θα τον διαπεράσει δίχως να αλληλεπιδράσει ενώ ένα άλλο μέρος της θα απορροφηθεί και θα εναποθέσει ενέργεια στα κύτταρα του. **Απορροφώμενη δόση** ονομάζεται το ποσό ενέργειας που απορροφάται ανά μονάδα μάζας του εκάστοτε υλικού και αποτελεί το βασικό μέγεθος για τον υπολογισμό της διακινδύνευσης και του μεγέθους των βιολογικών επιπτώσεων της ραδιενέργειας. Με άλλα λόγια, όσο πιο μεγάλη είναι η απορροφώμενη δόση, τόσο μεγαλύτερη η διακινδύνευση και το μέγεθος της επίπτωσης (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

Συνοπτικά, η απορροφώμενη δόση D ορίζεται ως ο παρακάτω λόγος:

$$D = \frac{E}{m}$$

όπου E η εναποτεθείσα ενέργεια από τα φωτόνια ενώ m η μάζα του υλικού.

Η σύγχρονη μονάδα μέτρησης της απορροφούμενης δόσης (απορροφούμενη ενέργεια ανά μονάδα μάζας) είναι το 1 γκρέυ (Gray), το οποίο συμβολίζεται με Gy. Αν και η μονάδα που χρησιμοποιείται σήμερα για την ενέργεια είναι το 1 τζάουλ (Joule), 1 Gy είναι ίσο με την εναπόθεση 1 J ενέργειας ανά kg υλικού (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

Εφόσον 1 Gy = 1 J ανά χιλιόγραμμα ιστών και επειδή 1 J = $6,24 \cdot 10^{18}$ eV, αυτό σημαίνει ότι 1 Gy = $6,24 \cdot 10^{18}$ eV ανά χιλιόγραμμα ιστών (Βεργανελάκης et al., 1989).

Στο παρελθόν, αντί για το Gy, χρησιμοποιούνταν διαφορετική μονάδα μέτρησης, το rad, το οποίο ισοδυναμεί με 0,01 J ανά χιλιόγραμμα ιστών. Άρα:

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

Στην πράξη όμως, για την εκτίμηση των βιολογικών επιπτώσεων, χρησιμοποιούνται για ευκολία ορισμένα υποπολλαπλάσια του γκρέυ, μιας και το 1 Gy θεωρείται πολύ μεγάλη μονάδα (1 mGy = 0,001 Gy, 1 μGy = 0,000001 Gy).

Η απορροφούμενη ενέργεια, ωστόσο, δεν είναι ο μοναδικός παράγοντας που καθορίζει τις βιολογικές επιπτώσεις της ραδιενεργού ακτινοβολίας. Εξίσου σημαντικός θεωρείται και ο τύπος της ακτινοβολίας. Δεν επιφέρουν όλοι οι τύποι ακτινοβολίας στις ίδιες ποσότητες τις ίδιες επιπτώσεις. Αν για παράδειγμα μια συγκεκριμένη απορροφώμενη δόση από σωματίδια άλφα προκαλεί μια συγκεκριμένη βιολογική επίπτωση, τότε για να προκληθεί η ίδια βιολογική επίπτωση από ακτινοβολία γάμμα ή X, απαιτείται περίπου εικοσαπλάσια δόση. Εν ολίγοις, τα σωματίδια άλφα μπορούν να θεωρηθούν είκοσι φορές πιο δραστικά (ή επικίνδυνα) από τις ακτινοβολίες γάμμα ή X ως προς τις βιολογικές επιπτώσεις που μπορεί να προκύψουν (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

Για τον παραπάνω λόγο καθιερώθηκε επίσημα ο **συντελεστής στάθμισης W_R** . Πρόκειται για έναν καθαρό αριθμό, ο οποίος δίνει προσεγγιστικά τη σχετική βιολογική δραστηριότητα του εκάστοτε τύπου ακτινοβολίας σε σχέση με την βιολογική δραστηριότητα των ακτινοβολιών γάμμα ή X. Με άλλα λόγια, δηλαδή, ο εν λόγω συντελεστής υποδεικνύει πόσες φορές μεγαλύτερη από την απορροφώμενη δόση της εκάστοτε ακτινοβολίας πρέπει να είναι δόση ακτινοβολίας γάμμα ή X προκειμένου να επιτευχθεί η ίδια βιολογική επίπτωση. Από το προαναφερθέν παράδειγμα, συμπεραίνεται πως ο συντελεστής στάθμισης της ακτινοβολίας (σωματίδια) άλφα είναι $W_R = 20$ (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

Είδος ακτινοβολίας	Συντελεστής στάθμισης ακτινοβολίας W_R
Φωτόνια (χ και γ) όλων των ενεργειών	1
Ηλεκτρόνια	1
Πρωτόνια	2-5
Σωματίδια α, θραύσματα σχάσης, βαρέα ιόντα	20
Νετρόνια	5-20 ανάλογα την ενέργεια

Εικόνα 4: Συντελεστές στάθμισης W_R της ακτινοβολίας (EEAE, 2011)

Το γινόμενο του συντελεστή στάθμισης W_R επί την απορροφώμενη δόση (σε Gy) ονομάζεται **ισοδύναμη δόση** και ορίζεται ως εξής:

$$(\text{ισοδύναμη δόση}) = (\text{απορροφώμενη δόση}) \cdot W_R$$

Σε αντίθεση με την απορροφώμενη δόση, η μονάδα μέτρησης της ισοδύναμης δόσης είναι το 1 σίβερτ (Sievert), το οποίο συμβολίζεται με Sv και προκύπτει από την παραπάνω σχέση. Η διαφορά μεταξύ των δύο παραπάνω μονάδων μέτρησης είναι πως το Gy δηλώνει την ενέργεια που εναποθέτεται ανά χιλιόγραμμο ιστού από την ακτινοβολία ενώ το Sv αποτελεί μέτρο διακινδύνευσης από την εναπόθεση της ενέργειας (όσο αυξάνεται η διακινδύνευση, τόσο αυξάνεται και η ισοδύναμη δόση). Με βάση των παραπάνω πίνακα, για τα φωτόνια (ακτινοβολίες γάμμα και X) ισχύει ότι $W_R = 1$. Ως εκ τούτου, για τα φωτόνια το μέγεθος της απορροφούμενης δόσης (σε Gy) είναι ίσο με το μέγεθος της ισοδύναμης δόσης (σε Sv) (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

Ομοίως με το Gy, έτσι και το 1 Sv θεωρείται μεγάλη, μη πρακτική μονάδα. Για αυτόν το λόγο χρησιμοποιούνται υποπολλαπλάσια του ($1\text{mSv} = 0,001\text{ Sv}$, $1\mu\text{Sv} = 0,000001\text{ Sv}$, $1\text{nSv} = 0,001\mu\text{Sv}$). Αξίζει να αναφερθεί πως οι διακυμάνσεις της ετήσιας ατομικής δόσης που δέχεται ο άνθρωπος είναι της τάξης των $1000\mu\text{Sv}$ (Βεργανελάκης et al., 1989).

Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα, ο άνθρωπος είναι διαρκώς εκτεθειμένος σε πηγές φυσικής ραδιενέργειας. Μια εξ' αυτών είναι η ραδιενέργεια που εκπέμπεται από το ίδιο το περιβάλλον της Γης. Επομένως, δύο είναι τα δεδομένα: α) η έκθεση σε ακτινοβολία **γάμμα** που δέχεται ο ανθρώπινος οργανισμός οφείλεται σε εξωτερικές πηγές και όχι σε εσωτερικές και για αυτό ονομάζεται **εξωτερική έκθεση** και β) ο οργανισμός δέχεται ομοιογενώς αυτή την ακτινοβολία, με αποτέλεσμα η αντίστοιχη δόση να ονομάζεται **ολόσωμη δόση** (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

Ως μονάδα μέτρησης της εξωτερικής έκθεσης ορίζεται η ποσότητα της ακτινοβολίας η οποία παράγει ιόντα ολικού φορτίου 1 Coulomb (1 C) σε ένα χιλιόγραμμο αέρα (C kg^{-1}) (Βεργανελάκης et al., 1989).

Στο παρελθόν, για μονάδα μέτρησης της εξωτερικής έκθεσης χρησιμοποιούνταν το roentgen (R). Πιο συγκεκριμένα:

$$1\text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4}\text{ Coulomb ανά χιλιόγραμμο αέρα (C kg}^{-1}\text{)}$$

Έχει ήδη αναφερθεί στην εισαγωγή πως τα φυσικά ραδιοϊσότοπα και οι συγκεντρώσεις τους εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την γεωγραφία και το γεωλογικό υπόβαθρο του κάθε τόπου. Στην Ελλάδα και πιο συγκεκριμένα, στη Θεσσαλονίκη, ο ρυθμός της ολόσωμης ισοδύναμης δόσης που προέρχεται από εξωτερική έκθεση φυσικής ραδιενέργειας φτάνει τα 40 nSv h^{-1} . Από την άλλη, η αντίστοιχη δόση στην Αθήνα πέφτει στο μισό ενώ σε πόλεις όπως οι Σέρρες και η Καβάλα οι δόσεις αγγίζουν διπλάσιες τιμές (περίπου 80 nSv h^{-1}) (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

Παρ' όλ' αυτά, οι εκθέσεις σε ακτινοβολία και οι αντίστοιχες δόσεις τους δεν χαρακτηρίζονται μόνο ολόσωμες. Πέρα από την ολόσωμη δόση υπάρχει και η δόση μεμονωμένων ιστών ή οργάνων. Μια ορισμένη ποσότητα ισοδύναμης δόσης δεν έχει τις ίδιες επιπτώσεις και την ίδια διακινδύνευση για όλους τους ιστούς και τα όργανα. Για αυτόν το λόγο χρησιμοποιείται η **ενεργός δόση** ως μέτρο διακινδύνευσης για τα διάφορα όργανα και είδη ιστών και μετράται και αυτή σε σίβερτ. Η σχέση της με την ισοδύναμη δόση συνοψίζεται με τον παρακάτω τύπο:

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

όπου W_T ο συντελεστής στάθμισης για κάθε είδος ιστού ή όργανο. Για ολόσωμη δόση ο συντελεστής στάθμισης W_T είναι 1.

Ιστός	Συντελεστής W_T
Μυελός των οστών, κόλον, πνεύμονες, στομάχι, μαστός, επινεφρίδια, εξωθωρακική περιοχή, χοληδόχος, καρδιά, νεφροί, λεμφικοί αδένες, μύες, επιθήλιο στόματος, πάγκρεας, προστάτης, λεπτό έντερο, σπλήνας, θύμος αδένας, μήτρα / τράχηλος	0,12
Γονάδες	0,08
Ουροδόχος κύστη, οισοφάγος, ήπαρ, θυρεοειδής	0,04
Επιφάνεια οστών, εγκέφαλος, σιελογόνοι αδένες, δέρμα	0,01

Εικόνα 5: Συντελεστές στάθμισης W_T για την ενεργό δόση (ΕΕΑΕ, 2011)

1.8.2 Αρχές της ραδιοπροστασίας

Οι αρχές της ραδιοπροστασίας λειτουργούν ως ρυθμιστικά πλαίσια τα οποία εστιάζουν στην πρόληψη και την αποφυγή πρόκλησης βλάβης στην υγεία του ανθρώπου από ραδιενεργές πηγές, ακόμα και όταν αυτές χαρακτηρίζονται από κατώτατα επίπεδα δόσεων (Βεργανελάκης et al., 1989).

Πάνω από ένας αιώνας έρευνας και εμπειρίας στον τομέα της ραδιοπροστασίας διέπεται μέσα από μια σειρά βασικών αρχών:

1. Αρχή της τεκμηρίωσης

Βασικός άξονας της αρχής αυτής είναι η παραδοχή πως η έκθεση σε ακτινοβολία πρέπει να αποσκοπεί σε μεγαλύτερο όφελος παρά σε πιθανή βλάβη.

2. Αρχή της αριστοποίησης

Η επόμενη αρχή είναι γνωστή και ως «αρχή ALARA», δηλαδή «As Low As Reasonably Achievable» και προβλέπει τα μηχανήματα παραγωγής ακτινοβολιών να δίδουν την καλύτερη δυνατή ασφάλεια και προστασία, προκειμένου να αποφευχθεί η πιθανότητα έκθεσης.

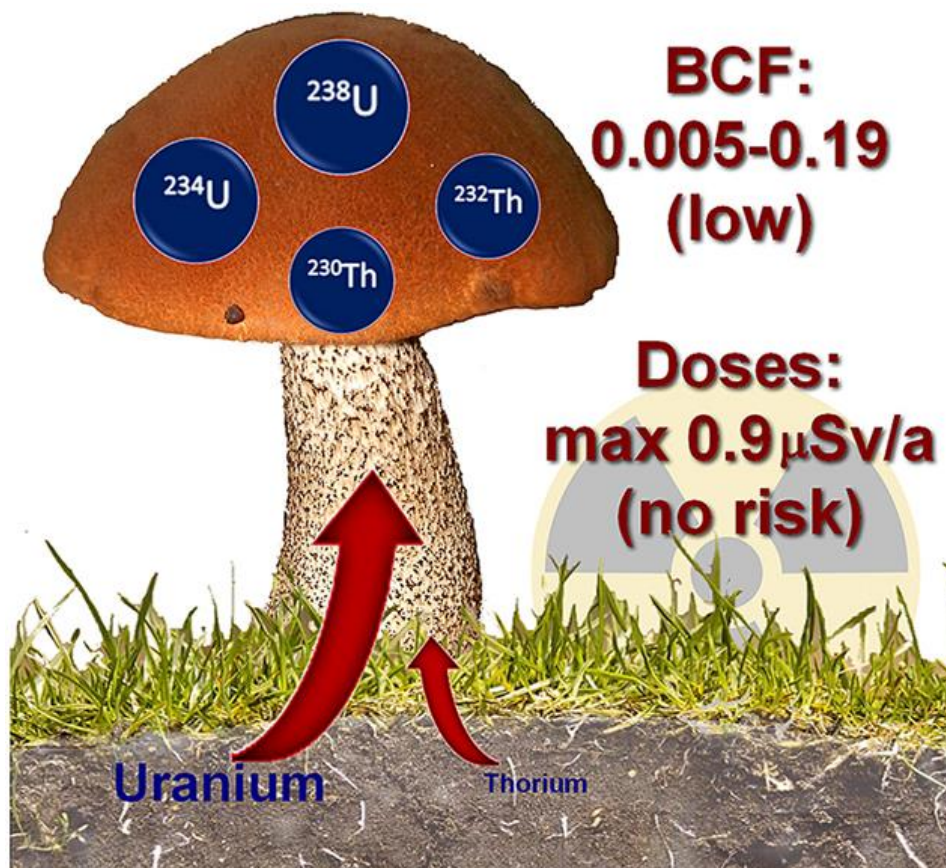
3. Αρχή του περιορισμού των δόσεων

Τέλος, η έκθεση σε ακτινοβολία δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει καθορισμένα όρια δόσεων ή όρια κινδύνων. Τα όρια αυτά απευθύνονται και εφαρμόζονται κυρίως σε όσους εκτίθενται σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες για επαγγελματικούς λόγους αλλά και στον ευρύτερο πληθυσμό της κάθε περιοχής.

1.9 Ραδιοοικολογία

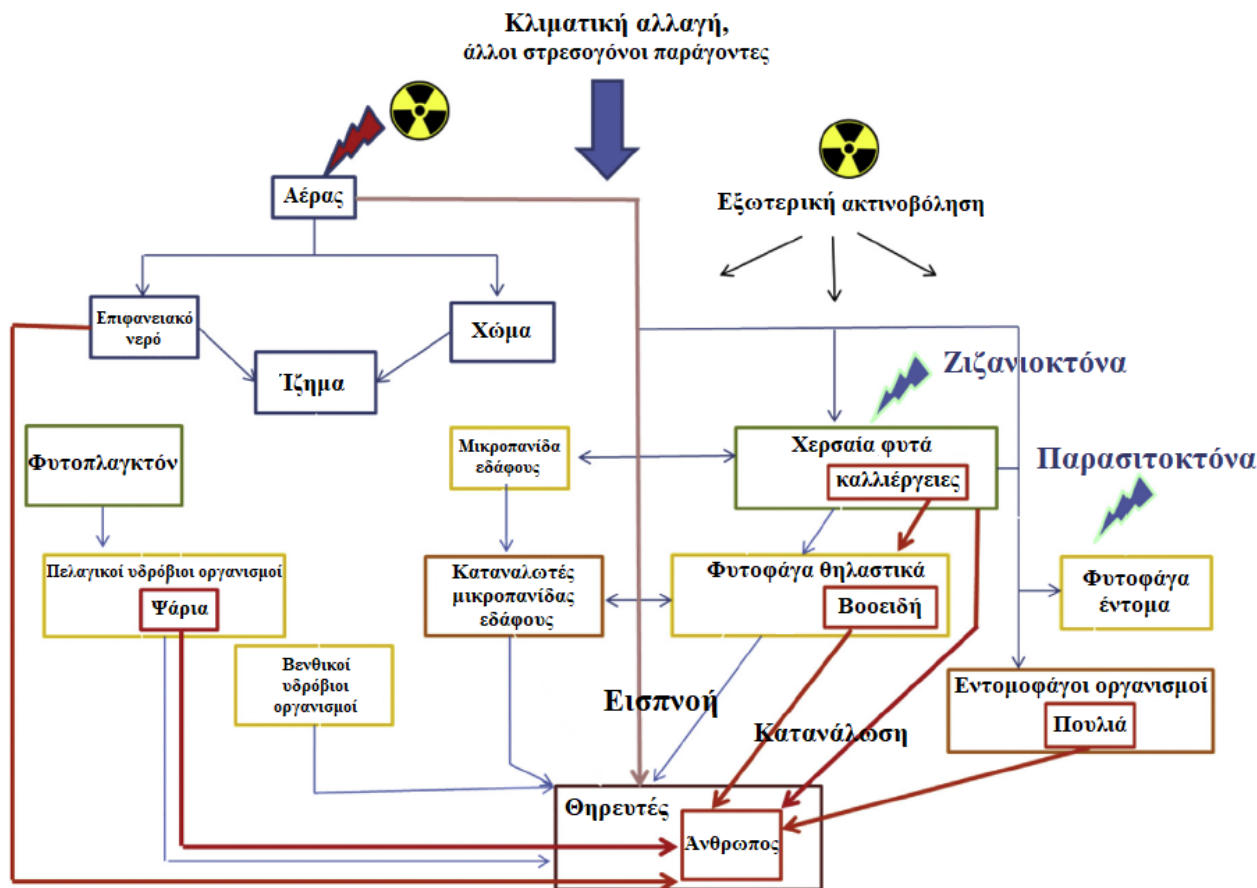
Η ραδιοοικολογία αποτελεί αντικείμενο το οποίο ειδικεύεται στη μελέτη της συμπεριφοράς και των συνεπειών των φυσικών και τεχνητών ραδιενεργών ισοτόπων σε διάφορους τύπους οικοσυστημάτων. Είναι ένα πεδίο που συνδυάζει μια πληθώρα άλλων επιστημών όπως η ραδιοχημεία, η αναλυτική χημεία, η οικολογία, η ραδιοβιολογία, η οικοτοξικολογία, η ραδιοοικοτοξικολογία και φυσικά η ραδιοπροστασία (Salbu, 2009).

Μέσω της τροφικής αλυσίδας, φυτά, ζώα και άνθρωποι έρχονται σε επαφή με φυσικά και τεχνητά ραδιοϊσότοπα, τα οποία αποτελούν μέρος της εσωτερικής ραδιενέργειας, καθώς καταλήγουν στο εσωτερικό των ζωντανών οργανισμών μέσω της αναπνοής ή της κατανάλωσης της τροφής. Σίγουρα, στο φαινόμενο συμβάλλουν τα πυρηνικά ατυχήματα και η πυρηνική βιομηχανία. Οργανισμοί όπως τα μανιτάρια μπορούν να μετατραπούν σε αποθήκες ραδιενεργών ισοτόπων όπως τα ^{234}U , ^{238}U , ^{230}Th , ^{232}Th , το πλουτώνιο και το ραδιενεργό καίσιο (Szymańska et al., 2020)



Εικόνα 6: Τα μανιτάρια προσλαμβάνουν μέσω του εδάφους ραδιενεργά ισότοπα του ουρανίου (^{234}U και ^{238}U) και ραδιενεργά ισότοπα του θορίου (^{230}Th , ^{232}Th) τα οποία στο τέλος θα καταλήξουν στον ανθρώπινο οργανισμό (Szymańska et al., 2020)

Η ραδιοοικολογία ήρθε στο προσκήνιο σαν εφαρμοσμένη επιστήμη με το τέλος του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, ως απάντηση στα πρώτα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκλήθηκαν από τις δοκιμές πυρηνικών όπλων. Λόγω της αυξανόμενης ανάγκης κατανόησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της ραδιενέργειας, ξεκίνησε μια «χρυσή εποχή» τις έρευνες και τις χρηματοδοτήσεις, κατά την περίοδο 1950 – 1965. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου ακμής, η ραδιοοικολογική έρευνα άνοιξε τον δρόμο προς νέες θεωρήσεις σχετικά τη μεταφορά των ραδιενεργών σωματιδίων στο γήινο οικοσύστημα, καθώς και τη πρόσληψη τους από τους έμβιους οργανισμούς. Οι οικολόγοι υιοθέτησαν αυτό το «καινούργιο» πεδίο, όχι μόνο λόγω των ευκαιριών για χρηματοδότηση αλλά και επειδή τα ραδιοϊσότοπα αποτέλεσαν εξαιρετικά χρήσιμα εργαλεία στην έρευνα πεδίου (Rhodes et al., 2020).



Εικόνα 7: Μοντελοποιημένο σενάριο που απεικονίζει την επίδραση της ραδιενέργειας σε συνδυασμό με άλλους στρεσογόνους παράγοντες (κλιματική αλλαγή, φυτοφάρμακα) στον άνθρωπο και στον υπόλοιπο έμβιο κόσμο (Bréchignac et al., 2016).

Όπως απεικονίζεται και στο παραπάνω σχεδιάγραμμα, η ραδιοοικολογία εκλαμβάνει την παρουσία ραδιενέργειας ως έναν ακόμα στρεσογόνο παράγοντα, όπως η κλιματική αλλαγή και η χρήση ζιζανιοκτόνων και άλλων χημικών στις καλλιέργειες. Αυτοί οι στρεσογόνοι παράγοντες επηρεάζουν τις αλληλεπιδράσεις των ζωντανών οργανισμών, τόσο μεταξύ τους, όσο και με το αβιοτικό περιβάλλον (Bréchignac et al., 2016).

1.10 Ραδιοχρονολόγηση

Μία αρκετά διαδεδομένη εφαρμογή της μέτρησης συγκεντρώσεων ραδιενεργών ισοτόπων είναι η ραδιοχρονολόγηση. Χρησιμοποιείται σε παλαιοντολογικές και αρχαιολογικές μελέτες με σκοπό τον προσδιορισμό της ακριβούς ηλικίας των δειγμάτων. Σε αντίθεση με την σχετική χρονολόγηση, η οποία επιχειρεί να συγκρίνει το μελετώμενο δείγμα με κάτι του οποίου η ηλικία είναι ήδη γνωστή (π.χ. γεωλογικούς σχηματισμούς), η ραδιοχρονολόγηση εντάσσεται στην απόλυτη χρονολόγηση και στηρίζεται στην ραδιενεργό διάσπαση των φυσικών ραδιοϊσοτόπων (Young & Freedman, 2004).

Τα ραδιενεργά ορυκτά που ενδέχεται να περιέχονται σε βράχους και απολιθώματα λειτουργούν σαν ένα είδος «γεωλογικού ρολογιού». Αυτή η τεχνική ονομάζεται «γεωχρονολόγηση». Συνοπτικά, μετρώντας την αναλογία μεταξύ μητρικών και θυγατρικών ισοτόπων, δύναται να καθοριστεί η

ακριβής ηλικία του δείγματος (Young & Freedman, 2004). Ωστόσο, λαμβάνοντας υπ' όψιν τους διάφορους τύπους πετρωμάτων, θεωρείται πολύ πιο εύκολο η ραδιοχρονολόγηση να εφαρμοστεί σε ηφαιστειακά πετρώματα από ότι στα ίδια τα απολιθώματα ή στα ιζήματα που τα περιβάλλουν (Currie & Padian, 1997).

Ένα αρκετά γνωστό παράδειγμα ραδιοχρονολόγησης είναι η χρονολόγηση με άνθρακα-14 (^{14}C). Η κοσμική ακτινοβολία που εισβάλλει στην γήινη ατμόσφαιρα από το διάστημα προκαλεί μια σειρά πυρηνικών αντιδράσεων, η οποία με τη σειρά της οδηγεί στη δημιουργία του ισότοπου ^{14}C . Το συγκεκριμένο ισότοπο προστίθεται στο διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) που υπάρχει στην ατμόσφαιρα και έπειτα προσλαμβάνεται από τα φυτά και εν γένει τα έμβια όντα. Κάθε έμβιος οργανισμός που πεθαίνει, παύει να προσλαμβάνει άνθρακα και ο ^{14}C που έχει αποθηκευτεί μέσα στα κύτταρα αρχίζει να διασπάται μέσω διάσπασης β⁻ προς τον πυρήνα ^{14}N . Ο ^{14}C έχει χρόνο ημιζωής 5.730 y. Η χρονολόγηση του φυτού επιτυγχάνεται μέσω της μέτρησης του ποσοστού του ισότοπου στα κατάλοιπα του οργανισμού. Παρ' όλ' αυτά, αν η χρονική κλίμακα που εξετάζεται είναι αρκετά μεγάλη και ο έμβιος οργανισμός που μελετάται έχει απολιθωθεί, η χρονολόγηση με ^{14}C δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος. Καθώς ο χρόνος υποδιπλασιασμού του είναι τα 5.730 y, η ραδιενεργός διάσπαση του πραγματοποιείται σχετικά γρήγορα εν συγκρίσει με τη χρονική κλίμακα που εξετάζεται/μελετάται. Έτσι η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε απολιθώματα ηλικίας μικρότερης των 75.000 ετών. Αντιθέτως, το ^{40}K , το οποίο εκπέμπει ακτινοβολία β, έχει χρόνο ημιζωής τα 1.25 δισεκατομμύρια έτη ($1.251 \cdot 10^9$ y) και χρησιμοποιείται ευρέως σε ορυκτά και πετρώματα (Young & Freedman, 2004).

Ομοίως/αντιστοίχως, κάθε ορυκτό απαιτεί διαφορετική μέθοδο ραδιοχρονολόγησης, ανάλογα με τον τύπο και την ηλικία του. Ειδικά σε επιστήμες όπως η στρωματογραφία, η παλαιοντολογία, η ιχθυολογία και η ταφονομία, αξιοποιείται μια πληθώρα διαφορετικών μεθόδων, με πιο διαδεδομένες τις χρονολογήσεις K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Rb-Sr και U-Pb (Currie & Padian, 1997).

Η χρονολόγηση K-Ar ήταν η πιο διαδεδομένη μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1990. Καλύπτει ένα χρονικό σκέλος της τάξεως των 3 εκατομμυρίων ετών, με ποσοστό σφάλματος 2-4%. Βασίζεται στη μέτρηση του φυσικού ραδιοϊσοτόπου ^{40}K , καθώς και του θυγατρικού προϊόντος του, ^{40}Ar . Πρόκειται για ασταθή νουκλίδια τα οποία υπάρχουν σε αφθονία στη λιθόσφαιρα, ειδικά σε πυροκλαστικά πετρώματα, σε βασάλτες και σε γλαυκωνίτες. Στα τέλη της δεκαετίας του 1980, η K-Ar άρχισε σταδιακά να αντικαθίσταται και, εν τέλει, ξεπεράστηκε εντελώς, από την χρονολόγηση με $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, η οποία θεωρήθηκε πιο ακριβής (ποσοστό σφάλματος λιγότερο από 0,5%). Η μέθοδος Rb-Sr θεωρείται, κατά κοινή παραδοχή, πιο χρονοβόρα και δαπανηρή. Καλύπτει ένα χρονικό εύρος μεγαλύτερο των 10 εκατομμυρίων ετών και εφαρμόζεται κυρίως σε εκρηξιγενή πετρώματα. Τέλος, η χρονολόγηση U-Pb έχει καθιερωθεί ως μια πρότυπη διαδικασία στο τομέα των ραδιοχρονολογήσεων και χρησιμοποιείται επί το πλείστον σε μεταμορφωσιγενή και εκρηξιγενή πετρώματα (Currie & Padian, 1997).

1.11 Φασματοσκοπία γάμμα

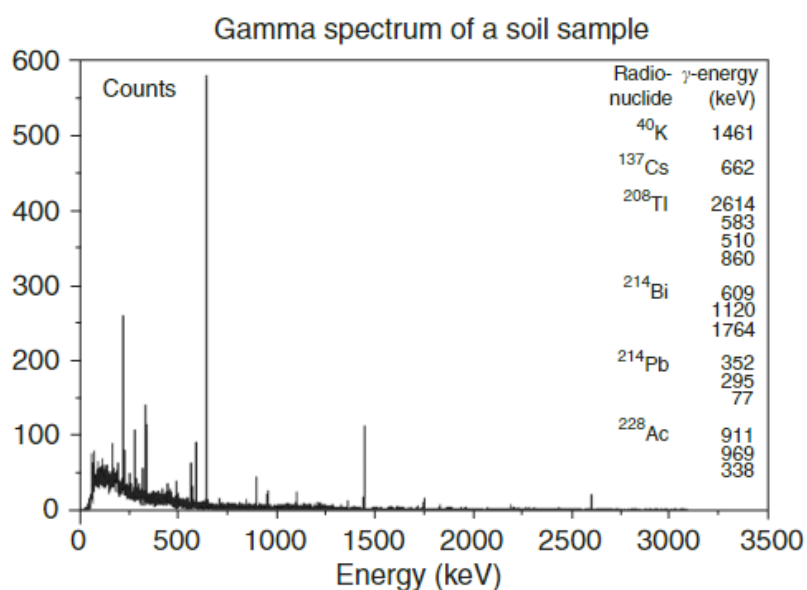
Εδώ και χρόνια, η φασματοσκοπία γάμμα, με τη χρήση υψηλής διακριτικής ικανότητας ανιχνευτών γερμανίου και πολυκαναλικών αναλυτών, έχει καθιερωθεί ως προτιμώμενη μέθοδος μέτρησης φυσικής και τεχνητής ραδιενέργειας (Smith and Nordberg, 2015). Χρησιμοποιείται για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των ραδιοϊσοτόπων που εκπέμπουν ακτινοβολία γάμμα. Αποτελεί ισχυρό

και αξιόπιστο εργαλείο καθώς είναι γνωστό πως τα περισσότερα ισότοπα απελευθερώνουν ακτινοβολία γάμμα κατά τη μετατροπή τους σε σταθερά προϊόντα διάσπασης (Buchtela, 2005).

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται και στην πυρηνική ιατρική με σκοπό την παραγωγή και χορήγηση ραδιοφαρμάκων (φαρμακευτικά σκευάσματα τα οποία περιέχουν ραδιενεργούς πυρήνες). Στοχεύει στη μέτρηση της καθαρότητας των ραδιοϊσοτόπων που περιέχονται στα ραδιοφάρμακα. Η καθαρότητα ραδιοϊσοτόπων ισούται με τον λόγο, ο οποίος εκφράζεται ως ποσοστό, της ραδιενέργειας του εκάστοτε ισότοπου ως προς της συνολική ραδιενέργεια της πηγής (Gillings, 2021).

Τα πλεονεκτήματα της φασματοσκοπίας γάμμα είναι τα εξής:

- Η προετοιμασία των δειγμάτων που προορίζονται για ανάλυση είναι αρκετά απλή και στις περισσότερες περιπτώσεις ο ραδιοχημικός διαχωρισμός (καθίζηση, εκχύλιση, εξάτμιση και χρωματογραφία) δεν είναι απαραίτητος.
- Είναι χρήσιμη μέθοδος για τον προσδιορισμό ραδιενέργειας περιβάλλοντος και για την ανάλυση μικρών ποσοτήτων ραδιενεργών υλικών
- Τα δεδομένα που συλλέγονται από τα ανιχνευτικά συστήματα είναι κατάλληλα για επεξεργασία σε υπολογιστή και για τον σχεδιασμό συστημάτων αυτόματης ανάλυσης
- Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται στην φασματοσκοπία ακτίνων γάμμα, αν και ακριβοί, διατίθενται στο εμπόριο με εγγύηση απόδοσης, ασφάλειας και διασφάλισης ποιότητας.



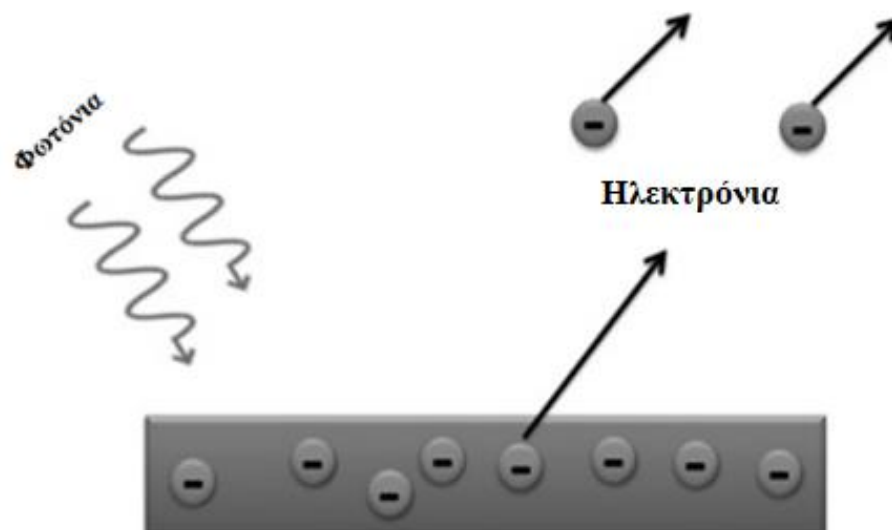
Εικόνα 8: Τυπικό φάσμα ακτινοβολίας γάμμα που ελήφθη από δείγμα χώματος. Στο φάσμα απεικονίζονται φυσικά ραδιοϊσότοπα του Ουρανίου και του Θορίου αλλά και ^{137}Cs στα 662 keV, προερχόμενο από το πυρηνικό ατύχημα του Τσερνόμπιλ. Η δειγματοληψία έγινε στην Βιέννη της Αυστρίας (Buchtela, 2005).

1.11.1 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας – ύλης

Αν και η φασματοσκοπία γάμμα ως μέθοδος θεωρείται εύκολη και εύχρηστη, τα λαμβανόμενα φάσματα της ακτινοβολίας γάμμα είναι αρκετά περίπλοκα και η σωστή ερμηνεία των χαρακτηριστικών τους απαιτεί σημαντικές γνώσεις και ικανότητες. Για παράδειγμα, η κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ ακτινοβολίας και ύλης κρίνεται αναγκαία καθώς κατά τη διάρκεια τέτοιων μετρήσεων λαμβάνουν χώρα τρεις κύριοι μηχανισμοί (Buchtela, 2005). Οι μηχανισμοί αυτοί είναι:

- **Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο**

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι πιθανότερο να συμβεί αν η ενέργεια του φωτονίου είναι χαμηλή ($< 50 \text{ keV}$ για νερό ή μαλακό ιστό) (ΕΕΑΕ, 2011). Το φωτόνιο χαμηλής ενέργειας αλληλοεπιδρά με το ηλεκτρόνιο κάποιου ατόμου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ηλεκτρόνιο να απορροφήσει την ενέργεια του φωτονίου και να εξαχθεί από το άτομο του ως «φωτοηλεκτρόνιο». Η διαδικασία αυτή ξεκινάει όταν το φωτόνιο μεταδώσει όλη την κινητική του ενέργεια σε κάποιο από τα ηλεκτρόνια του ατόμου. Το φωτοηλεκτρόνιο που παράγεται, έχοντας αποκτήσει πλέον την κινητική ενέργεια που είχε το φωτόνιο προτού συγκρουστεί με το άτομο, συγκρούεται και αυτό με τη σειρά του με άλλα ατομικά ηλεκτρόνια. Κάθε νέα τέτοια σύγκρουση στοιχίζει ενέργεια στο φωτοηλεκτρόνιο, το οποίο τη μεταφέρει στα επόμενα ηλεκτρόνια και το ίδιο αρχίζει να επιβραδύνει. Μέχρι το φωτοηλεκτρόνιο να χάσει όλη την κινητική του ενέργεια, έχει παραχθεί μεγάλος αριθμός ζευγών θετικών ιόντων και ελεύθερων ηλεκτρονίων, με αποτέλεσμα το υλικό να ιοντιστεί (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004). Συνήθως, κατά τη διάρκεια του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, παρατηρείται εκπομπή ακτινών X και ηλεκτρονίων Auger (ηλεκτρόνια που εκπέμπονται όταν ένα ηλεκτρόνιο από υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο πέσει στο κενό σε κάποια εσωτερική στοιβάδα) (Shultis and Faw, 2002).



Σχήμα 5: Σχηματική απεικόνιση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου (Marghany, 2020).

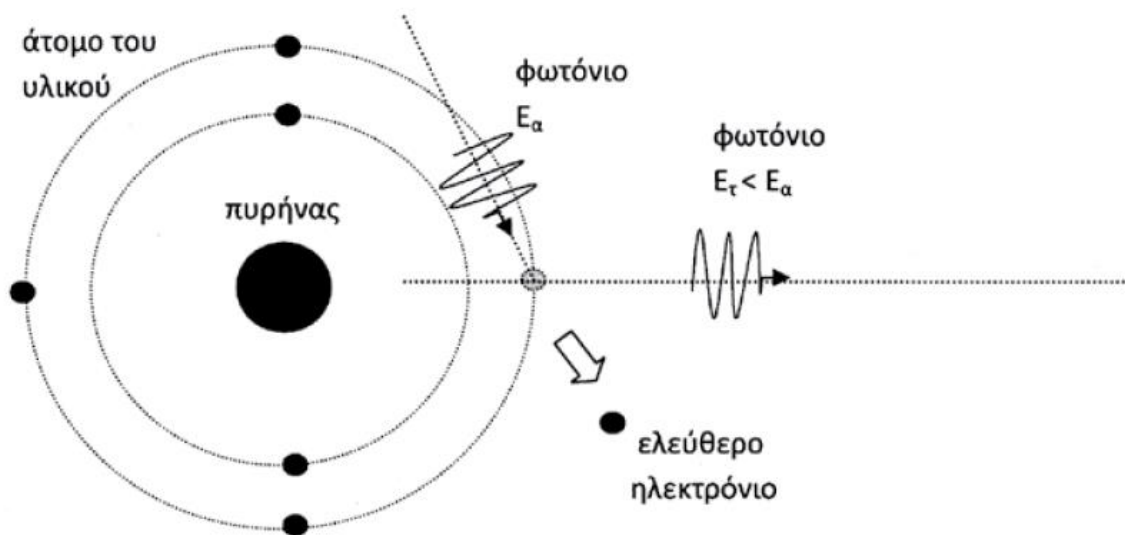
Η πιθανότητα να σημειωθεί φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι ανάλογη του ατομικού αριθμού του στοιχείου/υλικού που απορροφάει την ακτινοβολία και αντιστρόφως ανάλογη της ενέργειας της ακτινοβολίας γάμμα. Με άλλα λόγια, όσο πιο υψηλός ο ατομικός αριθμός του υλικού και όσο πιο χαμηλή η ενέργεια της ακτινοβολίας, τόσο πιο συχνά συμβαίνει το φαινόμενο (Buchtela, 2005).

- **Η σκέδαση Compton**

Σε αντίθεση με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η σκέδαση Compton πραγματοποιείται όταν η ενέργεια του φωτονίου είναι σχετικά υψηλή ($> 50 \text{ keV}$ για νερό ή μαλακό ιστό) (ΕΕΑΕ, 2011). Η συχνότητα του φαινομένου εξαρτάται και από τον ατομικό αριθμό του υλικού, καθώς όσο πιο

μεγάλος ο ατομικός αριθμός, τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα να συμβεί σκέδαση (Buchtela, 2005). Παρομοίως, όμως, και σε αυτή τη περίπτωση παρατηρείται σύγκρουση ανάμεσα σε ένα φωτόνιο και σε ένα ηλεκτρόνιο. Η λέξη «σκέδαση» οφείλεται στο γεγονός ότι τα δύο σωματίδια συγκρούονται και σκεδάζονται (σκορπίζονται) σαν δύο μπάλες μπιλιάρδου (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004). Λόγω της σύγκρουσης, το φωτόνιο εκτρέπεται κι αλλάζει διεύθυνση. Η γωνία σκέδασης μπορεί να είναι από μερικές μοίρες έως και 180° και σε αυτή τη περίπτωση σημειώνεται οπισθοσκέδαση, όπου το φωτόνιο φεύγει προς τα πίσω (ΕΕΑΕ, 2011).

Εφόσον το φωτόνιο εκτρέπεται από την αρχική τροχιά του, όπως και στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, χάνει ενέργεια και τη μεταφέρει στο ηλεκτρόνιο. Συνεπώς, το σκεδασμένο ηλεκτρόνιο αποκτά μεγάλη κινητική ενέργεια και κινείται με υψηλή ταχύτητα, αλληλοεπιδρώντας στη πορεία με τα ηλεκτρόνια των ατόμων του υλικού. Στο τέλος, καθώς χάνει όλο και περισσότερη ενέργεια λόγω των συνεχών συγκρούσεων, επιβραδύνεται, έχοντας δημιουργήσει μεγάλο αριθμό ζευγών θετικών ιόντων και ελεύθερων ηλεκτρονίων. Και σε αυτό το φαινόμενο παρατηρείται ιοντισμός του υλικού από εισερχόμενα φωτόνια (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).



Σχήμα 6: Σχηματική απεικόνιση της σκέδασης Compton (ΕΕΑΕ, 2011).

Τα σκεδασμένα ηλεκτρόνια ονομάζονται και ηλεκτρόνια Compton και εντάσσονται στο φάσμα της ακτινοβολίας γάμμα. Λόγω των διαφόρων διευθύνσεων σκέδασης, τα ηλεκτρόνια Compton παρουσιάζουν ένα μεγάλο εύρος κατανομής ενεργειών (Buchtela, 2005).

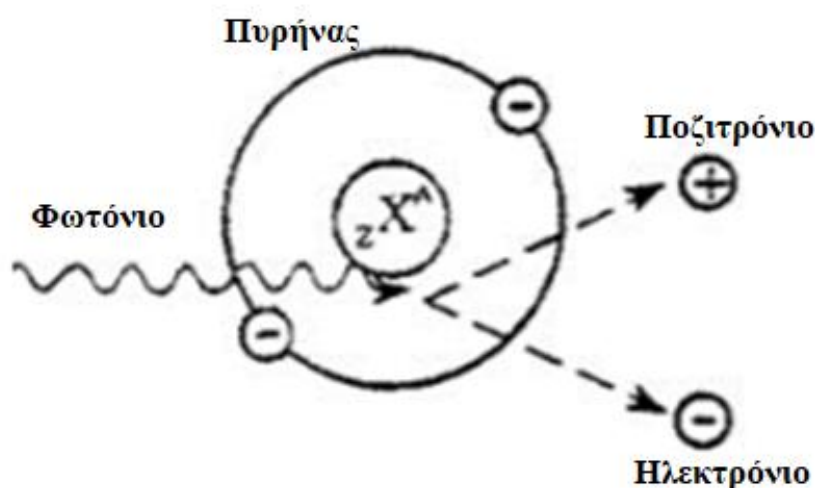
- **Η δίδυμη γένεση**

Η δίδυμη γένεση (ή αλλιώς δημιουργία ζεύγους) θεωρείται ο πιο εντυπωσιακός μηχανισμός αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας – ύλης. Λόγω της μάζας του ηλεκτρονίου, η ενέργεια του φωτονίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 1,02 MeV (δηλαδή 1022 keV) προκειμένου να πραγματοποιηθεί δίδυμη γένεση. Σε αντίθεση με τους δύο προηγούμενους μηχανισμούς, όπου η αλληλεπίδραση

συνέβαινε μεταξύ φωτονίων και ηλεκτρονίων του ατόμου του υλικού, στη δίδυμη γένεση η αλληλεπίδραση εντοπίζεται μεταξύ του φωτονίου και του πυρήνα του ατόμου (ΕΕΑΕ, 2011).

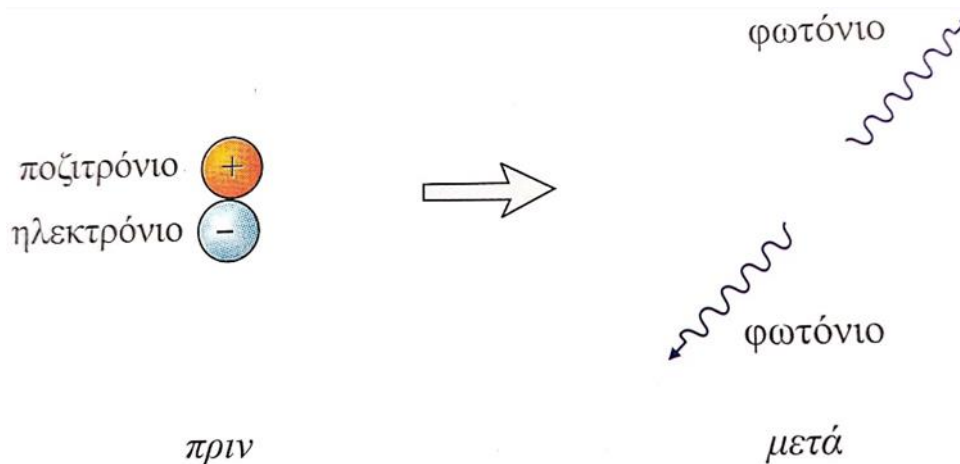
Μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο του πυρήνα, λοιπόν, τα φωτόνια θα υποστούν μια ριζική μετατροπή καθώς θα εξαφανιστούν και την θέση τους θα πάρουν ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια. Επομένως αυτό που ακολουθεί είναι μετατροπή μέρους της ενέργειας (φωτόνιο) σε μάζα (ηλεκτρόνιο και ποζιτρόνιο). Η υπόλοιπη ενέργεια του φωτονίου μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου και του ποζιτρονίου. Είναι ο μόνος μηχανισμός αλληλεπίδρασης όπου η φωτεινή ενέργεια μετατρέπεται σε μάζα υλικών σωματιδίων (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

Ομοίως με τους δύο προηγούμενους μηχανισμούς, και στη δίδυμη γέννηση προκαλείται ιοντισμός του υλικού. Εφόσον τα ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια κινούνται με μεγάλη ταχύτητα (χάρη στην μεγάλη κινητική ενέργεια που έλαβαν από τα φωτόνια), αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρόνια των ατόμων του υλικού και, καθώς επιβραδύνονται και κάποια στιγμή σταματάνε, παράγουν μεγάλο αριθμό ιόντων και ελευθέρων ηλεκτρονίων. Με αυτόν τον τρόπο επέρχεται ιοντισμός του υλικού (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).



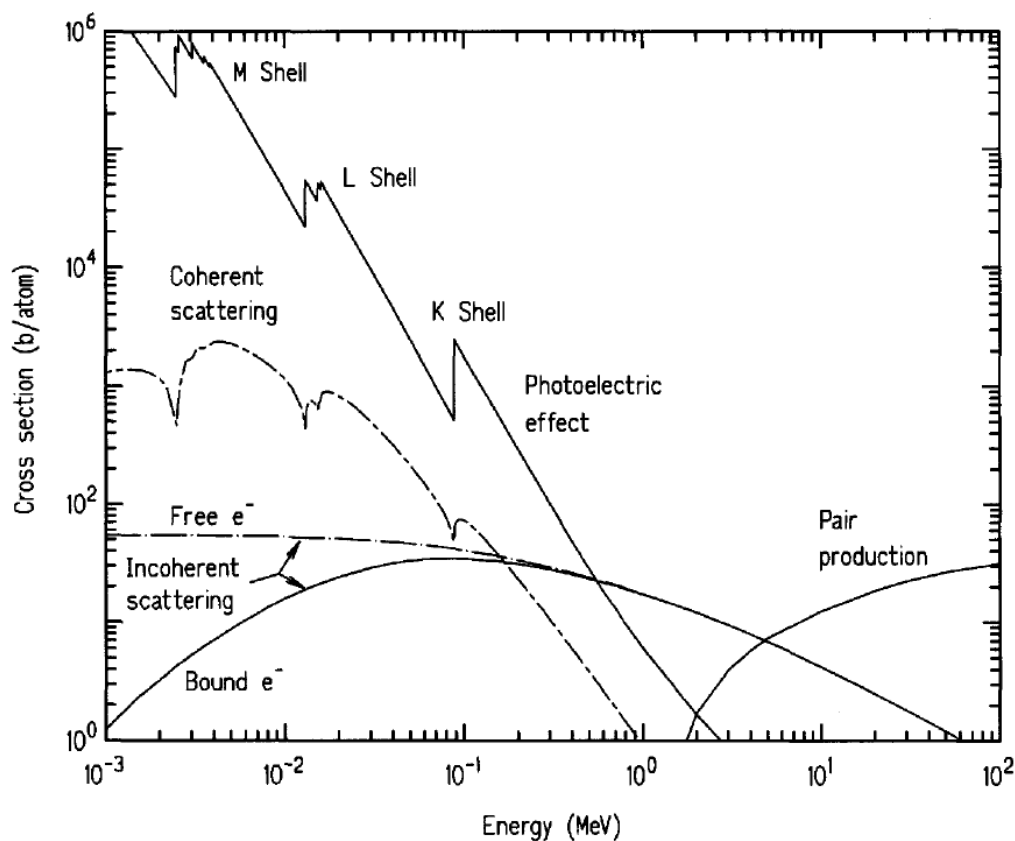
Σχήμα 7: Σχηματική απεικόνιση της δίδυμης γένεσης (Ζορμπά, 2019)

Ωστόσο, ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης δε σταματάει σε αυτό το σημείο. Μόλις το ποζιτρόνιο αρχίσει να επιβραδύνει και έρθει σε επαφή με ένα ηλεκτρόνιο του υλικού, τα δύο σωματίδια θα ενωθούν μέσω σύντηξης, θα εξαϋλωθούν και στη θέση τους θα εμφανιστεί ένα ζεύγος φωτονίων, με την ενέργεια τους να προέρχεται από την μάζα των δύο εξαφανισμένων σωματιδίων. Παρατηρείται, συνεπώς, η αντίστροφη διαδικασία που συμβαίνει κατά τη δίδυμη γένεση. Ενώ στη δίδυμη γένεση πραγματοποιείται μετατροπή φωτεινής ενέργειας σε μάζα, στην εξαύλωση γίνεται μετατροπή μάζας σε φωτεινή ενέργεια (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).



Σχήμα 8: Σχηματική απεικόνιση της εξαύλωσης (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

Εν συντομία, η πιθανότητα να αλληλεπιδράσει η ακτινοβολία με την ύλη και ο τρόπος με τον οποίο αυτό θα συμβεί εξαρτώνται, κατά κύριο λόγο, από την ενέργεια του φωτονίου και τον ατομικό αριθμό Z υλικού. Η αλληλεπίδραση ακτινοβολίας - ύλης αποτελεί, δηλαδή, στατιστικό γεγονός (ΕΕΑΕ, 2011).



Εικόνα 9: Σύγκριση φωτοηλεκτρικού φαινομένου, σκέδασης Compton και δίδυμης γένεσης σε ενεργό διατομή αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας - ύλης συναρτήσει της ενέργειας (Shultis and Faw, 1996)

1.12 Ανιχνευτικά συστήματα και διατάξεις

Υπάρχουν ανιχνευτικά συστήματα διαφόρων ειδών. Ωστόσο όλα τους έχουν κάποιες συγκεκριμένες ομοιότητες ως προς τη δομή και τη λειτουργία τους. Ένα φασματόμετρο ακτινών γάμμα, για παράδειγμα, αποτελείται από έναν ανιχνευτή, ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα για τη μέτρηση των ψηφιακών παλμών και μια μονάδα για την αποθήκευση, την επεξεργασία και την απεικόνιση των δεδομένων. Πιο αναλυτικά, ο ανιχνευτής είναι ένα εργαλείο που παρέχει τους ψηφιακούς παλμούς, οι οποίοι στην ουσία είναι ηλεκτρικά σήματα. Τα σήματα αυτά εξαρτώνται από την ενέργεια, δηλαδή το μήκος κύματος, και τον αριθμό των φωτονίων γάμμα που έχουν εντοπιστεί. Ο ανιχνευτής συνδέεται με ένα σύστημα το οποίο διαμορφώνει, μετράει και ταξινομεί τους παλμούς, ανάλογα με το ύψος τους. Ως εκ τούτου, τα ηλεκτρικά σήματα μετατρέπονται σε φάσμα. Αυτό το φάσμα απεικονίζει τον αριθμό και την κατανομή της ενέργειας των φωτονίων γάμμα και μπορεί να αποθηκευτεί για μελλοντική μελέτη και επεξεργασία από κατάλληλα υπολογιστικά συστήματα (Buchtela, 2005).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω δύο ανιχνευτές.

1.12.1 Ανιχνευτής κρυστάλλου υπερκαθαρού γερμανίου (High purity Germanium – HPGe)

Ο ανιχνευτής υπερκαθαρού Γερμανίου συγκαταλέγεται στην κατηγορία των ανιχνευτών ημιαγωγών (Παππά, 2014). Ο τρόπος ανίχνευσης της ακτινοβολίας, διεξάγεται στο εσωτερικό ενός κρυστάλλου από γερμάνιο. Στο μεγαλύτερο κομμάτι του κρυστάλλου υπάρχει πλεόνασμα οπών (ελεύθερων θέσεων ηλεκτρονίων), όσο για το υπόλοιπο τμήμα του κρυστάλλου υπάρχει πλεόνασμα ηλεκτρονίων εσωτερικά της κρυσταλλικής δομής (Λεοντάρης, 2020).

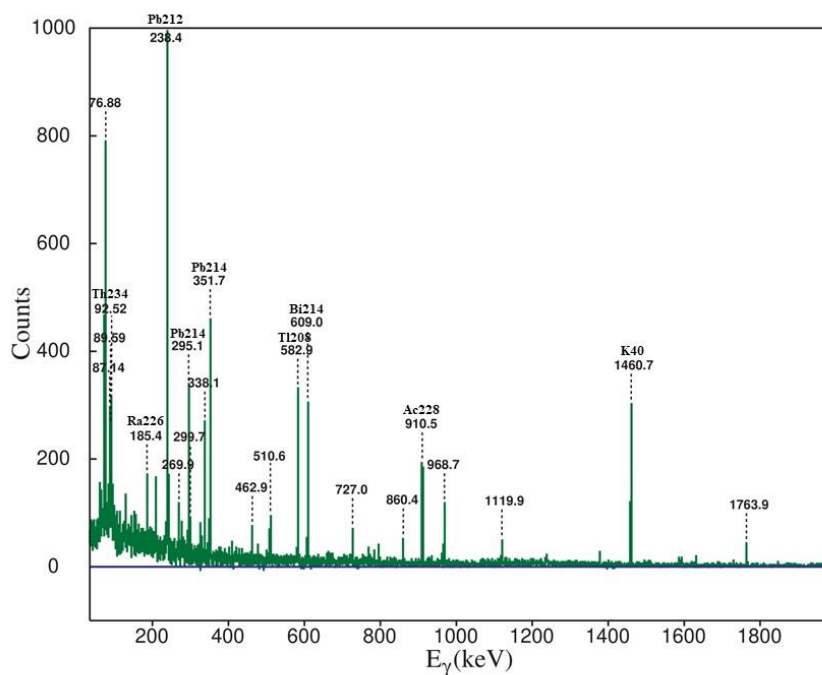
Όταν οι δύο περιοχές πλεονάσματος και ελλείματος ηλεκτρονίων έρθουν σε επαφή, μετακινούνται τα ηλεκτρόνια από την περιοχή όπου υπάρχει πλεόνασμα προς την περιοχή του ελλείματος με σκοπό την κάλυψη των δημιουργημένων οπών. Η κίνηση αυτή συμβάλει ώστε να μην υπάρχουν οπές και ελεύθερα ηλεκτρόνια στον κρύσταλλο έτσι ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία περιττών ρευμάτων. Αυτή η περιοχή έχει την ονομασία περιοχή απεμπλουτισμού. Η περιοχή απεμπλουτισμού είναι μείζονος σημασίας σχετικά με την ανίχνευση της ακτινοβολίας γάμμα καθώς κατά την εισαγωγή ενός φωτονίου σε αυτή, το φωτόνιο θα αλληλοεπιδράσει με τα άτομα του γερμανίου με αποτέλεσμα την απελευθέρωση ηλεκτρονίων. Για την ανίχνευση των ηλεκτρονίων όπως και την αύξηση της περιοχής απεμπλουτισμού τίθεται σε εφαρμογή μεγάλη ανάστροφη τάση. Πιο συγκεκριμένα η ανάστροφη τάση έλκει άλλα ηλεκτρόνια στο εσωτερικό της περιοχής, δημιουργώντας πλήρη κάλυψη των οπών σε ολόκληρο τον κρύσταλλο έχοντας ως αποτέλεσμα την μετατροπή του κρυστάλλου σε ανιχνευτή ακτινοβολίας γάμμα (Λεοντάρης, 2020).



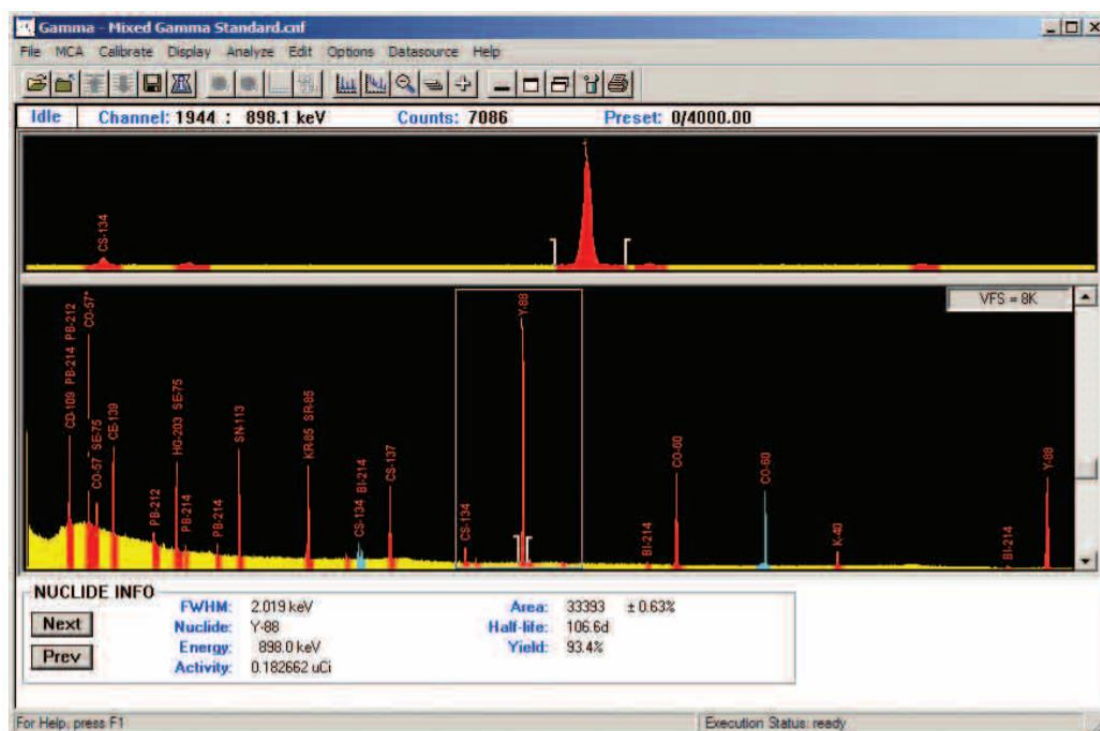
Εικόνα 10: Ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου που διαθέτει το εργαστήριο Ακτινοβολιών του Τμήματος Περιβάλλοντος, μοντέλο θωράκισης 747/747E, Model 7415 (Mirion, 2016).

Ένα από τα πλεονεκτήματα του ανιχνευτή καθαρού γερμανίου (HPGe) είναι η δυνατότητα να λειτουργεί σε θερμοκρασίες δωματίου. Ωστόσο το εσωτερικό του ανιχνευτή υποχρεωτικά πρέπει να λειτουργεί σε θερμοκρασιακό περιβάλλον κοντά στους -200°C (Παππά, 2014). Αν ο ανιχνευτής δεν βρίσκεται σε αυτές τις θερμοκρασίες, τα ηλεκτρόνια, λόγω των θερμικών κινήσεων, προκαλούν «θόρυβο» στο μετρούμενο σήμα. Σε συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών καθίσταται δυνατή η ανίχνευση ακόμα και ελάχιστου αριθμού ηλεκτρονίων που θα καταφέρουν να διαφύγουν από το πλέγμα χάρις στην αλληλεπίδραση τους με τα φωτόνια, με αποτέλεσμα την επιτάχυνση τους προς τον συλλέκτη λόγω της μεγάλης διαφοράς δυναμικού (Λεοντάρης, 2020).

Η απόδοση των νεότερων ανιχνευτών HPGe πλησιάζει ή και ξεπερνά το 100%. Ακόμα, οι ανιχνευτές καθαρού γερμανίου δεν έχουν ευαισθησία στα μαγνητικά πεδία, με το μόνο βασικό μειονέκτημα τους να είναι το κόστος παραγωγής τους (Παππά, 2014).



Εικόνα 11: Απεικόνιση φάσματος δείγματος εδάφους που λήφθηκε στην παρούσα εργασία από τον ανιχνευτή HPGe του εργαστηρίου. Στο φάσμα απεικονίζονται οι ενέργειες των φωτοκορυφών και κατ' επέκταση των ισοτόπων που αναλύθηκαν.



Εικόνα 12: Απεικόνιση περιβάλλοντος ηλεκτρονικού προγράμματος "Genie 2000 Basic Spectroscopy Software" του ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου HPGe (Canberra, 2000), με το οποίο πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των φασμάτων.

1.12.2 Ανιχνευτές σπινθηρισμού

Οι πυροτεχνικές ή φθορίζουσες ενώσεις είναι υλικά που, όταν απορροφούν ενέργεια από ιοντίζουσα ακτινοβολία, εκπέμπουν φως. Επομένως, οι ανιχνευτές σπινθηρισμού αλληλεπιδρούν με την ιοντίζουσα ακτινοβολία μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου και μετατρέπουν την ενέργεια που απορροφούν σε ορατό φως. Το ορατό φως συλλέγεται και μετατρέπεται σε ηλεκτρικά σήματα από ειδικές συσκευές που ονομάζονται σωλήνες φωτοπολλαπλασιαστή.

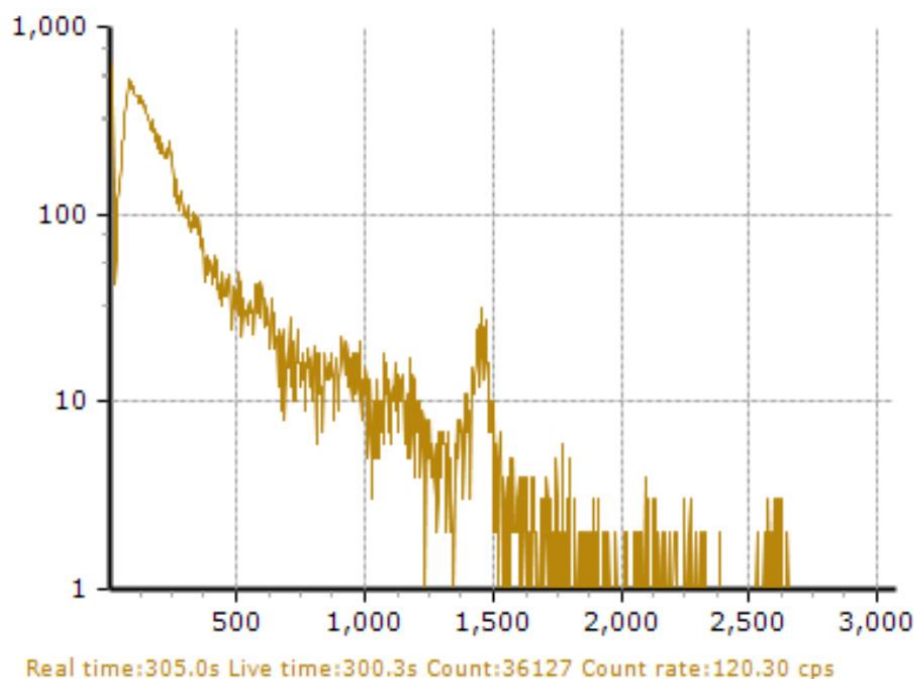
Το υλικό του σπινθηριστή που απαιτείται για έναν καλό ανιχνευτή μπορεί να είναι οργανικό ή ανόργανο (συνηθέστερα) και πρέπει να χαρακτηρίζεται από διαφάνεια, διαθεσιμότητα μεγάλου μεγέθους και υψηλή απόδοση φωτός, ανάλογα με την ενέργεια των ακτινών γάμμα. Υπάρχουν σχετικά λίγα διαθέσιμα υλικά συμβατά για ανιχνευτές. Παραδείγματα οργανικών σπινθηριστών είναι το ανθρακένιο, τα πλαστικά και τα υγρά.

Οι πιο συνηθισμένοι ανόργανοι σπινθηριστές είναι το ιωδιούχο νάτριο (NaI), το ιωδιούχο καίσιο (CsI), ο θειούχος ψευδάργυρος (ZnS) και το ιωδιούχο λίθιο (LiI). Οι πιο γνωστοί ανιχνευτές σπινθηρισμού είναι τα στερεά και το πιο δημοφιλές υλικό είναι οι κρύσταλλοι ιωδιούχου νατρίου που περιέχουν πρόσμειξη θαλλίου (NaI(Tl)). Το NaI είναι το κύριο υλικό για την ανίχνευση γάμμα επειδή έχει καλή απόδοση στη μέτρηση και είναι σχετικά φθινό. (Reilly et al., 1991).

Διατίθεται σε μεγέθη διαμέτρου 3,8-45 cm και πάχους 1,3-13 cm, ενώ παρουσιάζει ικανοποιητική πυκνότητα ($3,67 \text{ g cm}^{-3}$) για την απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε συνδυασμό με την παρουσία ιωδίου υψηλού ατομικού βάρους ($Z = 53$) και θαλλίου, κατάλληλο για καλή παραγωγή φωτονίων (~ 1 λάμψη ανά ακτινοβολία 30 eV) με ελάχιστη αυτοαπορρόφηση φωτονίων (Ανδρουλακάκη, 2013). Ένας αντίστοιχος ανιχνευτής σπινθηρισμού, μοντέλο MIRION Technologies SpiR-ID, χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 13: Φορητός ανιχνευτής τύπου NaI, SpiR-ID Handheld Detection and Identification που διαθέτει το Εργαστήριο Ποιότητας Υδάτων και Αέρα (ΕΠΥΑ) του Τμήματος Περιβάλλοντος.



Εικόνα 14: Απεικόνιση φάσματος δείγματος εδάφους που λήφθηκε στην παρούσα εργασία από ανιχνευτή σπινθηρισμού Spir-ID.

2. Μεθοδολογία

Στο παρακάτω κεφάλαιο ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή του γεωλογικού υποβάθρου της ανατολικής Λέσβου, σε περιοχές της οποίας έλαβαν χώρα περίπου 80 δειγματοληψίες χώματος (20 δείγματα χώματος) και 10 δειγματοληψίες άμμου (10 δείγματα άμμου). Στη συνέχεια παρατίθεται η λεπτομερής διαδικασία κατά την οποία ελήφθησαν τα δείγματα και αργότερα επεξεργάστηκαν προκειμένου να προσδιοριστούν οι συγκεντρώσεις των φυσικών ραδιοϊσοτόπων. Η προετοιμασία και η μέτρηση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ποιότητας Υδάτων και Αέρα του Τμήματος Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Αιγαίου.

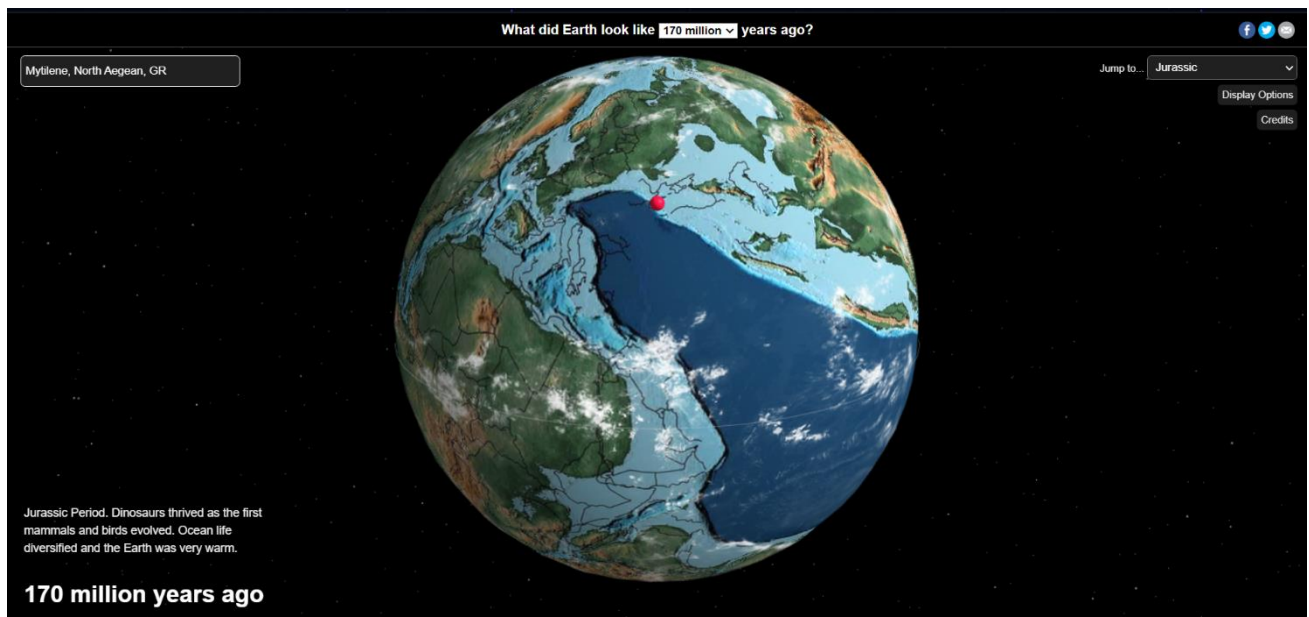
2.1 Περιοχή μελέτης

Η νήσος Λέσβος αποτελεί το τρίτο σε μέγεθος νησί της Ελλάδας, με την έκταση της να αγγίζει τα 1630 km². Βρίσκεται στο βορειοανατολικό Αιγαίο, απέναντι από τις ακτές της Τουρκίας. Από πλευρά γεωμορφολογίας, η Λέσβος, η οποία εντάσσεται στη Πελαγονική Ζώνη, παρουσιάζει αρκετά έντονη ανομοιογένεια στο ανάγλυφο της, με υψομετρικές διαφορές και μεταπτώσεις, αποτελέσματα της σημαντικής νεοτεκτονικής δραστηριότητας της (Θωμαΐδου, 2009).

Στο παρελθόν έχουν πραγματοποιηθεί από το ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών) δύο επίσημες χαρτογραφήσεις σε κλίμακα 1:50 000 με στόχο την μελέτη της γεωλογικής σύστασης και δομής του νησιού (Θωμαΐδου, 2009).

Τα δείγματα που συλλέχθηκαν για την παρούσα εργασία προήλθαν αποκλειστικά από εδάφη και παραλίες της ανατολικής Λέσβου. Με τη βοήθεια γεωλογικού χάρτη, διαπιστώθηκε ότι το χερσαίο έδαφος σε συγκεκριμένες τοποθεσίες αντιστοιχεί σε γεωλογικούς σχηματισμούς με τις ηλικίες να

χρονολογούνται κυρίως κατά την Λιθανθρακοφόρο και Πέρμια περίοδο του Παλαιοζωικού Αιώνα ή την Πρώιμη Τριαδική και ίσως και Ιουρασική του Μεσοζωικού.



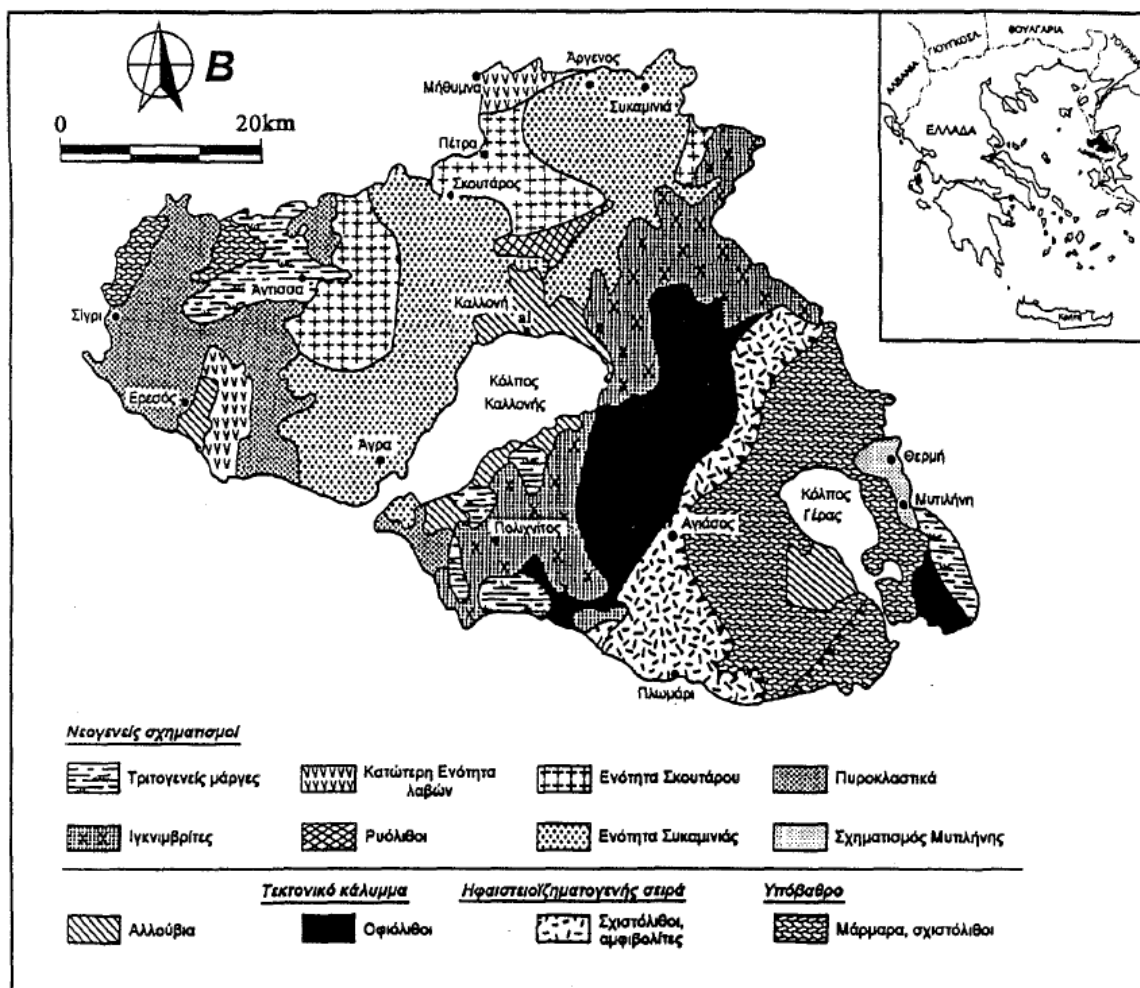
Εικόνα 15: Τρισδιάστατη απεικόνιση της θέσης της σημερινής Λέσβου κατά τη διάρκεια της Ιουρασικής περιόδου με τη βοήθεια γεωλογικού μοντέλου σε διαδραστικό χάρτη.

Πιο συγκεκριμένα, σε αντίθεση με το δυτικό τμήμα του νησιού, όπου συναντώνται κατά κύριο λόγο ηφαιστειακά πετρώματα Νεογενούς περιόδου, μεταλλικά ιζηματα και τοπία δίχως βλάστηση, η ανατολική Λέσβος παρουσιάζει αυξημένη φυτοκάλυψη και είναι πλούσια σε αλπικά και προαλπικά πετρώματα (Katsikatsos et al. 1986).

Στην Ανατολική Λέσβο συναντώνται τα παλαιότερα πετρώματα του νησιού, τα οποία, με βάση γεωχημικά και παλαιομαγνητικά δεδομένα, χωρίζονται σε δύο σειρές:

- Την αυτόχθονη σειρά, αποτελούμενη από μάρμαρα και σχιστόλιθους ηλικίας που κυμαίνεται ανάμεσα στην Ύστερη Λιθανθρακοφόρο και Τριαδική περίοδο και
- την ηφαιστειοϊζηματογενή σειρά, η οποία αποτελείται από μεταμορφωμένα και ιζηματογενή πετρώματα της Τριαδικής περιόδου.

Αυτοί οι γεωλογικοί σχηματισμοί διατρέχουν μια περιοχή που εκτείνεται από την Μυτιλήνη και τον κόλπο της Γέρας μέχρι το συνολικό όγκο του όρους Ολύμπου και καταλήγουν στο Πλωμάρι και όλο το παραθαλάσσιο τμήμα της νότιας Λέσβου. Δυτικά του Ολύμπου κυριαρχούν οφιόλιθοι του Μεσοζωικού Αιώνα, προερχόμενα από τον πυθμένα της αρχαίας θάλασσας της Τηθύος κατά τη διάρκεια της πρώτης αλπικής ορογένεσης μεταξύ Πρώιμης Ιουρασικής και Ύστερης Κρητιδικής περιόδου (Θωμάϊδου, 2009).



Εικόνα 17: Γεωλογικός χάρτης της Λέσβου (Κοντής, 1998)

Η τελευταία παρατήρηση βασίζεται κατά κύριο λόγο στο γεγονός πως κατά τη διάρκεια του Μεσοζωικού, η Λέσβος – όπως και η υπόλοιπη Ελλάδα – βρίσκονταν κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Απόδειξη αποτελεί η απουσία απολιθωμάτων χερσαίων οργανισμών του Μεσοζωικού στον Ελλαδικό χώρο και κατ' επέκταση στη Λέσβο.

Η πιο πρόσφατη ορογένεση, η οποία συνέβη μεταξύ Πρώιμης Ηώκαινου και Ύστερης Ολιγόκαινου εποχής της Παλαιογενούς περιόδου του Καινοζωικού Αιώνα, προκάλεσε πάχυνση του συστήματος των πετρωμάτων. Στους παλαιοζωικούς σχηματισμούς εντοπίστηκαν μικροαπολιθώματα της Πέρμιας περιόδου, επί το πλείστον Τρηματοφόρα και Βραχιονόποδα. Οι εν λόγω σχηματισμοί αποτελούνται κατά κύριο λόγο από στρώσεις μαρμάρων και σχιστόλιθους (ασβεστιτικούς, χαλαζιακούς, μοσχοβιτικούς), οι οποίοι έχουν περάσει σε πρασινοσχιστόλιθική φάση. Οι λίγο πιο πρόσφατοι σχηματισμοί της Τριαδικής περιόδου εντοπίζονται ανάμεσα στις σημερινές τοποθεσίες των χωριών της Μόριας και των Λουτρών Λέσβου και σε μεγάλες βορειοδυτικές και ανατολικές περιοχές της Λέσβου. Είναι μεταλλικά ιζήματα που χρονολογούνται ανάμεσα στην Πρώιμη Ολιγόκαινο και την Ύστερη Μειόκαινο εποχή του Καινοζωικού Αιώνα. Τα ιζήματα ακολουθούνται από κάποιες θαλάσσιες και λιμναίες αποθέσεις, οι οποίες τοποθετούνται χρονολογικά κατά την Πλειόκαινο εποχή και την Τεταρτογενή περίοδο του Καινοζωικού Αιώνα (Θωμαΐδου, 2009).

Σε σχέση με την διαδικασία της δειγματοληψίας εδάφους που θα αναλυθεί στη συνέχεια, αξίζει να σημειωθεί πως το πετρώδες υπέδαφος της νήσου Λέσβου και η απουσία χώματος αποτέλεσαν σοβαρά εμπόδια για την λήψη δειγμάτων. Ωστόσο, η έλλειψη αδιατάρακτου εδάφους ενδέχεται να οφείλεται λιγότερο στην μορφολογία του νησιού και περισσότερο στα φαινόμενα αποψίλωσης της βλάστησης και διάβρωσης, κατά τα οποία το χώμα εκπλένεται από τις βροχοπτώσεις και καταλήγει στη θάλασσα.

2.2 Μεθοδολογία πεδίου

Με στόχο ο αριθμός των δειγμάτων να είναι ικανοποιητικός για την κάλυψη όσο το δυνατόν ευρύτερης περιοχής του νησιού, αποφασίστηκε η συνολική λήψη 20 εδαφικών δειγμάτων της Ανατολικής Λέσβου. Επιπλέον, στο πλαίσιο αυτής της εργασίας και για την διευκόλυνση της δειγματοληψίας πεδίου δημιουργήθηκε ένας διαδραστικός χάρτης (Παράρτημα Α.1) με τις κατά τόπους περιοχές και στίγματα GPS των δειγμάτων. Η όλη διαδικασία εργασίας πεδίου έλαβε χώρα τους μήνες Μάιο – Ιούνιο 2021.

Ακολουθώντας το πρωτόκολλο λήψης εδαφικού δείγματος με βάση τον ΙΑΕΑ (2019), συγκεντρώθηκε από κάθε σημείο περίπου ένα κιλό αδιατάρακτου χώματος, πέντε εκατοστά κάτω από την επιφάνεια του εδάφους αφού ήταν απαραίτητο να απομακρυνθεί ο επιφανειακός ορίζοντας που αποτελείται από ένα στρώμα νεκρής οργανικής ύλης. Στην συνέχεια το χώμα τοποθετήθηκε σε αεροστεγείς πλαστικές συσκευασίες με την κωδική ονομασία της περιοχής όπως φαίνεται και στον διαδραστικό χάρτη των σημείων δειγματοληψίας. Για την πιο αντιπροσωπευτική μελέτη της κάθε περιοχής, ελήφθησαν τέσσερα δείγματα από τις 4 κορυφές ενός προσεγγιστικού τετραγώνου με ακμή ~1 km γύρω από την κάθε θέση, με αποτέλεσμα την συνολική δειγματοληψία 80 επί μέρους δειγμάτων για τις 20 περιοχές της ανατολικής Λέσβου που μελετήθηκαν.

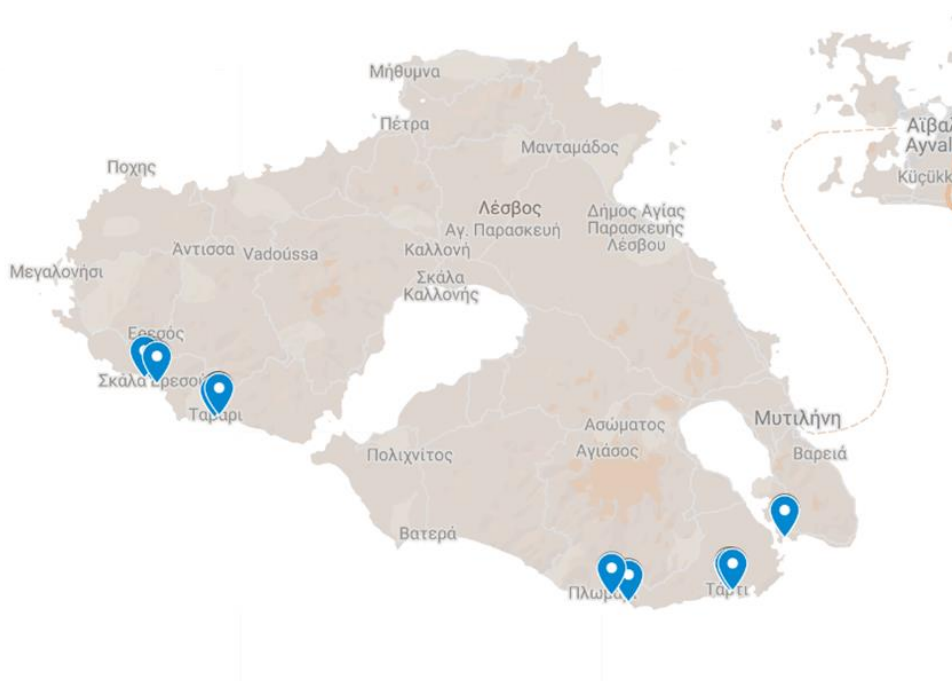
Κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας σε κάθε σημείο όπου λήφθηκε εδαφικό δείγμα, χρησιμοποιήθηκε ο φορητός ανιχνευτής NaI ακτινοβολίας γάμμα (SpiR-ID LT, Mirion industries) που διαθέτει το εργαστήριο του πανεπιστημίου, ο οποίος τοποθετήθηκε σε απόσταση περίπου 1 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους ώστε να μετρηθεί απευθείας η απορροφώμενη δόση που δέχεται ο άνθρωπος. Η χρονική διάρκεια της μέτρησης τέθηκε στα 5 λεπτά για τον υπολογισμό της μέσης τιμής της απορροφώμενης δόσης. Ταυτόχρονα με την μέτρηση καταγράφονταν και οι συντεταγμένες των σημείων δειγματοληψίας. Εν τέλει από τα 80 σημεία δειγματοληψίας και επιτόπιας μέτρησης της απορροφώμενης δόσης, προέκυψαν 20 δείγματα/μετρήσεις ως τα/οι αντιπροσωπευτικά/-ες της εκάστοτε περιοχής, με την μέθοδο που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Ειδικά στην περίπτωση των επιτόπιων μετρήσεων, ως αντιπροσωπευτική μέτρηση της περιοχής θεωρήθηκε ο μέσος όρος των μετρήσεων των τεσσάρων κορυφών της τετραγωνικής επιφάνειας.

Η δειγματοληψία πεδίου κατέστη δύσκολη όχι μόνο λόγω προσβασιμότητας σε περιοχές όπου το αυτοκίνητο δεν μπορούσε να προσεγγίσει, αλλά και λόγω των μέτρων που είχε λάβει η πολιτεία για την αντιμετώπιση της πανδημίας Covid-19 (π.χ. καραντίνα, απαγόρευση κυκλοφορίας κτλ). Μία επιπλέον δυσκολία αποτέλεσε το κακό περιφερειακό οδικό δίκτυο του νησιού, λόγω του οποίου η μετάβαση στις περιοχές δειγματοληψίας ήταν, πολλές φορές, αδύνατη καθώς δεν υπήρχε συμβατός δρόμος ή μονοπάτι, με αποτέλεσμα τον επαναπροσδιορισμό των κορυφών της τετραγωνικής επιφάνειας με απόκλιση μερικών μέτρων από τις αρχικές εκτιμήσεις. Επιπροσθέτως, πολλά από τα σημεία που αρχικά είχαν επιλεγεί δεν ήταν προσβάσιμα καθώς βρίσκονταν σε ιδιωτικό χώρο. Τέλος, λόγω της γεωμορφολογίας του νησιού η συλλογή των δειγμάτων αδιατάρακτου χώματος ήταν μία επιπλέον πρόκληση αφού στις περισσότερες περιοχές το έδαφος ήταν πετρώδες ή υπήρχε μόνο πέτρωμα.



Εικόνα 18: Απεικόνιση διαδραστικού χάρτη περιοχών δειγματοληψίας εδάφους για την παρούσα εργασία.

Παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε για την δειγματοληψία ιζήματος (άμμου) κατά τον μήνα Οκτώβριο του 2021. Ωστόσο στην συγκεκριμένη διαδικασία δεν ήταν αναγκαία η λήψη δειγμάτων από τέσσερις επιμέρους κορυφές και ο υπολογισμός μέσου όρου. Αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι την παρούσα χρονική περίοδο είχε γίνει άρση του lockdown, κατέστησε την διαδικασία ευκολότερη και ταχύτερη. Το αποτέλεσμα ήταν η συγκέντρωση 10 δειγμάτων άμμου από συνολικά έξι παραλίες της Νοτίου Λέσβου.



Εικόνα 19: Απεικόνιση διαδραστικού χάρτη περιοχών δειγματοληψίας ιζήματος για την παρούσα εργασία.

Παρακάτω παρατίθενται σε μορφή πίνακα συγκεντρωτικά τα 20 σημεία δειγματοληψίας χρώματος και τα 10 σημεία δειγματοληψίας ιζήματος, καθώς και οι συντεταγμένες της κάθε περιοχής που επιλέχτηκε για να πραγματοποιηθούν οι συλλογές των δειγμάτων.

Πίνακας 1: Σημεία δειγματοληψίας με την ονομασία κάθε περιοχής και τις συντεταγμένες.

Α/Α		Περιοχή Δείγματος	Συντεταγμένες	
Δείγματα εδάφους				
		Γεωγ. Πλάτος	Γεωγ. Μήκος	
1	Μόρια	39.13521	26.51883	
2	Λάρσος	39.12272	26.47830	
3	Λάμπου Μύλοι	39.14354	26.40816	
4	Αλυφαντά	39.10345	26.53279	
5	Χαραμίδα	39.02207	26.55311	
6	Παππάδος	39.03731	26.45773	
7	Πλωμάρι	38.97515	26.38563	
8	Ακράσι	39.02729	39.02729	
9	Τσίγκος	39.09243	26.34096	
10	Βασιλικά	39.11248	26.27340	
11	Θερμή	39.17802	39.17802	
12	Νέες Κυδωνίες	39.21953	26.40658	
13	Καράβα	39.25586	39.25586	
14	Αγία Παρασκευή	39.23365	26.26151	
15	Αχλαδερή	39.17829	39.17829	
16	Μανταμάδος	39.31037	26.33688	
17	Νάπη	39.29651	26.31496	
18	Κάπη	39.33164	26.31706	
19	Στύψη	39.31217	26.23590	
20	Λεπέτυμνος	39.36551	26.27594	
Δείγματα άμμου (παραλιών)				
1.	Πλωμάρι (α)	39.01626	26.54226	
2.	Πλωμάρι (β)	39.01667	26.54266	
3.	Άγιος Ερμογένης	39.01656	26.54241	
4.	Άγιος Ισίδωρος	38.97660	26.48932	
5.	Χρούσος (α)	38.97695	26.48995	
6.	Χρούσος (β)	38.97681	26.49216	
7.	Ερεσσός (α)	39.10881	25.99227	
8.	Ερεσσός (β)	39.10881	25.99227	
9.	Ερεσσός (γ)	39.10797	25.98939	
10.	Τάρτι	39.10829	25.99415	

2.3 Μεθοδολογία εργαστηρίου

Μετά την ολοκλήρωση της δειγματοληψίας τα δείγματα μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Ποιότητας Υδάτων και Αέρα (ΕΠΥΑ) του Τμήματος Περιβάλλοντος για την επεξεργασία τους. Από τα τέσσερα επιμέρους δείγματα των κορυφών της τετραγωνικής επιφάνειας κάθε περιοχής δειγματοληψίας

επιλέχθηκαν ισομερώς δείγματα και αναμείχθηκαν ώστε να παραχθεί ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα. Στην συνέχεια το αντιπροσωπευτικό δείγμα (συνολικά 20 εδαφικά αντιπροσωπευτικά δείγματα για τις 20 περιοχές) τοποθετήθηκε στον φούρνο του εργαστηρίου για ξήρανση στους 110 °C για διάστημα 8 ωρών σύμφωνα με το πρωτόκολλο επεξεργασίας εδαφικών δειγμάτων (ΙΑΕΑ, 2019).

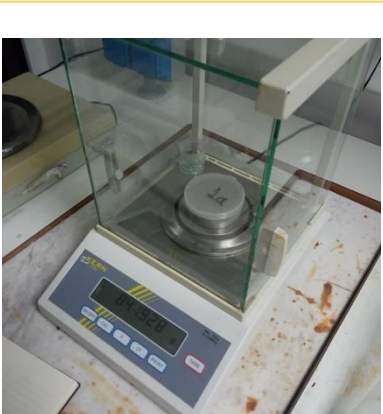
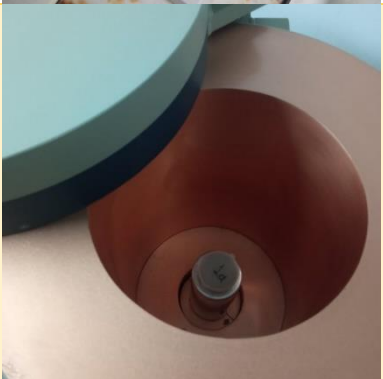
Το ξηρό χώμα καθαρίστηκε από πέτρες (> 2mm), κλαδιά, χόρτα ή άλλα ξένα σώματα. εν συνεχεία λειοτριβήθηκε με κεραμικό γουδί πορσελάνης, με αποτέλεσμα να διαλυθούν τα συσσωματώματα και να ομογενοποιηθεί το δείγμα. Αμέσως μετά το χώμα κοσκινίστηκε με μεταλλικό κόσκινο πλέγματος 250 μm ώστε να διαχωριστεί το χονδρόκοκκο μέρος του καθώς και να απομακρυνθούν ξένα σώματα που τυχόν είχαν παραμείνει ή συσσωματώματα που δεν είχαν λειοτριβηθεί.

Γνωστή/μετρημένη μάζα του τριμμένου δείγματος τοποθετήθηκε σε κυλινδρικό δοχείο (περιέκτης) από πολυπροπυλένιο μικρού μεγέθους με ενεργό όγκο 40 ml, . Η γέμιση με το δείγμα στον περιέκτη έγινε μέχρι την χαρακτηριστική του εγκοπή του περιέκτη και όχι μέχρι την πλήρη πλήρωση αυτού, έτσι ώστε να ταιριάζει η γεωμετρία των παραγόμενων δειγμάτων με εκείνη των πηγών βαθμονόμησης. Ολοκληρώνοντας την διαδικασία, το δείγμα χώματος συμπιέζεται ελάχιστα για την εξάλειψη τυχόν κενών αέρος στο εσωτερικό του και τιτλοδοτείται με τον αριθμό κάθε μίας από τις 20 περιοχές.

Τελικό στάδιο της διαδικασίας είναι η καταγραφή και η ανάλυση του φάσματος μέσω της φασματοσκοπίας γάμμα. Για αυτό τον λόγο μετά την προετοιμασία των δειγμάτων, κάθε δείγμα τοποθετείται σε επαφή με τον ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe) (Canberra, 45% σχετική απόδοση) που βρίσκεται στο ΕΠΥΑ του Τμήματος Περιβάλλοντος όπου και διεξάγεται η μέτρηση για 24 ώρες. Πιο συνοπτικά απεικονίζονται τα παραπάνω στάδια στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 2: Απεικόνιση σταδίων επεξεργασίας δειγμάτων χώματος.

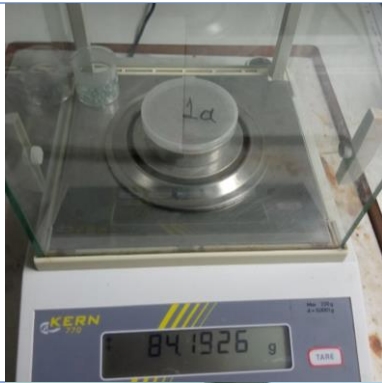
1.	Συγκέντρωση των δειγμάτων από τις τέσσερις κορυφές μίας τετραγωνικής επιφάνειας εμβαδού 1 km ²	
2.	Τοποθέτηση ταψιού στον φούρνο με σκοπό την ξήρανση του δείγματος .	

3.	Κονιοποίηση (λειοτρίβιση) δείγματος σε κεραμικό γουδί	
4.	Κοσκίνισμα αποξηραμένου δείγματος και επιλογή υλικού με κόσκινο των 250 μm .	
5.	Ζύγιση της μάζας του δείγματος που θα εισαχθεί στον περιέκτη.	
6.	Μέτρηση δείγματος για 24 ώρες με φασματοσκοπία γάμμα, χρησιμοποιώντας HPGe.	

Για τις άμμους των παραλιών (ίζημα) ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία. Αν και το μεγαλύτερο μέρος της διαδικασίας ήταν ίδιο με την επεξεργασία του χώματος, ορισμένα στάδια διέφεραν ως προς την ποσότητα ή τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε.

Πίνακας 3: Απεικόνιση σταδίων επεξεργασίας δειγμάτων άμμου.

1.	Συγκέντρωση των ιζημάτων από τις ακτές της Λέσβου και τοποθέτηση τους σε ταψί. Σε αντίθεση με τα δείγματα χώματος, εδώ δεν ήταν απαραίτητη η συγκέντρωση δειγμάτων από τέσσερις επιμέρους κορυφές.	
2.	Τοποθέτηση ταψιού στον φούρνο με σκοπό την ξήρανση του δείγματος.	
3.	Κονιοποίηση (λειτουργίβιση) δείγματος σε γουδί από καθαρό αχάτη.	
4.	Κοσκίνισμα αποξηραμένου δείγματος και επιλογή υλικού με κόσκινο των 250 μm.	
5.	Ζύγιση της μάζας του δείγματος που θα εισαχθεί στον περιέκτη	

		
6.	Μέτρηση δείγματος για 24 ώρες με φασματοσκοπία γάμμα, χρησιμοποιώντας HPGe.	

2.4 Ανάλυση

Καθώς το δείγμα τοποθετείται στον ανιχνευτή κρυστάλλου υπερκαθαρού γερμανίου για 24 ώρες, τα ραδιοϊσότοπα που περιέχονται στο κάθε δείγμα αρχίζουν να αλληλοεπιδρούν με το υλικό του ανιχνευτή, καταγράφοντας ηλεκτρικά σήματα τα οποία καθορίζονται από την ενέργεια εκπομπής και τον αριθμό των φωτονίων που εκπέμπονται από το εκάστοτε ραδιοϊσότοπο. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται το ενεργειακό φάσμα προς ανάλυση.

Εφόσον αφαιρέθηκε το υπόβαθρο (εργαστηρίου και Compton) και με δεδομένα την απόδοση του HPGe, το σχήμα και το μέγεθος του δείγματος και το ποσοστό εκπομπής της ακτινοβολίας γάμμα, πραγματοποιήθηκε αναγωγή από την μετρούμενη ποσότητα των καταγεγραμμένων φωτονίων στη συγκέντρωση του εκάστοτε ραδιοϊσοτόπου με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$A = \frac{Net\ area}{I_{\gamma} \cdot Eff \cdot Time \cdot mass}$$

Όπου A η συγκέντρωση ενεργότητας (σε Bq kg⁻¹), Net area το ολοκλήρωμα των καταγεγραμμένων γεγονότων στην υπό ανάλυση φωτοκορυφή χωρίς το υπόβαθρο (φυσική ραδιενέργεια εργαστηρίου και υπόβαθρο Compton), I_γ η πιθανότητα εκπομπής της εκάστοτε ενέργειας, Eff η απόδοση του ανιχνευτή, Time η χρονική διάρκεια της μέτρησης (σε s) και mass η μάζα του μετρούμενου δείγματος (σε kg).

Η αβεβαιότητα της συγκέντρωσης της ενεργότητας υπολογίστηκε με τον παρακάτω τύπο:

$$\delta A = A \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta_{net\ area}}{net\ area}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{mass}}{mass}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{Eff}}{Eff}\right)^2}$$

Όπου δ_x συμβολίζεται η αβεβαιότητα. Ως δ_A συμβολίζεται η αβεβαιότητα της συγκέντρωσης της ενεργότητας (σε Bq kg⁻¹). $\delta_{net\ area}$ είναι η αβεβαιότητα του ολοκληρώματος των γεγονότων και δ_{mass} η αβεβαιότητα της μάζας του δείγματος (σε kg). δ_{Eff} είναι η αβεβαιότητα της απόδοσης του ανιχνευτικού συστήματος.

Η συγκέντρωση του ²³⁴Th υπολογίζεται από τις φωτοκορυφές 63,29 και 92,59 keV και θεωρείται ως τιμή του ²³⁸U υποθέτοντας ραδιενεργό ισορροπία μεταξύ ²³⁸U και ²³⁴Th. Η συγκέντρωση του ²²⁶Ra υπολογίζεται από τις συγκεντρώσεις του ²¹⁴Pb στα 295,22 και στα 351,93 keV και του ²¹⁴Bi στα 609,32 keV, μιας και θεωρείται ότι υπάρχει ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ μητρικού και θυγατρικών πυρήνων. Η συγκέντρωση της σειράς του ²³²Th υπολογίζεται από τις συγκεντρώσεις του ²²⁸Ac στα 338,32 και στα 911,20 keV, του ²¹²Pb στα 238,63 keV και του ²⁰⁸Tl στα 583,19 keV. Η συγκέντρωση του ⁴⁰K, υπολογίζεται στα 1460,82 keV. Η συγκέντρωση του τεχνητού ισοτόπου ¹³⁷Cs υπολογίζεται στα 661,66 keV.

Πίνακας 4: Παρακάτω αναγράφονται ραδιενεργά ισότοπα (Nuclide) που αναλύθηκαν, οι ενέργειες εκπομπής (E), η πιθανότητα διάσπασης (I_γ), η απόδοση του ανιχνευτή στην κάθε ενέργεια (Eff), το υπόβαθρο στην κάθε ενέργεια (BKG) και το σφάλμα υποβάθρου (d BKG).

E (keV)	Nuclide	I_γ	Eff	BKG (cps)	dBKG (cps)
63,29	²³⁴ Th	0,0370	0,0491	0,0053	0,0009
92,59	²³⁴ Th	0,0425	0,0933	0,0106	0,0011
186,21	²²⁶ Ra	0,0364	0,0912	0,0066	0,0012
295,22	²¹⁴ Pb	0,1842	0,0656	0,0010	0,0009
351,93	²¹⁴ Pb	0,3560	0,0572	0,0021	0,0008
609,32	²¹⁴ Bi	0,4549	0,0373	0,0016	0,0005
338,32	²²⁸ Ac	0,1127	0,0590	0,0001	0,0009
911,20	²²⁸ Ac	0,2580	0,0273	0,0001	0,0004
238,63	²¹² Pb	0,4360	0,0773	0,0041	0,0009
583,19	²⁰⁸ Tl	0,3594	0,0386	0,0014	0,0004
661,66	¹³⁷ Cs	0,8510	0,0350	0,0003	0,0004
1460,82	⁴⁰ K	0,1066	0,0191	0,0007	0,0004

Αφού υπολογίζεται η συγκέντρωση ενεργότητας των ραδιενεργών ισοτόπων στα δείγματα χώματος και άμμου που συλλέχθηκαν, εν συνεχεία υπολογίζεται ο ρυθμός απορροφώμενης δόσης σύμφωνα με το UNSCEAR (2000). Ο εκτιμώμενος ρυθμός απορροφώμενης ραδιενεργού δόσης, θα συγκριθεί σε δεύτερο χρόνο με τον μετρούμενο ρυθμό ισοδύναμης ραδιενεργού δόσης, όπως αυτός καταγράφηκε

με το SpirID. (για τα φωτόνια η απορροφώμενη και ισοδύναμη δόση ταυτίζονται και μετρούνται σε nGy h⁻¹ ή nSv h⁻¹, αντίστοιχα).

$$D = A \cdot {}^{40}\text{K} + B \cdot {}^{238}\text{U} + \Gamma \cdot {}^{232}\text{Th}$$

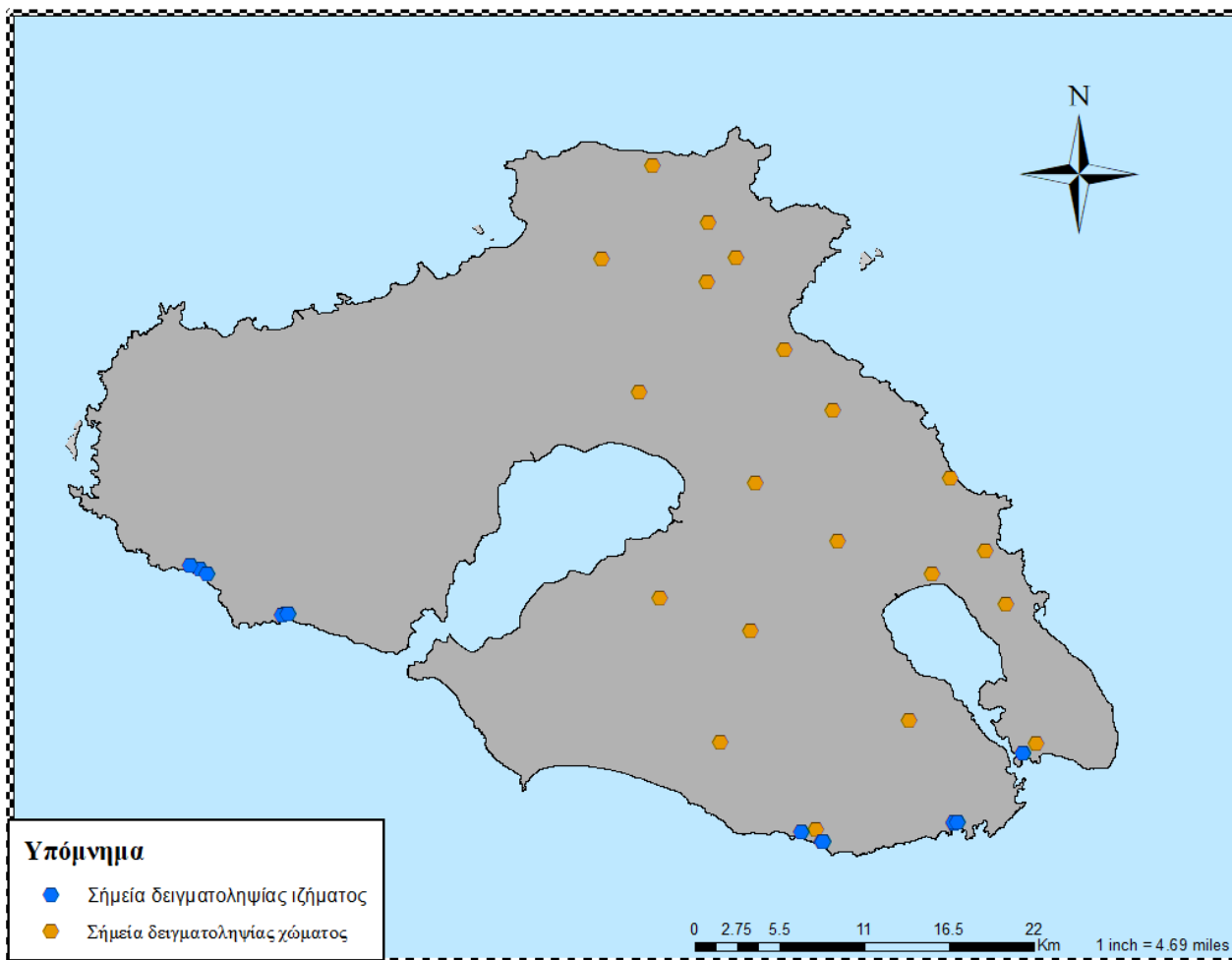
Όπου ⁴⁰K, ²³⁸U, ²³²Th οι συγκεντρώσεις ενεργότητας των αντίστοιχων ραδιοϊσοτόπων (σε Bq kg⁻¹) ενώ οι αριθμοί A=0,0417, B= 0,462 και Γ= 0,604 είναι οι συντελεστές εξωτερικής δόσης (σε nGy h⁻¹ ανά Bq kg⁻¹) για κάθε ραδιοϊσότοπο (UNSCEAR, 2000).

Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος:

$$\delta D = \sqrt{(A \cdot \delta {}^{40}\text{K})^2 + (B \cdot \delta {}^{238}\text{U})^2 + (\Gamma \cdot \delta {}^{232}\text{Th})^2}$$

3. Αποτελέσματα

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο της Μεθοδολογίας, η συλλογή των δειγμάτων χώματος έλαβε χώρα κατά τους μήνες Μάιου – Ιούνιο του 2021 ενώ η δειγματοληψία ιζήματος (άμμου) πραγματοποιήθηκε τον Οκτώβριο του ίδιου έτους. Παρακάτω, παρατίθεται εκ νέου ο χάρτης δειγματοληψίας και επιτόπιων μετρήσεων για διευκόλυνση του αναγνώστη.



Εικόνα 20: Απεικόνιση των σημείων δειγματοληψίας για τη μέτρησης της συγκέντρωσης ενεργότητας και επιτόπιων μετρήσεων για τον υπολογισμό της ραδιενεργού δόσης.

Παρακάτω θα παρατεθούν τα αποτελέσματα της εργασίας για κάθε επιμέρους ισότοπο που μετρήθηκε στα εδαφικά δείγματα. Επίσης θα παρουσιαστεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης εργασίας με παλαιότερη, της οποίας η λήψη δειγμάτων χώματος πραγματοποιήθηκε στη δυτική πλευρά του νησιού.

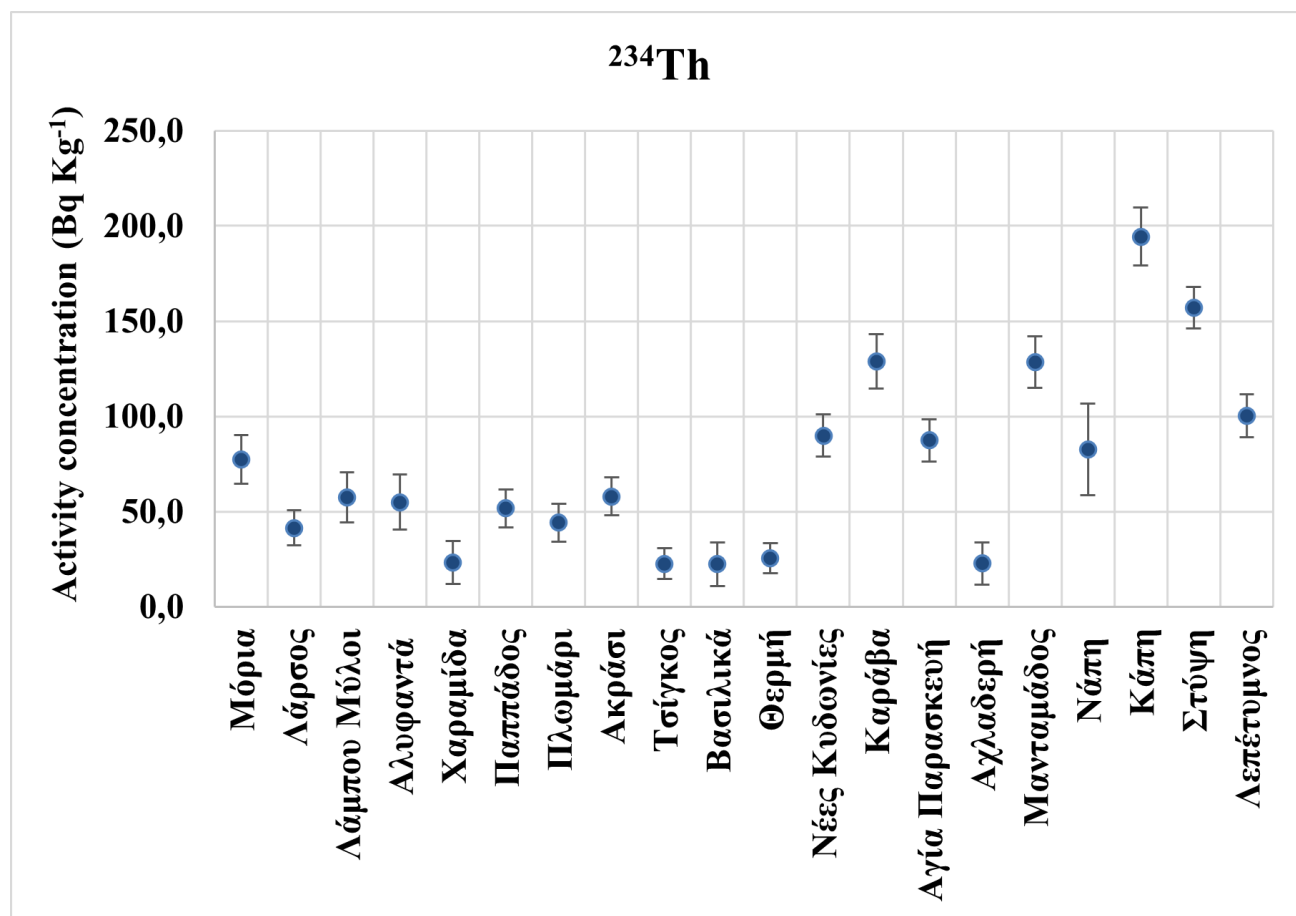
3.1 Ανάλυση δειγμάτων και υπολογισμός ενεργότητας και δόσεων

Τόσο στα δείγματα χώματος όσο και στα δείγματα ιζήματος πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός της συγκέντρωσης ενεργότητας των φυσικών ραδιοϊσοτόπων ^{234}Th , ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K , και του τεχνητού

ραδιοϊσότοπου ^{137}Cs , προερχόμενου κυρίως από το πυρηνικό ατύχημα του Τσερνόμπιλ. Τα δύο πρώτα ισότοπα (^{234}Th , ^{226}Ra) ανήκουν στην σειρά του ουρανίου, ενώ το ^{232}Th είναι το πατρικό νουκλίδιο της ομώνυμης σειράς. Η συγκέντρωση ενεργότητας του ^{232}Th , θεωρείται η μέση τιμή των συγκεντρώσεων ενεργότητας των θυγατρικών του ^{228}Ac , ^{212}Pb και ^{208}Tl . Τα ραδιοϊσότοπα αυτά παρουσίασαν παρόμοιες τιμές συγκέντρωσης ενεργότητας εντός των σφαλμάτων και επομένως θεωρούνται ότι βρίσκονται σε ραδιενεργό ισορροπία μέσα στη σειρά. Το ^{40}K είναι νουκλίδιο ανένταχτο σε κάποια ραδιενεργή σειρά. Παρατηρείται πως ανάλογα την περιοχή, διαφέρει και η συγκέντρωση ενεργότητας του κάθε ραδιενεργού ισότοπου. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για κάθε μετρούμενο δείγμα.

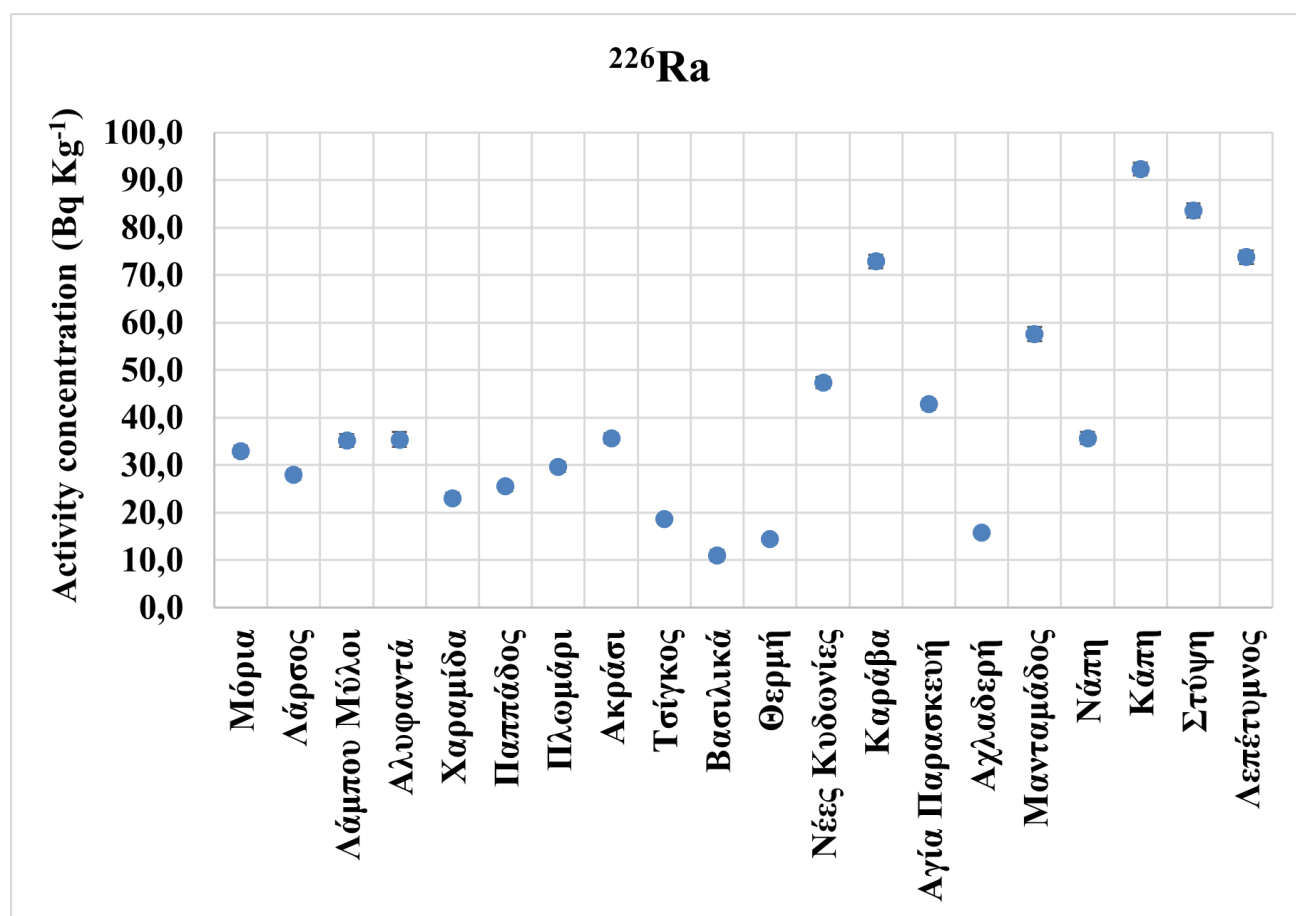
3.1.1 Μετρήσεις δειγμάτων χώματος

Η συγκέντρωση ενεργότητας των ραδιοϊσοτόπων στα δείγματα χώματος ακολουθείται από την αντίστοιχη αβεβαιότητα στην οποία έχουν ληφθεί υπ' όψιν οι αβεβαιότητες λόγω της στατιστικής φύσης της ραδιενεργού διάσπασης, της απόδοσης του ανιχνευτή και της μάζας των δειγμάτων. Έτσι, οι σχετικές αβεβαιότητες των επιμέρους ραδιοϊσοτόπων υπολογίστηκαν ότι ήταν 23% για το ^{234}Th , 4% για το ^{226}Ra , 3% για τη σειρά του ^{232}Th , 2% για το ^{40}K και 7% για το ^{137}Cs . Η σχετικά μεγάλη αβεβαιότητα στον υπολογισμό του ^{234}Th , εν σχέση με τα υπόλοιπα ισότοπα ($23\% > 2-7\%$), οφείλεται στην μεγάλη αβεβαιότητα της απόδοσης του ανιχνευτή στην ενεργειακή περιοχή που ανήκουν οι φωτοκορυφές του ^{234}Th .



Διάγραμμα 1: Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η συγκέντρωση ενεργότητας του φυσικού ραδιοϊσοτόπου ^{234}Th .

Παρατηρείται πως στο 25% των σημείων δειγματοληψίας, δηλαδή στις πέντε από τις 20 περιοχές (Χαραμίδα, Τσίγκος, Βασιλικά, Θερμή, Αχλαδερή), η συγκέντρωση ενεργότητας ^{234}Th είναι χαμηλή, μικρότερη των 50 Bq kg^{-1} , ενώ η υψηλότερη τιμή σημειώνεται στην περιοχή του χωριού Κάπη, όπου προσεγγίζει τα 200 Bq kg^{-1} . Γενικά είναι δυνατόν να παρατηρηθούν δύο διακριτές περιοχές με συγκεντρώσεις ενεργότητας 50 Bq kg^{-1} και 100 Bq kg^{-1} , αντίστοιχα, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην γεωλογία των υπό μελέτη περιοχών.

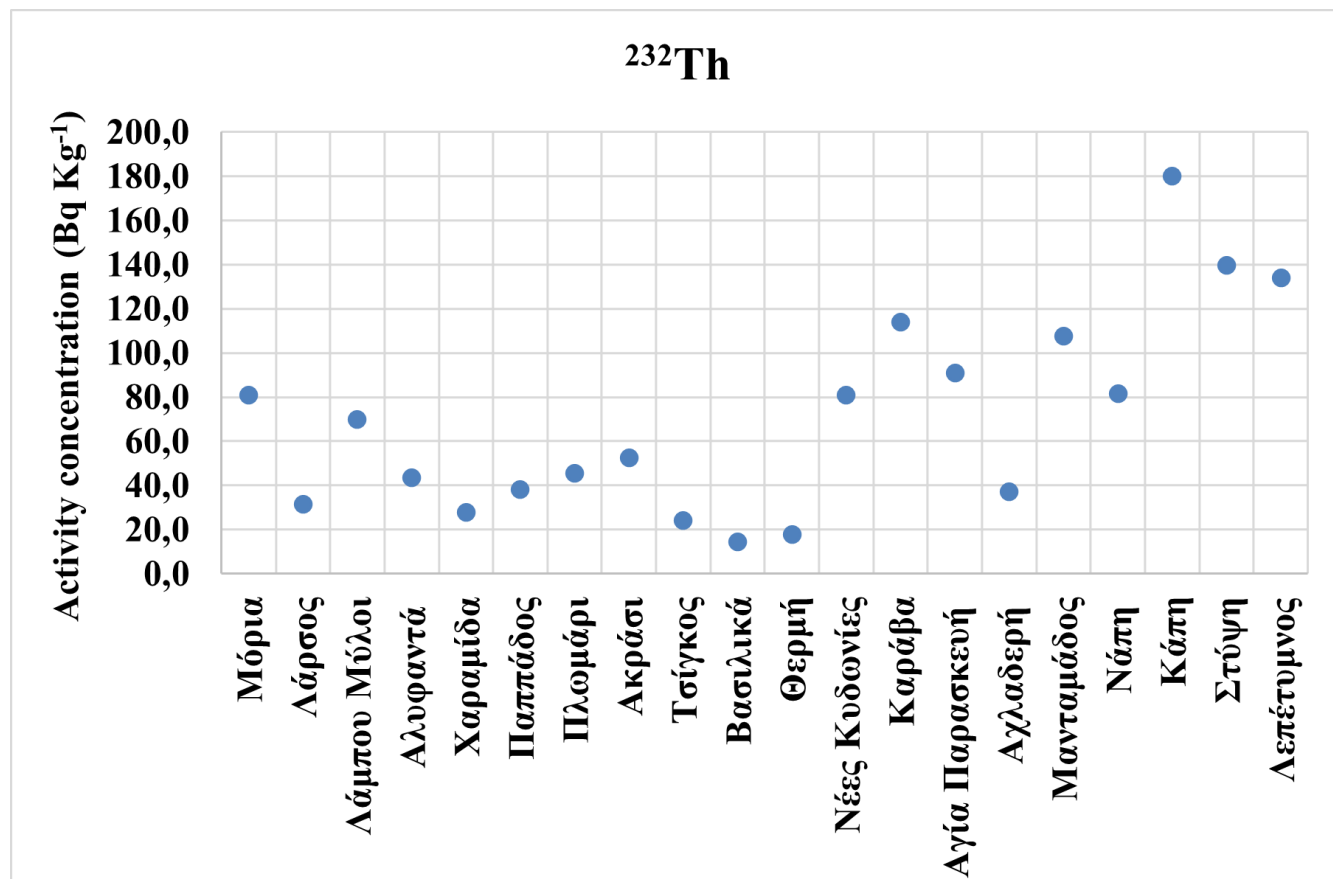


Διάγραμμα 2: Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η συγκέντρωση ενεργότητας του φυσικού ραδιοϊσοτόπου ^{226}Ra .

Οι συγκεντρώσεις του ^{226}Ra εμφανίζονται αυξημένες πάλι στην περιοχή της Κάπης ($\sim 90 \text{ Bq kg}^{-1}$) και στην περιοχή της Στύψης, όπου κυμαίνονται ανάμεσα στα 80 και 90 Bq kg^{-1} . Οι περιοχές του Λεπέτυμνου και της Καραβάς παρουσιάζουν εξίσου υψηλές τιμές ^{226}Ra μεγαλύτερες των 70 Bq kg^{-1} . Η χαμηλότερη τιμή παρουσιάζεται στα Βασιλικά ($\sim 10 \text{ Bq kg}^{-1}$).

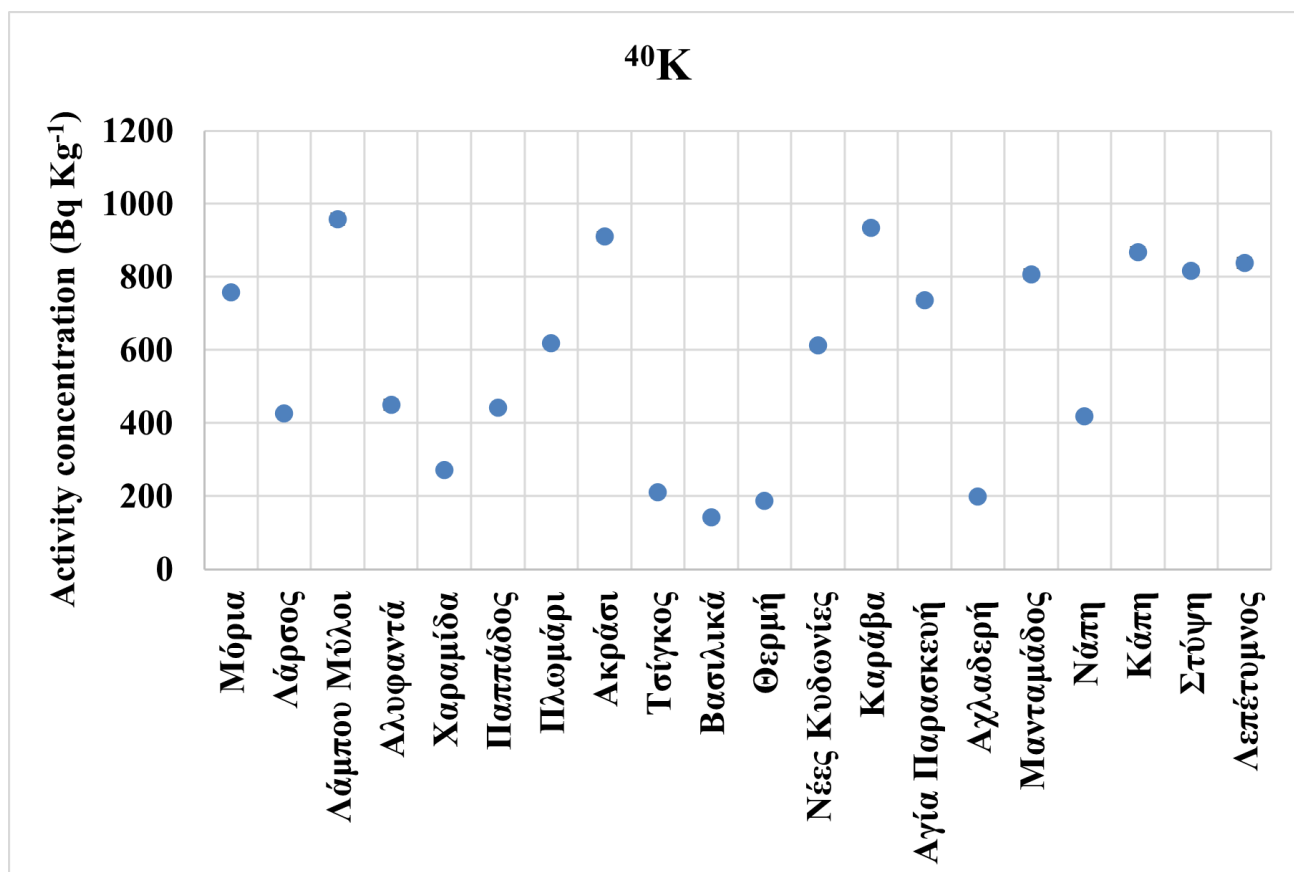
Οι συγκεντρώσεις ενεργότητας στις μισές περιοχές κυμαίνονται μεταξύ 20 και 40 Bq kg^{-1} με μέσο όρο τα 30 Bq kg^{-1} . Τέσσερις περιοχές (Τσίγκος, Βασιλικά, Θερμή και Αχλαδερή) παρουσιάζουν συγκεντρώσεις ενεργότητας χαμηλότερες των 20 Bq kg^{-1} , ενώ υπάρχει μία διακριτή ομάδα περιοχών

με υψηλότερες συγκεντρώσεις ενεργότητας έως και 50% από τις προαναφερθείσες, με τιμές που κυμαίνονται από 40 έως 90 Bq kg⁻¹.



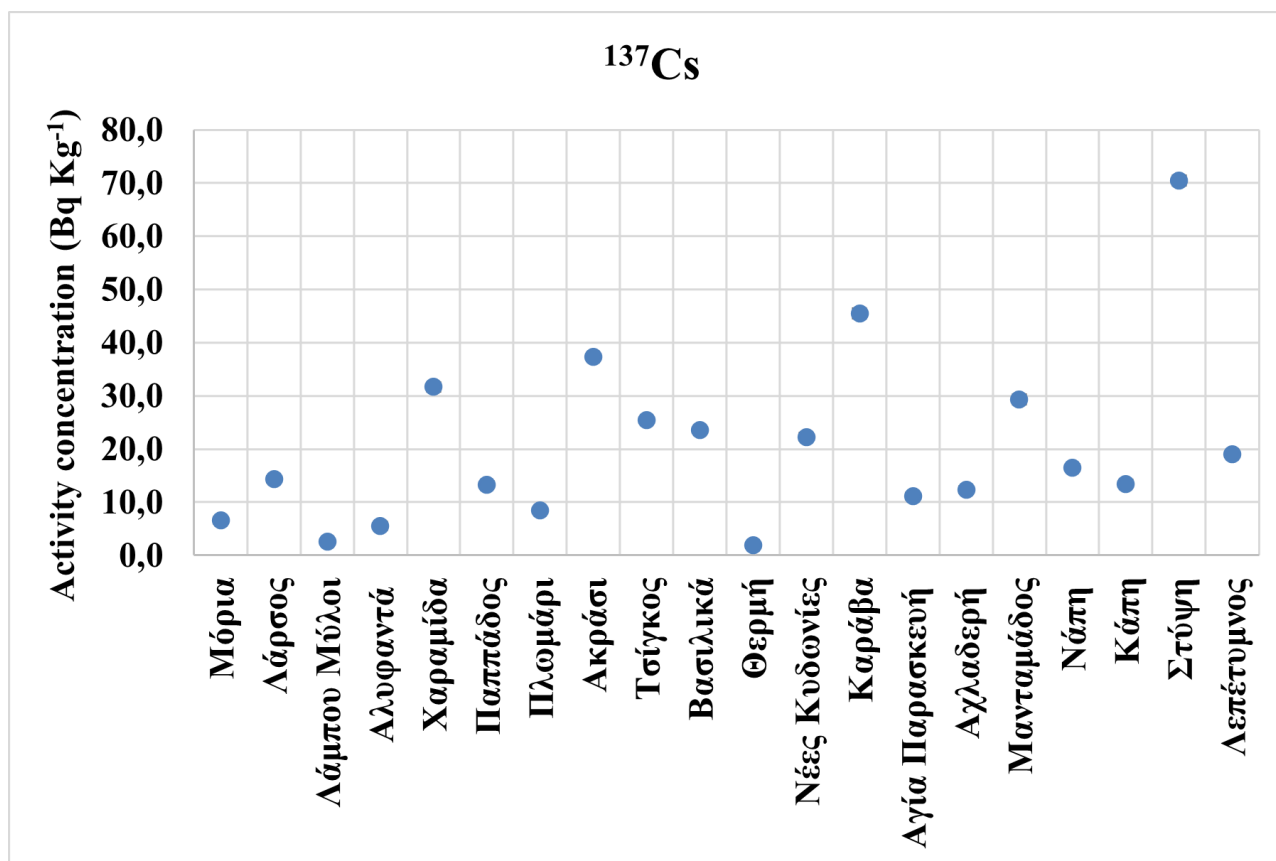
Διάγραμμα 3: Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η συγκέντρωση ενεργότητας του φυσικού ραδιοϊσοτόπου ²³²Th.

Ομοίως, στην Κάπη διατηρείται η μέγιστη τιμή και για τις συγκεντρώσεις ενεργότητας της σειράς του ²³²Th, προσεγγίζοντας τα 180 Bq kg⁻¹ ενώ ακολουθούν οι περιοχές της Στύψης και του Λεπέτυμνου, οι οποίες παρουσιάζουν υψηλές τιμές, παρόμοιες μεταξύ τους (~ 140 Bq kg⁻¹). Οι συγκεντρώσεις εμφανίζονται χαμηλές πάλι στα Βασιλικά, στη Θερμή και στον Τσίγκο. Το 50% περίπου των περιοχών παρουσιάζουν αρκετά μειωμένες τιμές (≤ 60 Bq kg⁻¹) σε σχέση με τις μέγιστες που παρατηρούνται. Ωστόσο, το 25% των περιοχών (Νέες Κυδωνίες, Καράβα, Αγία Παρασκευή, Μανταμάδος και Νάπη) αποτελούν μια διακριτή ομάδα με παρόμοιες τιμές (80 - 120 Bq kg⁻¹). Σε σχέση με τις υψηλότερες τιμές που παρατηρούνται, το 75% (οι 15 από τις 20 περιοχές) παρουσιάζουν τιμές που δεν ξεπερνάνε τα 100 Bq kg⁻¹.



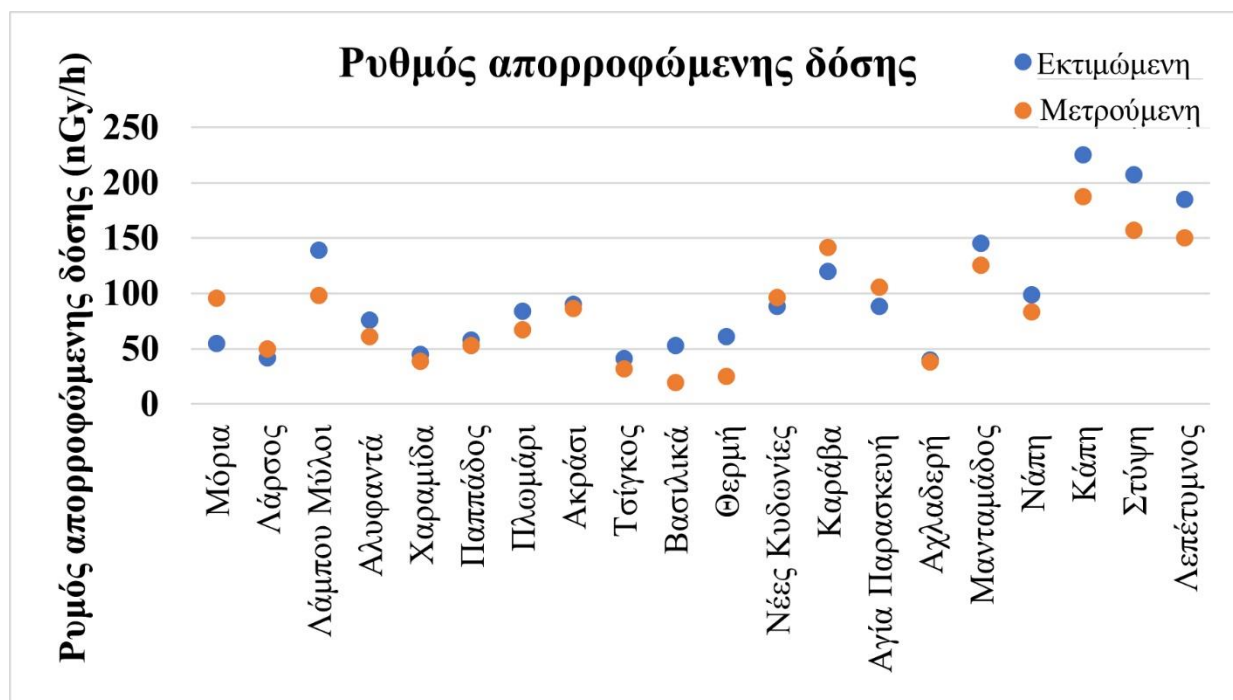
Διάγραμμα 4: Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η συγκέντρωση ενεργότητας του φυσικού ραδιοϊσοτόπου ^{40}K .

Η μέγιστη τιμή της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^{40}K σημειώνεται στη περιοχή των Λάμπου Μύλων και προσεγγίζει τα 1000 Bq kg^{-1} . Εξίσου υψηλές τιμές εμφανίζουν και η Καράβα, το Ακράσι και η Κάπη. Οι τιμές της Στύψης, του Μανταμάδου και του Λεπέτυμνου είναι επίσης αυξημένες και παρουσιάζουν μικρή διαφορά μεταξύ τους ($\sim 800 \text{ Bq kg}^{-1}$). Η χαμηλότερη τιμή εμφανίζεται πάλι στα Βασιλικά και είναι μικρότερη των 200 Bq kg^{-1} . Χαμηλές επίσης είναι οι συγκεντρώσεις ενεργότητας στις περιοχές του Τσίγκου, της Θερμής και της Αχλαδεράς ($\sim 200 \text{ Bq kg}^{-1}$). Παραπάνω από τις μισές περιοχές των οποίων οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 600 και 1000 Bq kg^{-1} αποτελούν μια διακριτή ομάδα, ενώ περίπου το 25% των περιοχών κυμαίνονται ανάμεσα στα 200 και 600 Bq kg^{-1} .



Διάγραμμα 5: Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η συγκέντρωση ενεργότητας του τεχνητού ραδιοϊσοτόπου ^{137}Cs .

Η μέγιστη τιμή της συγκέντρωσης του ραδιενεργού καισίου εντοπίζεται στην περιοχή της Στύψης ($\sim 70 \text{ Bq kg}^{-1}$) με μια διαφορά μεγαλύτερη των 20 Bq kg^{-1} από την αμέσως μικρότερη τιμή, η οποία παρουσιάζεται στη Καράβα, κυμαινόμενη ανάμεσα στα 40 και 50 Bq kg^{-1} . Η ελάχιστη τιμή εμφανίζεται στη Θερμή ($\sim 0 \text{ Bq kg}^{-1}$). Εξίσου χαμηλές τιμές παρουσιάζονται και στους Λάμπου Μύλους, στα Αλυφαντά, στη Μόρια και στο Πλωμάρι, οι οποίες δεν ξεπερνούν τα 10 Bq kg^{-1} . 7 από τις 20 περιοχές (Λάρσος, Παππάδος, Αγία Παρασκευή, Αχλαδερή, Νάπη, Κάπη και Λεπέτυμος) εμφανίζουν τιμές συγκέντρωσης που κυμαίνονται ανάμεσα στα 10 και 20 Bq kg^{-1} . 7 ακόμα περιοχές παρουσιάζουν τιμές μεταξύ 20 και 50 Bq kg^{-1} .



Διάγραμμα 6: Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται ο μετρούμενος και ο εκτιμώμενος ρυθμός δόσης.

Στο διάγραμμα παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ της μετρούμενης δόσης που υπολογίστηκε κατά την επιτόπια μέτρηση με τον φορητό ανιχνευτή Spir-ID και της εκτιμώμενης δόσης που υπολογίστηκε με την γάμμα φασματοσκοπία στον ανιχνευτή γερμανίου. Οι υψηλότερες τιμές εντοπίζονται στην περιοχή της Κάπης. Ωστόσο οι δύο δόσεις διαφέρουν αρκετά, με την μετρούμενη να ανέρχεται περίπου στα 190 nGy h^{-1} ενώ η εκτιμώμενη να αγγίζει τα 225 nGy h^{-1} , με συνέπεια η διαφορά να είναι της τάξεως του 18%. Εξίσου υψηλές τιμές αλλά και διαφορές μεταξύ εκτιμώμενης και μετρούμενης δόσεις εμφανίζονται στις περιοχές της Στύψης και του Λεπέτυμνου. Οι πιο χαμηλές τιμές εντοπίζονται στις περιοχές του Τσίγκου, των Βασιλικών και της Θερμής. Οι δύο δόσεις στο Τσίγκο παρουσιάζουν αρκετά μεγάλη ταύτιση μεταξύ τους ενώ οι δόσεις των Βασιλικών και της Θερμής εμφανίζουν απόκλιση όμοια με αυτή τη Κάπη. Γενικά παρατηρείται πως αρκετές από τις περιοχές μέτρησης (Μόρια, Λάμπου Μύλοι, Βασιλικά, Θερμή, Κάπη, Στύψη, Λεπέτυμνος) παρουσιάζουν διαφορά μεταξύ μετρούμενης και εκτιμώμενης δόσης ενώ σε περίπου ίδιο αριθμό περιοχών (Λάρσος, Χαραμίδα, Παππάδος, Ακράσι, Νέες Κυδωνίες, Αχλαδερή) εμφανίζεται ομοιομορφία μεταξύ των δύο δόσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι από τις 20 τοποθεσίες, μόνο τρεις (Κάπη, Στύψη, Λεπέτυμνος) εμφανίζουν αποτελέσματα όπου οι τιμές του ρυθμού απορροφώμενης δόσης είναι άνω των 150 nGy h^{-1} . Οι πλειοψηφία των τιμών κυμαίνονται μεταξύ 50 και 100 nGy h^{-1} ενώ σε μερικές η μετρούμενη δόση αγγίζουν τα 150 nGy h^{-1} .

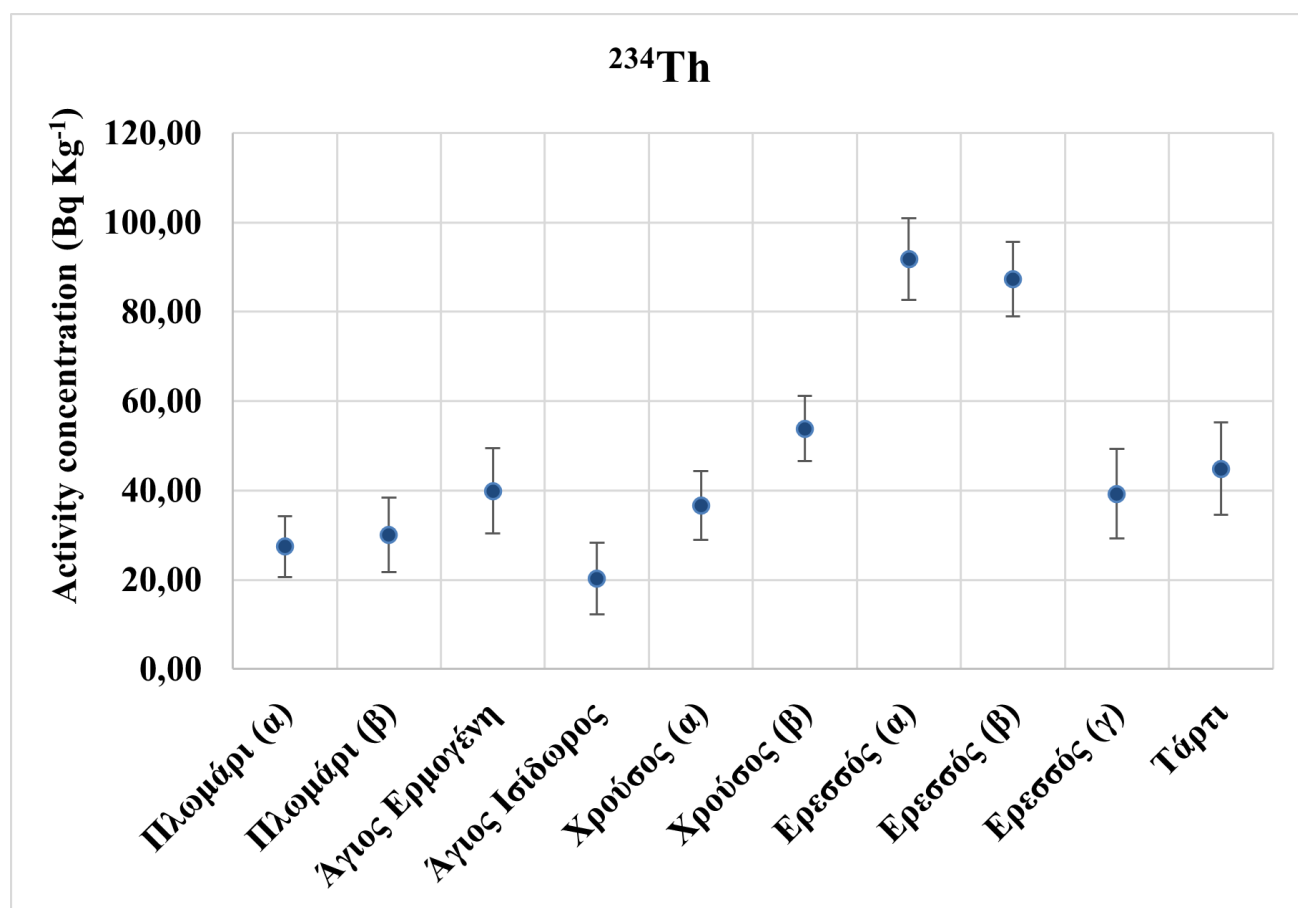
Εν γένει, παρατηρείται ικανοποιητική σύγκλιση της τάξεως του 20% μεταξύ της μετρούμενης (spir-ID) και της εκτιμώμενης δόσης (ανιχνευτής γερμανίου). Σε ελάχιστες περιπτώσεις, η απόκλιση φτάνει την τάξη του 70%. Η μεγάλη αυτή διαφορά οφείλεται στο ότι ο αλγόριθμος υπολογισμού της δόσης στον φορητό ανιχνευτή λαμβάνει υπόψη του τη «χειρότερη» περίπτωση, Δηλαδή μεταξύ δύο γειτονικών κορυφών ενός φυσικού και ενός τεχνητού ραδιοϊσοτόπου στο φάσμα, θεωρεί δεδομένη τη παρουσία του τεχνητού ραδιοϊσοτόπου, π.χ. ^{131}I (606 keV), αντί για ^{214}Bi (609 keV). Στη παρούσα εργασία, η ένδειξη αυτή (^{131}I) εμφανίστηκε στα φάσματα του spir-ID, ενώ στα φάσματα του ανιχνευτή

γερμανίου, ο οποίος έχει καλύτερη ενεργειακή διακριτική ικανότητα, δεν καταγράφηκε το εν λόγω ισότοπο.

Ακολουθεί η απεικόνιση των αποτελεσμάτων από την μέτρηση των ραδιοϊσοτόπων στα δείγματα άμμου.

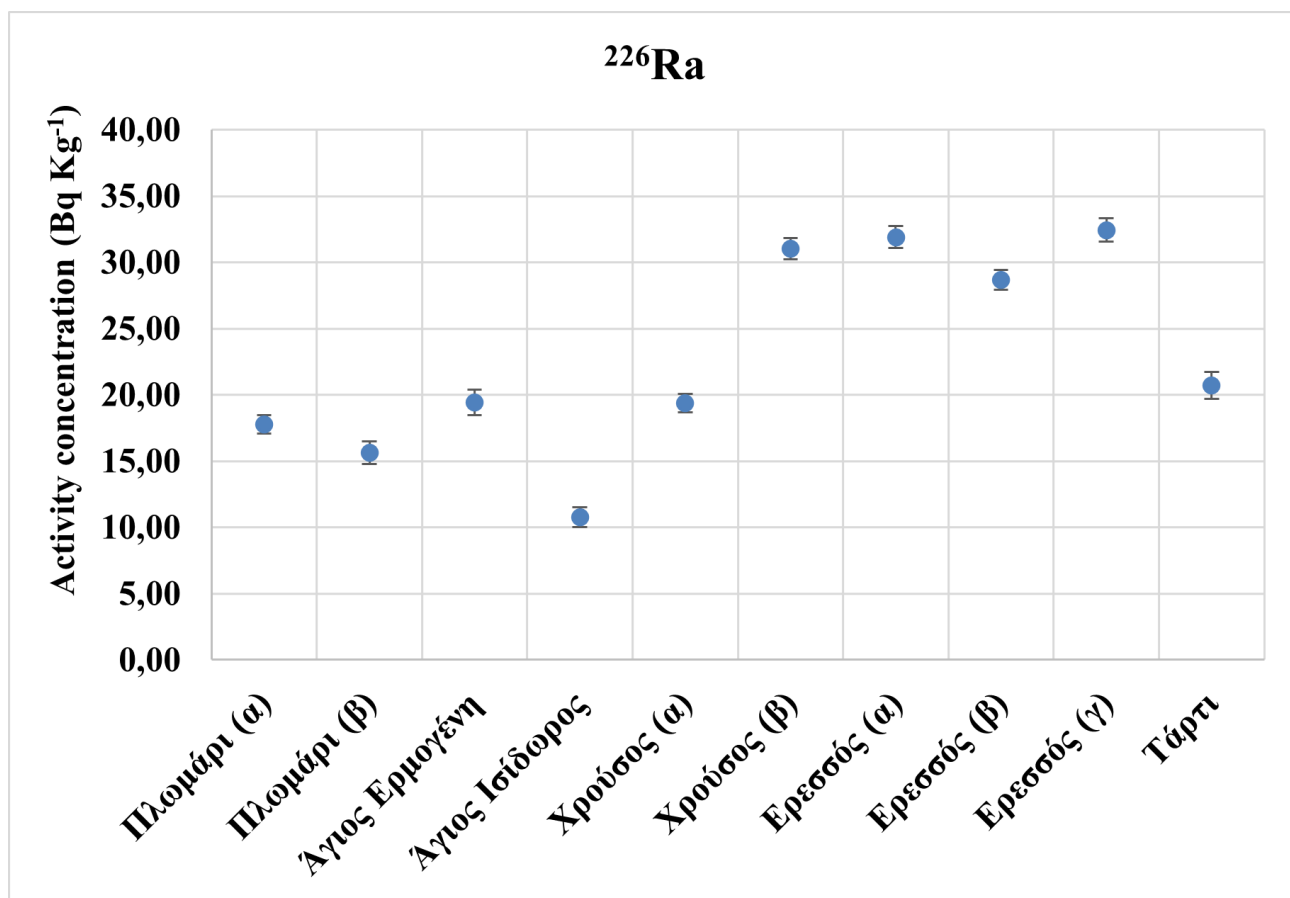
3.1.2 Μετρήσεις δειγμάτων ιζήματος

Ομοίως, η συγκέντρωση ενεργότητας των ραδιοϊσοτόπων στα δείγματα ιζήματος ακολουθείται από την αντίστοιχη αβεβαιότητα στην οποία έχουν ληφθεί υπ' όψιν οι αβεβαιότητες εξαιτίας της στατιστικής φύσης της ραδιενεργού διάσπασης, της απόδοσης του ανιχνευτή και της μάζας των δειγμάτων. Επομένως, οι σχετικές αβεβαιότητες των επιμέρους ραδιοϊσοτόπων υπολογίστηκαν ότι ήταν 22% για το ^{234}Th , 4% για το ^{226}Ra , 7% στη σειρά του ^{232}Th , 2% για το ^{40}K και 70% για το ^{137}Cs . Η σχετικά μεγάλη αβεβαιότητα στον υπολογισμό του ^{234}Th , σε σχέση με τα υπόλοιπα ισότοπα (22% > 2-7%), οφείλεται στην μεγάλη αβεβαιότητα της απόδοσης του ανιχνευτή στην ενεργειακή περιοχή που ανήκουν οι φωτοκορυφές του ^{234}Th . Στο ραδιενεργό καίσιο το ποσοστό κρίθηκε αρκετά μεγάλο με αποτέλεσμα τα αποτελέσματα να μην θεωρηθούν ιδιαίτερα αξιόπιστα.



Διάγραμμα 7: Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η συγκέντρωση ενεργότητας του φυσικού ραδιοϊσοτόπου ^{234}Th .

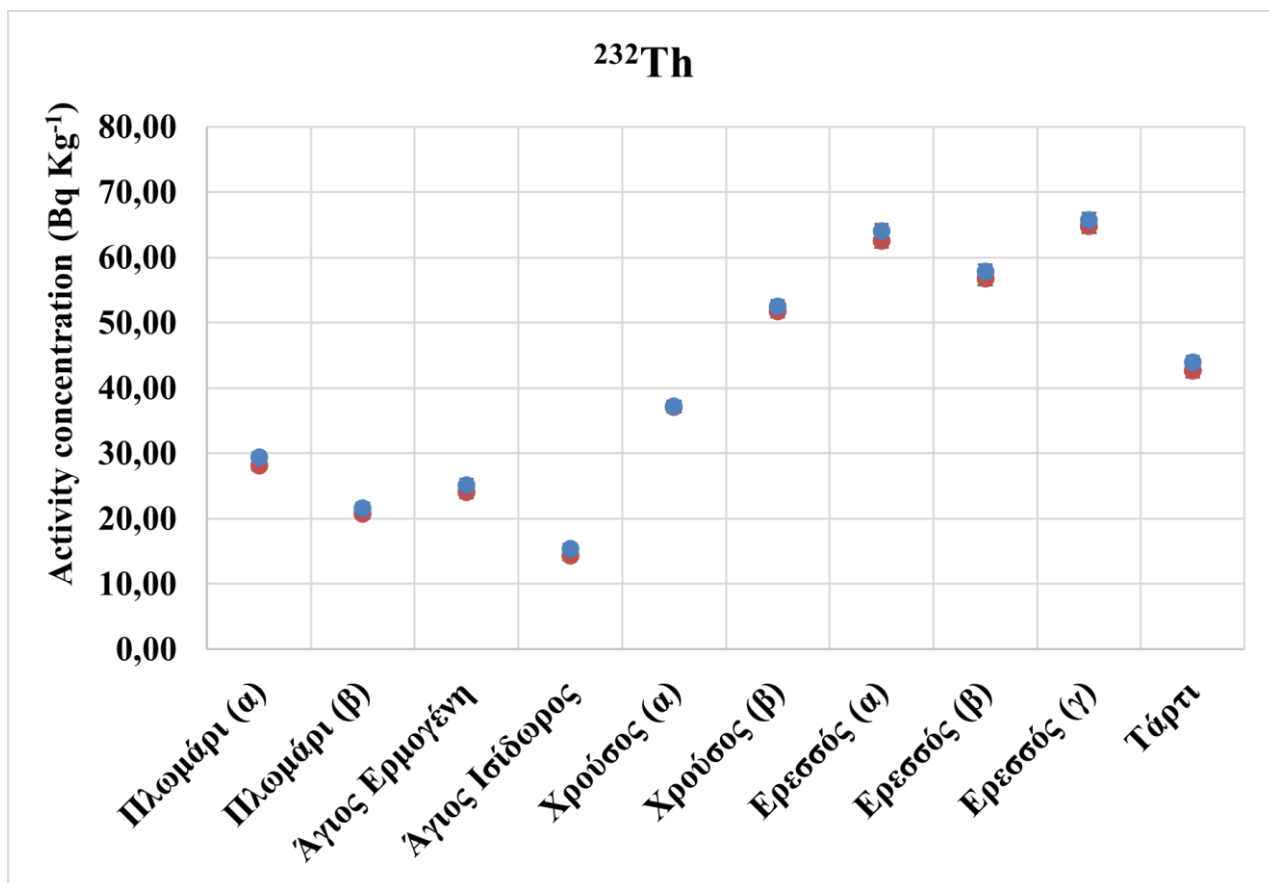
Οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στα δύο εκ των τριών δειγμάτων που συλλέχθηκαν από την παραλία της Ερεσσού (Ερεσσός α και β) και κυμαίνονται ανάμεσα στα 80 και τα 100 Bq kg⁻¹. Χαμηλότερη τιμή παρουσιάζεται στην παραλία του Αγίου Ισίδωρου (~ 20 Bq kg⁻¹) ενώ το 50% των περιοχών (Πλωμάρι α και β, Άγιος Ερμογένης, Χρούσος α και Ερεσσός γ) εμφανίζουν τιμές μεταξύ 20 και 40 Bq kg⁻¹. Οι μοναδικές περιοχές που παρουσιάζουν τιμές οι οποίες κυμαίνονται ανάμεσα στα 40 και στα 60 Bq kg⁻¹ είναι ο Χρούσος β και το Τάρτι, δηλαδή το 20% των περιοχών. Ομοίως με την συγκέντρωση ενεργότητας του ²³⁴Th στα δείγματα χώματος, παρατηρήθηκε σχετικά μεγάλη αβεβαιότητα στον υπολογισμό του ²³⁴Th σε σχέση με τα υπόλοιπα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα (11% > 1-3%), λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας της απόδοσης του ανιχνευτή στην ενεργειακή περιοχή που ανήκουν οι φωτοκορυφές του ²³⁴Th.



Διάγραμμα 8: Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η συγκέντρωση ενεργότητας του φυσικού ραδιοϊσοτόπου ²²⁶Ra.

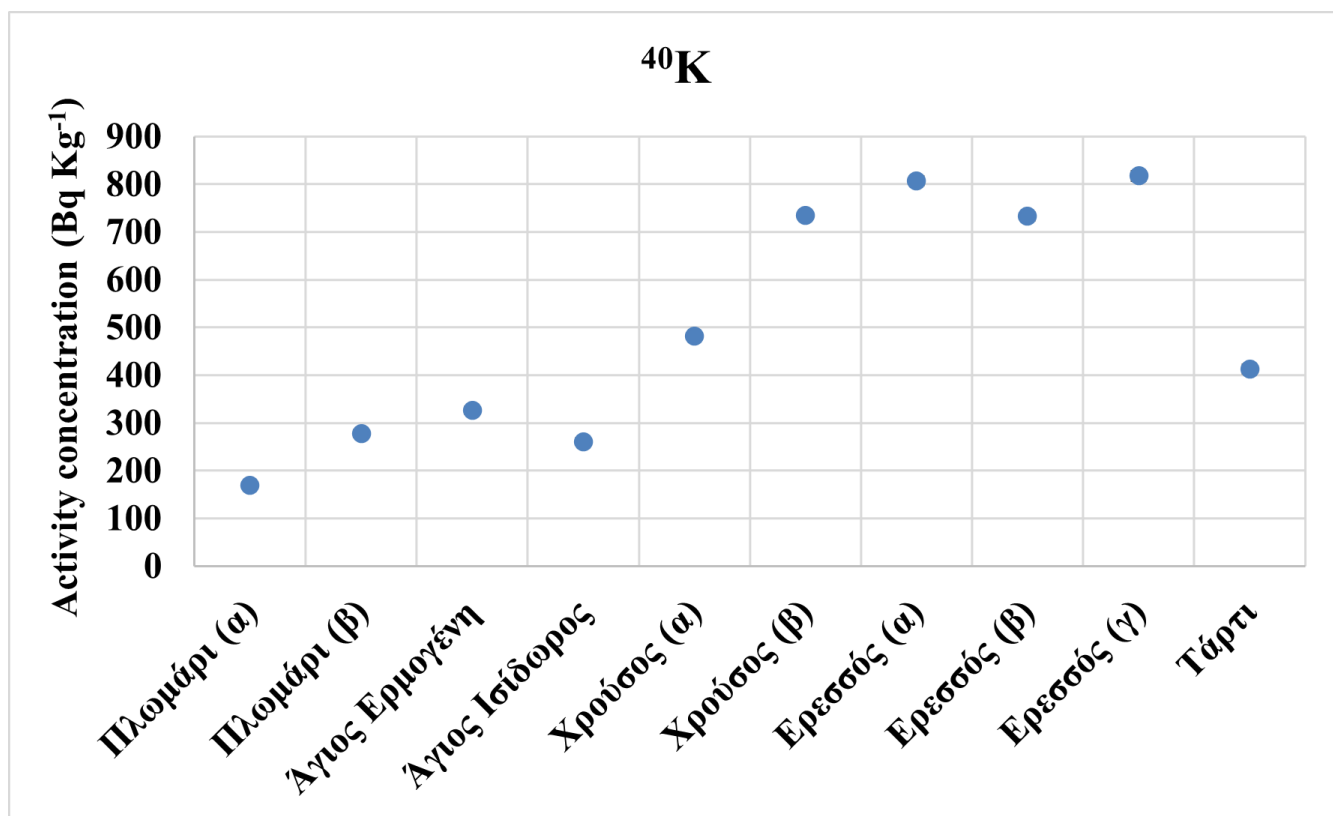
Οι υψηλότερες τιμές συγκέντρωσης ενεργότητας του ²²⁶Ra (~ 30 Bq kg⁻¹) εντοπίζονται σε όσα δείγματα ελήφθησαν από την παραλία της Ερεσσού και από το δεύτερο δείγμα που ελήφθη από την παραλία του Χρούσου (Χρούσος β). Οι υπόλοιπες έξι περιοχές αποτελούν μια διακριτή ομάδα τιμών, οι οποίες κυμαίνονται ανάμεσα στα 10 και στα 20 Bq kg⁻¹ με τη χαμηλότερη να εμφανίζεται στην παραλία του Αγίου Ισίδωρου και να είναι λίγο μεγαλύτερη από 10 Bq kg⁻¹. Ενώ κάποια αποτελέσματα από δείγματα που πάρθηκαν από την ίδια παραλία, όπως για παράδειγμα το Πλωμάρι, παρουσιάζουν

παραπλήσιες τιμές, ο Χρούσος παρουσιάζει διαφοροποίηση μεταξύ των δύο δειγμάτων του με μια διαφορά της τάξεως των 10 Bq kg^{-1} ανάμεσα στα δύο δείγματα του.



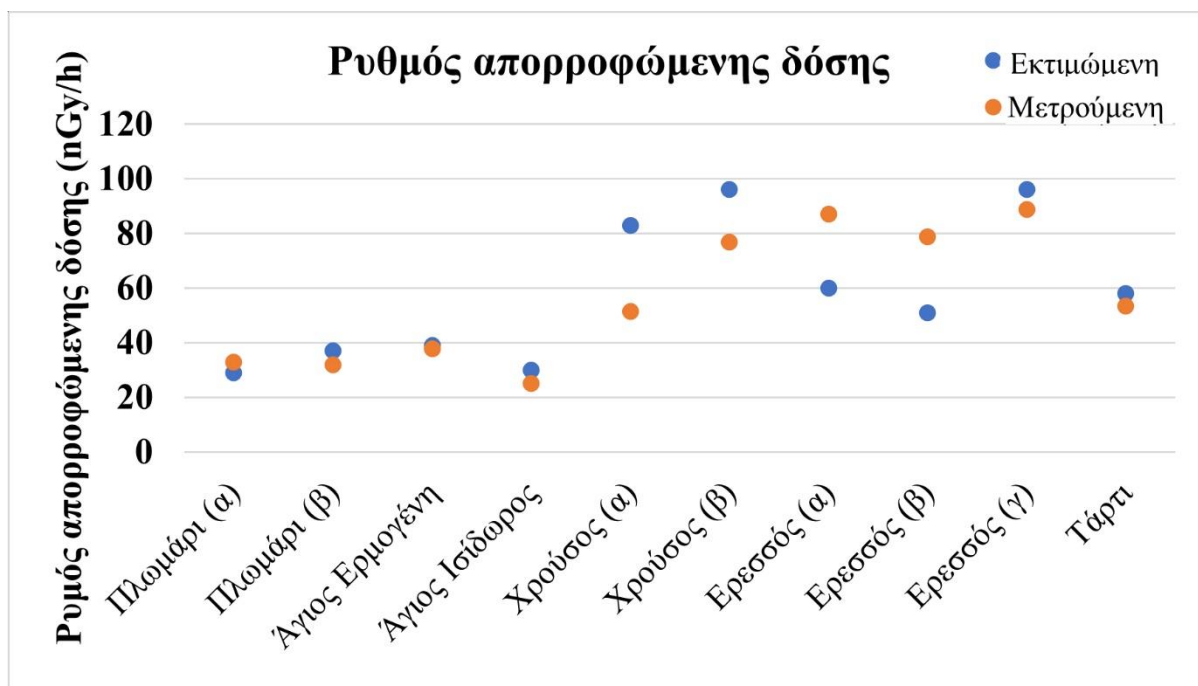
Διάγραμμα 9: Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η συγκέντρωση ενεργότητας της σειράς του φυσικού ραδιοϊσοτόπου ^{232}Th .

Οι μέγιστες τιμές παρουσιάζονται στα τρία δείγματα που συλλέχθηκαν από την Ερεσσό. Οι υψηλότερη τιμή (Ερεσσός γ) προσεγγίζει τα 70 Bq kg^{-1} με τις δύο μικρότερες να μην εμφανίζουν ιδιαίτερη μείωση ($\sim 60 \text{ Bq kg}^{-1}$). Η συγκέντρωση ενεργότητας στο δείγμα από τη παραλία του Άγιου Ισίδωρου εξακολουθεί να παρουσιάζει την μικρότερη τιμή, περίπου 15 Bq kg^{-1} , ακολουθούμενη από τις τιμές στον Άγιο Ερμογένη και το Πλωμάρι, οι οποίες κυμαίνονται ανάμεσα στα 20 και στα 30 Bq kg^{-1} . Η αμέσως μεγαλύτερη τιμή είναι κοντά στα 40 Bq kg^{-1} και ανήκει στο πρώτο δείγμα που ελήφθη από τη παραλία του Χρούσου. Σύμφωνα με τις παραπάνω παρατηρήσεις, η ελάχιστη τιμή (Άγιος Ισίδωρος) με την μέγιστη τιμή (Ερεσσός γ) έχουν μια διαφορά της τάξεως των 50 Bq kg^{-1} .



Διάγραμμα 10: Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η συγκέντρωση ενεργότητας του φυσικού ραδιοϊσοτόπου ^{40}K .

Για το ραδιενεργό κάλιο παρατηρήθηκαν παρόμοια αποτελέσματα στις διαφορές μεταξύ των περιοχών αν και σε σημαντικά μεγαλύτερη κλίμακα. Για παράδειγμα, η μέγιστη τιμή της συγκέντρωσης της ενεργότητας του ^{40}K είναι πάνω από 800 Bq kg^{-1} και εντοπίζεται στο τρίτο δείγμα της Ερεσσούς. Ακολουθούν οι Ερεσσός α και β, καθώς και ο Χρούσος β, με τιμές κυμαινόμενες ανάμεσα στα 700 και στα 800 Bq kg^{-1} . Η μικρότερη τιμή βρίσκεται στο πρώτο δείγμα που λήφθηκε από το Πλωμάρι ($\sim 200 \text{ Bq kg}^{-1}$) και ακολουθείται από το δεύτερο δείγμα από την ίδια παραλία ($\sim 300 \text{ Bq kg}^{-1}$) καθώς και από τις τιμές των δειγμάτων από Άγιο Ερμογένη και Άγιο Ισίδωρο ($\sim 300 \text{ Bq kg}^{-1}$). Όπως και στα προηγούμενα διαγράμματα, εντοπίζεται σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο δειγμάτων της παραλίας του Χρούσου. Το πρώτο δείγμα εμφανίζει τιμή μικρότερη των 500 Bq kg^{-1} , δημιουργώντας έτσι μια διαφορά μεγαλύτερη των 200 Bq kg^{-1} με το δεύτερο δείγμα.



Διάγραμμα 11: Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται ο μετρούμενος και ο εκτιμώμενος ρυθμός δόσης.

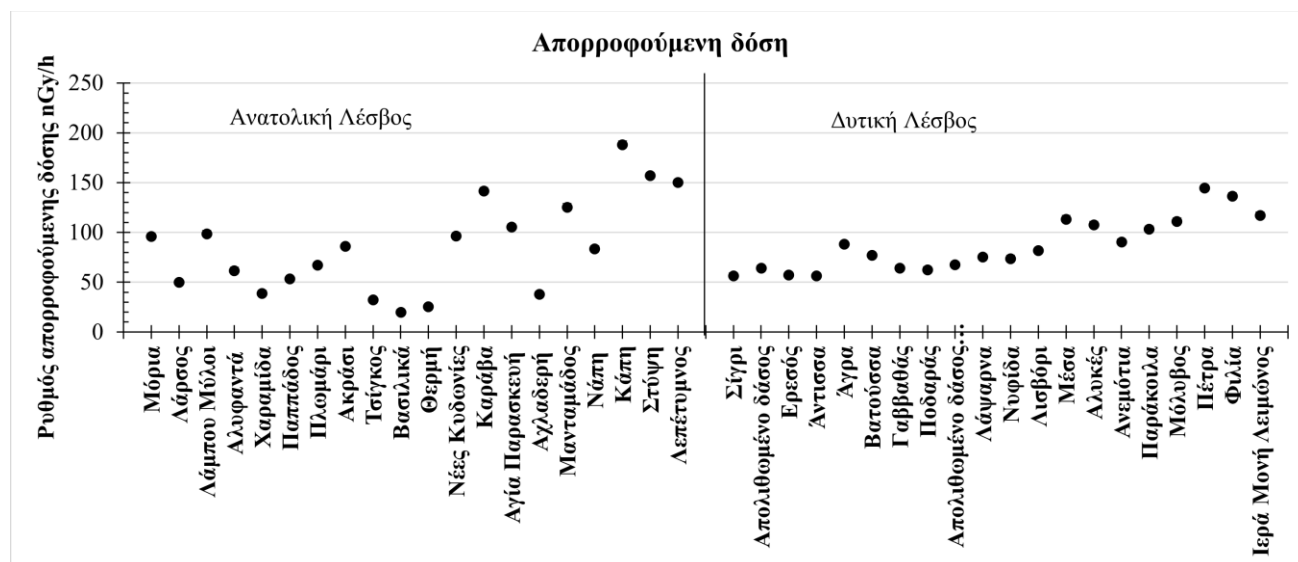
Παραπάνω εμφανίζεται η σύγκριση μεταξύ μετρούμενης δόσης, η οποία υπολογίστηκε κατά τις επιτόπιες μετρήσεις στις παραλίες με τον φορητό ανιχνευτή Spir-ID, και της εκτιμώμενης δόσης η οποία υπολογίστηκε με τον ανιχνευτή γερμανίου. Η μέγιστη τιμή παρουσιάζεται στο τρίτο δείγμα που ελήφθη από την παραλία της Ερεσσού (Ερεσσός γ), λίγο μικρότερη από τα 100 nGy h⁻¹. Εξίσου υψηλές τιμές, αν και με μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο δόσεων, εμφανίζουν και τα υπόλοιπα δείγματα από την Ερεσσό (50 – 80 nGy h⁻¹) αλλά και τα δείγματα από την παραλία του Χρούσου (50 – 100 nGy h⁻¹). Στα υπόλοιπα έξι δείγματα εμφανίζεται μεγαλύτερη ταύτιση μεταξύ των δύο δόσεων. Οι τιμές που υπολογίστηκαν για το Τάρτι προσεγγίζουν τα 60 nGy h⁻¹ ενώ όλες οι υπόλοιπες περιοχές (Πλωμάρι, Άγιος Ερμογένης και Άγιος Ισίδωρος) παρουσιάζουν τιμές που κυμαίνονται ανάμεσα στα 20 και στα 40 nGy h⁻¹.

Ομοίως με τα δείγματα χερσαίου εδάφους, παρατηρείται ικανοποιητική σύγκλιση της τάξεως του 20% μεταξύ της μετρούμενης (spir-ID) και της εκτιμώμενης δόσης (ανιχνευτής γερμανίου). Σε ελάχιστες περιπτώσεις, η απόκλιση φτάνει την τάξη του 50%. Η εξήγηση αυτής της απόκλισης δόθηκε στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων του χώματος (βλ. 3.1.1).

4. Σχολιασμός επί των αποτελεσμάτων - Συζήτηση

Σε γενικές γραμμές παρατηρούνται διαφορές μεταξύ των τιμών συγκέντρωσης που υπολογίστηκαν για τη παρούσα εργασία και του μέσου όρου των τιμών που έχουν υπολογιστεί για την Ελλάδα (Πίνακας 5). Για παράδειγμα, οι μέγιστες τιμές για τα ραδιοϊσότοπα ^{226}Ra και ^{40}K στην Ανατολική Λέσβο, είναι 92 Bq kg^{-1} και 958 Bq kg^{-1} αντίστοιχα, αλλά δεν ξεπερνούν τις τιμές των ίδιων ραδιοϊσοτόπων για την Ελλάδα που είναι αντίστοιχως 240 Bq kg^{-1} και 1570 Bq kg^{-1} , όπως αναφέρεται στο UNSCEAR (2000). Ωστόσο, η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης για το ^{232}Th (190 Bq kg^{-1}) ξεπερνάει κατά πολύ την αντίστοιχη τιμή για την Ελλάδα, η οποία είναι 21 Bq kg^{-1} . Ομοίως αυξημένες εμφανίζονται οι τιμές των συγκεντρώσεων των τριών παραπάνω φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων σε σχέση με τον παγκόσμιο όρο (UNSCEAR 2000).

Συγκριτικά με παρόμοια εργασία που πραγματοποιήθηκε στο παρελθόν για την δυτική Λέσβο (Κρεμενιώτη, 2020), παρατηρούνται υψηλότερες τιμές συγκέντρωσης ενεργότητας, τόσο για την φυσική, όσο και για την τεχνητή ραδιενέργεια του νησιού (βλ. Παράρτημα Α.3). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι μέγιστες τιμές για τα ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K στην Ανατολική Λέσβο είναι 92, 190 και 958 Bq kg^{-1} , εμφανίζοντας αύξηση σε σχέση με τις μέγιστες τιμές που υπολογίστηκαν για την δυτική Λέσβο (90, 128 και 770 Bq kg^{-1} αντίστοιχα). Το ίδιο ισχύει και για το τεχνητό ραδιενεργό ισότοπο ^{137}Cs , του οποίου η συγκέντρωση ενεργότητας παρουσίασε μέγιστη τιμή στα 70 Bq kg^{-1} για την ανατολική Λέσβο, ενώ η μέγιστη τιμή για τη δυτική Λέσβο ήταν στα 46 Bq kg^{-1} . Όσον αφορά την απορροφούμενη δόση, η μέγιστη τιμή για την παρούσα εργασία εμφανίζεται στο χωριό Κάπη ($\sim 200 \text{ nGy h}^{-1}$) ενώ για τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στη δυτική Λέσβο η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στην Πέτρα ($\sim 150 \text{ nGy h}^{-1}$). Οι διαφορές αυτές ενδέχεται να οφείλονται στο γεωλογικό υπόβαθρο της Λέσβου.



Διάγραμμα 12: Σύγκριση της απορροφούμενης δόσης μεταξύ Ανατολικής και Δυτικής Λέσβου

Παρόμοιες μελέτες έχουν λάβει χώρα στο παρελθόν, με πιο πρόσφατη αυτή των Papadopoulos et al (2013), η οποία είχε επικεντρωθεί σε δείγματα εδάφους πλούσια σε πλουτωνικά πετρώματα (γρανίτες) από διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Οι συγκεντρώσεις ενεργότητας των ραδιοϊσοτόπων ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K στις μετρήσεις τους παρουσιάζονται αυξημένες σε σύγκριση τις συγκεντρώσεις που βρέθηκαν

στην παρούσα εργασία στα δείγματα χώματος της ανατολικής Λέσβου, με τις μέγιστες τιμές τους να αγγίζουν τα 315, 376 και 1632 Bq kg⁻¹.

Επίσης, δύο μελέτες διεξήχθησαν στη Μήλο, της οποίας τα εδάφη αποτελούνται από παρόμοια ηφαιστειογενή πετρώματα. Η παλαιότερη, των Florou and Kritidis (1992) παρουσίασαν για τις συγκεντρώσεις ενεργότητας των ²²⁶Ra, ²³²Th μέγιστες τιμές χαμηλότερες από αυτές που υπολογίστηκαν στη παρούσα εργασία, της τάξεως των 81 και 85 Bq kg⁻¹ αντίστοιχα. Ωστόσο το ⁴⁰K εμφάνισε πολύ μεγαλύτερη τιμή (1593 Bq kg⁻¹) από αυτή που υπολογίστηκε για την ανατολική Λέσβο. Αρκετά χρόνια αργότερα, πραγματοποιήθηκε ξανά έρευνα στο νησί της Μήλου από τους Florou et al. (2007). Αυτή τη φορά, όχι μόνο η μέγιστη τιμή του ⁴⁰K (1796 Bq kg⁻¹) αλλά και αυτή του ²²⁶Ra παρουσίασε αύξηση σε σχέση με τις τιμές για την ανατολική Λέσβο, αν και η διαφορά ήταν σχεδόν αμελητέα (101 Bq kg⁻¹). Η συγκέντρωση ενεργότητας του ²³²Th, ωστόσο, εμφάνισε μειωμένη μέγιστη τιμή της τάξεως των 94 Bq kg⁻¹.

Πίνακας 5: Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές που βρέθηκαν για τις συγκεντρώσεις ενεργότητας, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας με άλλες παλαιότερες.

Έδαφος (Bq kg ⁻¹)							
		²³⁴ Th	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	
Ανατολική Λέσβος	min	22	11	13	142	2	Παρούσα εργασία
	max	194	92	190	958	70	
Δυτική Λέσβος	min		20	40	340	4	Κρεμενιώτη, 2020
	max		90	128	770	46	
Μήλος	min		21	26	458		Florou et al, 2007
	max		101	94	1796		
Μήλος	min		19	16	152		Florou and Kritidis 1992
	max		81	85	1593		
Γρανίτες (Ελλάδα)	min		1	2	55		Papadopoulos et al., 2013
	max		315	376	1632		
Ελλάδα	min		1	1	12		UNSCEAR, 2000
	max		240	21	1570		
Παγκοσμίως (μέσος όρος ανά χώρα)	min		17	11	140		UNSCEAR, 2000
	max		60	64	850		

5. Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, σε δείγματα χώματος παρουσιάζονται μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ενεργότητας σε όλα τα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα από ότι σε δείγματα ιζήματος. Πιο συγκεκριμένα, τα δείγματα χώματος που συλλέχθηκαν από την περιοχή της Κάπης έδειξαν τις υψηλότερες τιμές συγκέντρωσης ενεργότητας των ^{234}Th , ^{226}Ra και ^{232}Th . Οι τιμές κυμαίνονταν περίπου ανάμεσα στα 100 και στα 200 Bq kg^{-1} ενώ οι τιμές των ίδιων ραδιοϊσοτόπων στα δείγματα άμμου δεν ξεπερνούσαν τα 100 Bq kg^{-1} . Διαφορά ανάμεσα στους δύο τύπους δειγμάτων εμφανίζεται και στις συγκεντρώσεις ενεργότητας του ^{40}K , με την υψηλότερη τιμή σε δείγμα χώματος να εντοπίζεται στην περιοχή των Λάμπου Μύλων ($\sim 1000 \text{ Bq kg}^{-1}$) ενώ η μέγιστη τιμή στα δείγματα άμμου παρουσιάζεται σε δείγμα που ελήφθη από την παραλία της Ερεσσού και είναι λίγο μεγαλύτερη από τα 800 Bq kg^{-1} .

Αναφορικά με τα δείγματα χώματος, δεν παρατηρήθηκε υψηλή συγκέντρωση ενεργότητας ^{137}Cs , του οποίου η μέγιστη τιμή εμφανίζεται στην περιοχή της Στύψης (70 Bq kg^{-1}). Στο 25% των περιοχών που πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες χώματος, οι τιμές της συγκέντρωσης του ραδιενεργού καισίου ήταν χαμηλότερες των 10 Bq kg^{-1} . Συνεπώς τα αποτελέσματα έδειξαν πως η τεχνητή ραδιενέργεια που συναντάται στα εδάφη της Ανατολικής Λέσβου δεν ξεπερνάει την φυσική. Όσον αφορά τις μετρήσεις που έγιναν στα δείγματα παραλιών, οι τιμές της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^{137}Cs εμφάνισαν σημαντική αβεβαιότητα (ποσοστό σφάλματος περίπου 50%) με συνέπεια τα αποτελέσματα να θεωρηθούν μη αξιόπιστα.

Στα δείγματα χώματος, τα αποτελέσματα ανάμεσα στις μετρήσεις των μετρούμενων δόσεων που υπολογίστηκαν με τον φορητό ανιχνευτή και των εκτιμώμενων δόσεων που υπολογίστηκαν στον ανιχνευτή γερμανίου δεν παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις. Μόνο σε ελάχιστες περιπτώσεις εμφανίζεται απόκλιση της τάξεως του 50-70% στους δύο τύπους δειγμάτων. Η μέγιστη τιμή της εκτιμώμενης δόσης παρουσιάζεται στο δείγμα που ελήφθη από την περιοχή της Κάπης, περίπου στα 225 nGy h^{-1} . Σχετικά με τα δείγματα ιζήματος, η μέγιστη τιμή της δόσης που μετρήθηκε με τον ανιχνευτή γερμανίου εμφανίζεται σε δείγμα που συλλέχτηκε από την παραλία της Ερεσσού ($\sim 100 \text{ nGy h}^{-1}$). Ωστόσο, εξίσου μεγάλη τιμή παρουσιάζεται και σε δείγμα από την παραλία του Χρούσου.

Η διαφορά που παρατηρήθηκε μεταξύ της μετρούμενης δόσης του spir-ID και της εκτιμώμενης δόσης του ανιχνευτή γερμανίου αποδόθηκε στην ενεργειακή διακριτική ικανότητα του φορητού ανιχνευτή, ο οποίος μεταξύ δύο ραδιοϊσοτόπων, ενός φυσικού και ενός τεχνητού, φαίνεται να θεωρεί πιθανότερη τη παρουσία του τεχνητού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αντωνόπουλος - Ντόμης, Μ. (2004). Ραδιενέργεια σε απλά ελληνικά. Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ε.ΚΕ.ΦΕ. "Δημόκριτος".

Βεργανελάκης, Α., Κρητίδης, Π., Οικονόμου, Α., Παπάζογλου, Γ., Παπανικολάου, Ε., Σιδέρης, Α., & Σιμόπουλος, Θ. (1989). Εμείς και η ραδιενέργεια. Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.

ΕΕΑΕ Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΧΕΙΡΙΣΤΕΣ ΙΑΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΙΟΝΤΙΖΟΥΣΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ, Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, Ιατρική Σχολή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2011

Ζορμπά, Ο., 2019. Ανάπτυξη Ανιχνευτικού Συστήματος Κοσμικών Ακτίνων για τη Μελέτη Ανιχνευτή Micromegas (Master's thesis).

Θωμάϊδου, Ε. (2009). Η ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΛΕΣΒΟΥ. Θεσσαλονίκη: ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ.

Κοντής, Ε., 1998. ΛΙΘΟΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΟΓΕΝΕΣΗ ΜΕΤΑΛΛΟΦΟΡΙΑΣ ΧΡΥΣΟΥΑΡΓΥΡΟΥ ΚΑΙ ΑΛΛΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΤΗΣ ΒΟΡΕΙΑΣ ΛΕΣΒΟΥ. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ). <https://doi.org/10.12681/eadd/10876>

Κρεμενιώτη, Ο., 2020. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΔΥΤΙΚΗ ΛΕΣΒΟ ΜΕ γ-ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ (Πτυχιακή εργασία)

Παππά, Φ.Κ., 2014. Μελέτη και Διασπορά Ραδιο-τοξικών Μετάλλων από ανθρωπογενείς δραστηριότητες σε Παράκτια Ζώνη της Χαλκιδικής (Master's thesis).

Λεοντάρης Φ., 2020. Απόκριση ανιχνευτών ελέγχου ραδιενέργειας περιβάλλοντος στη γήινη και κοσμική ακτινοβολία. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ), Σχολή Πολυτεχνική, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας. <https://doi.org/10.12681/eadd/49740>

Alam, M.K., Chakraborty, S.R., Rahman, A.K.M.R., Deb, A.K., Kamal, M., Chowdhury, M.I., Uddin, M.S., 2013. Measurement of physiochemical parameters and determination of the level of radiological threat to the population associated with the Karnaphuli River sediment containing municipal and industrial wastes of Chittagong city in Bangladesh. Radiation Protection Dosimetry 153, 316–327. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncs117>

Ali, M.M.M., Li, Z., Zhao, H., Rawashdeh, A., Al Hassan, M., Ado, M., 2021. Characterization of the health and environmental radiological effects of TENORM and radiation hazard indicators in petroleum waste –Yemen. Process Safety and Environmental Protection 146, 451–463. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.11.016>

Bréchignac, F., Oughton, D., Mays, C., Barnthouse, L., Beasley, J.C., Bonisoli-Alquati, A., Bradshaw, C., Brown, J., Dray, S., Geras'kin, S., Glenn, T., Higley, K., Ishida, K., Kapustka, L., Kautsky, U., Kuhne, W., Lynch, M., Mappes, T., Mihok, S., Møller, A.P., Mothersill, C., Mousseau, T.A., Otaki, J.M., Pryakhin, E., Rhodes, O.E., Salbu, B., Strand, P., Tsukada, H., 2016. Addressing ecological effects of radiation on populations and ecosystems to improve protection of the environment against radiation: Agreed statements from a Consensus Symposium. Journal of Environmental Radioactivity 158–159, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.03.021>

- Brechignac, F., Polikarpov, G., Oughton, D.H., Hunter, G., Alexakhin, R., Zhu, Y.G., Hilton, J., Strand, P., 2003. Protection of the environment in the 21st century: radiation protection of the biosphere including humankind. *Journal of Environmental Radioactivity* 70, 155–159. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(03\)00131-0](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(03)00131-0)
- Buchtela, K., 2005. RADIOCHEMICAL METHODS | Gamma-Ray Spectrometry, in: Worsfold, P., Townshend, A., Poole, C. (Eds.), *Encyclopedia of Analytical Science* (Second Edition). Elsevier, Oxford, pp. 72–79. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00525-2>
- Currie, P. J., Padian, K., (1997). *Encyclopedia of Dinosaurs*. San Diego, Academy Press
- Delistraty, D., 2008. Radioprotection of nonhuman biota. *Journal of Environmental Radioactivity* 99, 1863–1869. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.09.001>
- Florou, H., Trabidou, G., Nicolaou, G., 2007. An assessment of the external radiological impact in areas of Greece with elevated natural radioactivity. *Journal of Environmental Radioactivity* 93, 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.11.009>
- Florou, H., Kritidis, P., 1992. Gamma Radiation Measurements and Dose Rate in the Coastal Areas of a Volcanic Island, Aegean Sea, Greece. *Radiation Protection Dosimetry* 45, 277–279. <https://doi.org/10.1093/rpd/45.1-4.277>
- Gillings, N., 2021. Quality control of radiopharmaceuticals: Basics and instrumentation, in: *Reference Module in Biomedical Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822960-6.00053-3>
- Gonzalez, A.J., Anderer, J., 1989. Radiation versus radiation: Nuclear energy in perspective. *IAEA BULLETIN* 2
- Henri Becquerel – Biographical. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2021. Wed. 17 Nov 2021.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Guidelines on Soil and Vegetation Sampling for Radiological Monitoring*, Technical Reports Series, 2019
- Katsikatsos, G., Migiros, G., Triantaphyllis, M. and Mettos, A. (1986). Geological structure of the internal Hellenides (E. Thessaly - SW. Macedonia, Euboea - Attica - Northern Cyclades Islands and Lesvos). *I.G.M.E. Geological and Geophysical Research*, Sp.Issue, pp.191-212.
- Kilic, O., Belivermis, M., Topcuoglu, S., Cotuk, Y., Coskun, M., Cayir, A., Kucer, R., 2007. Radioactivity concentrations and dose assessment in surface soil samples from east and south of Marmara region, Turkey. *Radiation Protection Dosimetry* 128, 324–330. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncm400>
- Kovar, P., Sommer, M., Matthiae, D., Reitz, G., 2020. Measurement of cosmic radiation in LEO by 1U CubeSat. *Radiation Measurements* 139, 106471. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2020.106471>
- Marghany, M., 2020. Chapter 3 - Quantization of Maxwell's equations, in: Marghany, M. (Ed.), *Synthetic Aperture Radar Imaging Mechanism for Oil Spills*. Gulf Professional Publishing, pp. 41–60. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818111-9.00003-3>
- Marmier P., Sheldon E. (1969). *Physics of nuclei and particles*. Vol. 1. New York ; London: Academic Press

- Papadopoulos, A., Christofides, G., Koroneos, A., Papadopoulou, L., Papastefanou, C., Stoulos, S., 2013. Natural radioactivity and radiation index of the major plutonic bodies in Greece. *Journal of Environmental Radioactivity* 124, 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.06.002>
- Papaefthymiou, H., Gouseti, O., 2008. Natural radioactivity and associated radiation hazards in building materials used in Peloponnese, Greece. *Radiation Measurements* 43, 1453–1457. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.03.032>
- Pentreath, R.J., 2009. Radioecology, radiobiology, and radiological protection: frameworks and fractures. *Journal of Environmental Radioactivity* 100, 1019–1026. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.06.004>
- Pertsov, L.A. (1967). The natural radioactivity of the biosphere (AEC-TR--6714). International Atomic Energy Agency (IAEA)
- Petropoulos, N.P., Anagnostakis, M.J., Hiniš, E.P., Simopoulos, S.E., 2001. Geographical mapping and associated fractal analysis of the long-lived Chernobyl fallout radionuclides in Greece. *Journal of Environmental Radioactivity* 53, 59–66. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(00\)00111-9](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(00)00111-9)
- Psichoudaki, M., Papaefthymiou, H., 2008. Natural radioactivity measurements in the city of Ptolemais (Northern Greece). *Journal of Environmental Radioactivity* 99, 1011–1017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.12.001>
- Reilly, D., Ensslin, N., Smith, H., Kreiner, S., Los Alamos National Laboratory (U.S.), E.-U., Nuclear Regulatory Commission, 1991. Passive nondestructive assay of nuclear materials. US Department of Commerce, National Technical Information Service, Springfield, VA.
- Rhodes, O.E., Bréchnignac, F., Bradshaw, C., Hinton, T.G., Mothersill, C., Arnone, J.A., Aubrey, D.P., Barnhouse, L.W., Beasley, J.C., Bonisoli-Alquati, A., Boring, L.R., Bryan, A.L., Capps, K.A., Clément, B., Coleman, A., Condon, C., Coutelot, F., DeVol, T., Dharmarajan, G., Fletcher, D., Flynn, W., Gladfelder, G., Glenn, T.C., Hendricks, S., Ishida, K., Jannik, T., Kapustka, L., Kautsky, U., Kennamer, R., Kuhne, W., Lance, S., Laptyev, G., Love, C., Manglass, L., Martinez, N., Mathews, T., McKee, A., McShea, W., Mihok, S., Mills, G., Parrott, B., Powell, B., Pryakhin, E., Rypstra, A., Scott, D., Seaman, J., Seymour, C., Shkvyrina, M., Ward, A., White, D., Wood, M.D., Zimmerman, J.K., 2020. Integration of ecosystem science into radioecology: A consensus perspective. *Science of The Total Environment* 740, 140031. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140031>
- Salbu, B., 2009. Challenges in radioecology. *Journal of Environmental Radioactivity* 100, 1086–1091. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.04.005>
- Shultis, J.K., Faw, R.E., 2002. Fundamentals of nuclear science and engineering. Marcel Dekker, New York.
- Shultis, J.K., Faw, R.E., 1996. Radiation Shielding, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ
- Smith, D.R., Nordberg, M., 2015. Chapter 2 - General Chemistry, Sampling, Analytical Methods, and Speciation*, in: Nordberg, G.F., Fowler, B.A., Nordberg, M. (Eds.), *Handbook on the Toxicology of Metals* (Fourth Edition). Academic Press, San Diego, pp. 15–44. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59453-2.00002-0>
- Szymańska, K., Strumińska-Parulska, D., Falandysz, J., 2020. Uranium (²³⁴U, ²³⁸U) and thorium (²³⁰Th, ²³²Th) in mushrooms of genus *Leccinum* and *Leccinellum* and the potential effective ionizing

radiation dose assessment for human. Chemosphere 250, 126242.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126242>

Tzortzis, M., 2004. A comprehensive study of natural gamma radioactivity levels and associated dose rates from surface soils in Cyprus. Radiation Protection Dosimetry 109, 217–224.

UNSCEAR. (2000). *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. New York: United Nations Publication.

Young, H. D., Freedman, R. A., Ford, A. L., & Sears, F. W. (2004). *Sears and Zemansky's university physics: With modern physics*. San Francisco: Pearson Addison Wesley.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Α.1 Διαδραστικός χάρτης σημείων δειγματοληψίας

Στον παρακάτω σύνδεσμο παρουσιάζεται διαδραστικός χάρτης που κατασκευάστηκε μέσω του Google Maps και εμφανίζει τις συντεταγμένες των 20 σημείων δειγματοληψίας χώματος (μαζί με τις τέσσερις επιμέρους κορυφές τετραγώνου πλευράς περίπου 1 km) και των 10 σημείων δειγματοληψίας ιζήματος

<https://www.google.com/maps/d/edit?mid=1Hkl9GBrwp7FRCgz9l3KSJ91YMmXXB2x>

Α.2 Πίνακες επιτόπιων μετρήσεων και δόσεων

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι τιμές των μετρούμενων ρυθμών απορροφούμενης δόσης σε nGy h^{-1} , οι οποίες υπολογίστηκαν από τις επιτόπιες μετρήσεις στα σημεία δειγματοληψίας (χώματος και άμμου) με τον φορητό ανιχνευτή Spir-ID, καθώς και οι εκτιμώμενοι ρυθμοί απορροφούμενης δόσης σε nGy h^{-1} , οι οποίες υπολογίστηκαν με τον ανιχνευτή γερμανίου μέσω φασματοσκοπίας γάμμα.

Πίνακας 6 : Συγκεντρωτικός πίνακας με τις μετρήσεις του Spir-ID (μετρούμενος ρυθμός απορροφούμενης δόσης) και του ανιχνευτή γερμανίου (εκτιμώμενος ρυθμός ισοδύναμης δόσης) για τα δείγματα χώματος

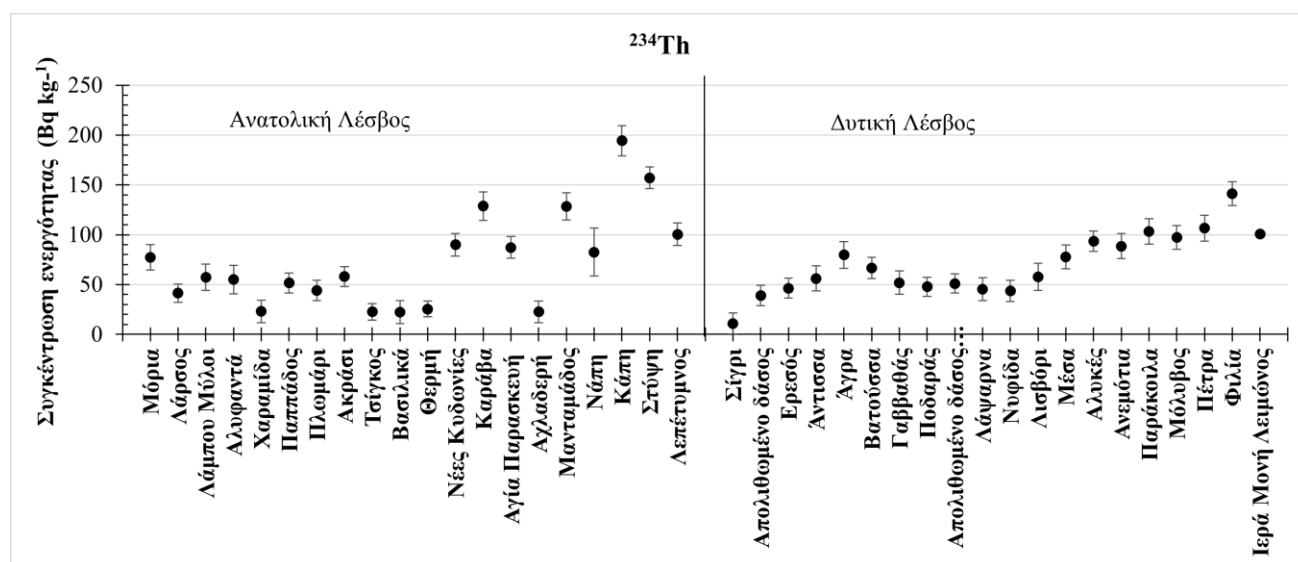
A/A	Περιοχή Δειγματοληψίας	Μετρούμενος ρυθμός απορροφούμενης δόσης (nGy h^{-1})	Εκτιμώμενος ρυθμός απορροφούμενης δόσης (nGy h^{-1})
1	Μόρια	55	95
2	Λάρσος	42	49
3	Λάμπου Μύλοι	139	98
4	Αλυφαντά	76	61
5	Χαραμίδα	45	38
6	Παππάδος	58	53
7	Πλωμάρι	84	67
8	Ακράσι	90	86
9	Τσίγκος	41	32
10	Βασιλικά	53	19
11	Θερμή	61	25
12	Νέες Κυδωνίες	88	96
13	Καράβα	120	141
14	Αγία Παρασκευή	88	105
15	Αχλαδερή	40	38
16	Μανταμάδος	145	125
17	Νάπη	99	83
18	Κάπη	225	187
19	Στύψη	207	157
20	Λεπέτυμνος	185	150

Πίνακας 7 : Συγκεντρωτικός πίνακας με τις μετρήσεις του Spir-ID (μετρούμενος ρυθμός ισοδύναμης δόσης) και του ανιχνευτή γερμανίου (εκτιμώμενος ρυθμός ισοδύναμης δόσης) για τα δείγματα ιζήματος

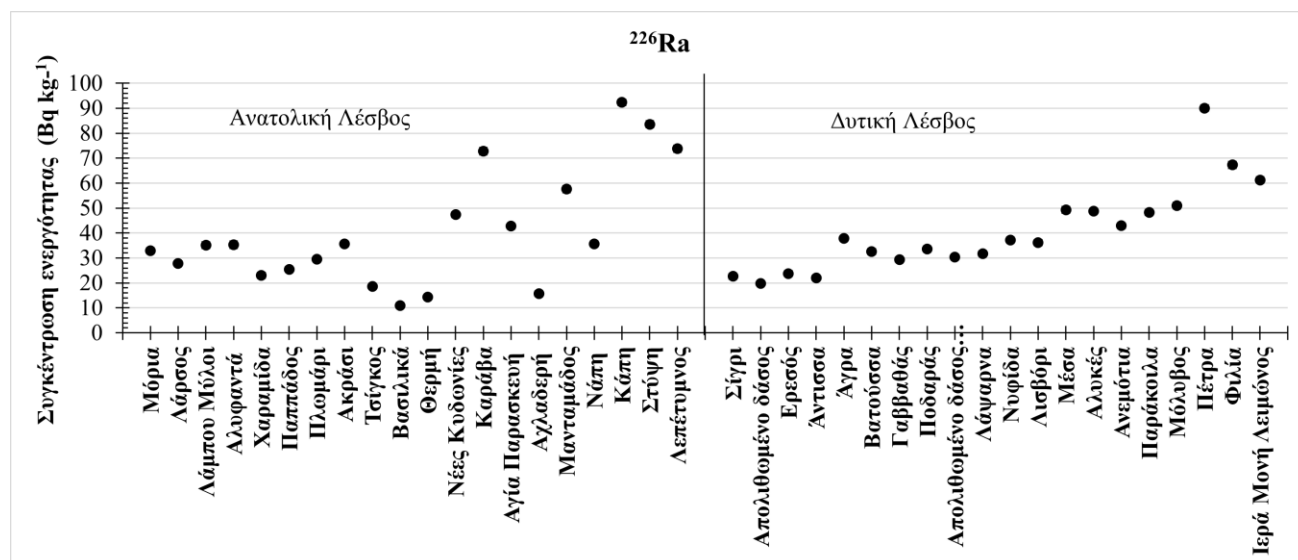
A/A	Περιοχή Δειγματοληψίας	Μετρούμενος ρυθμός απορροφώμενης δόσης (nGy h ⁻¹)	Εκτιμώμενος ρυθμός απορροφώμενης δόσης (nGy h ⁻¹)
1	Πλωμάρι (α)	29	33
2	Πλωμάρι (β)	37	31
3	Άγιος Ερμογένη	39	37
4	Άγιος Ισίδωρος	30	25
5	Χρούσος (α)	83	51
6	Χρούσος (β)	96	76
7	Ερεσσός (α)	60	87
8	Ερεσσός (β)	51	78
9	Ερεσσός (γ)	96	88
10	Τάρτι	58	53

Α.3 Διαγράμματα συγκεντρώσεων ενεργότητας ραδιοϊσοτόπων Ανατολικής – Δυτικής Λέσβου

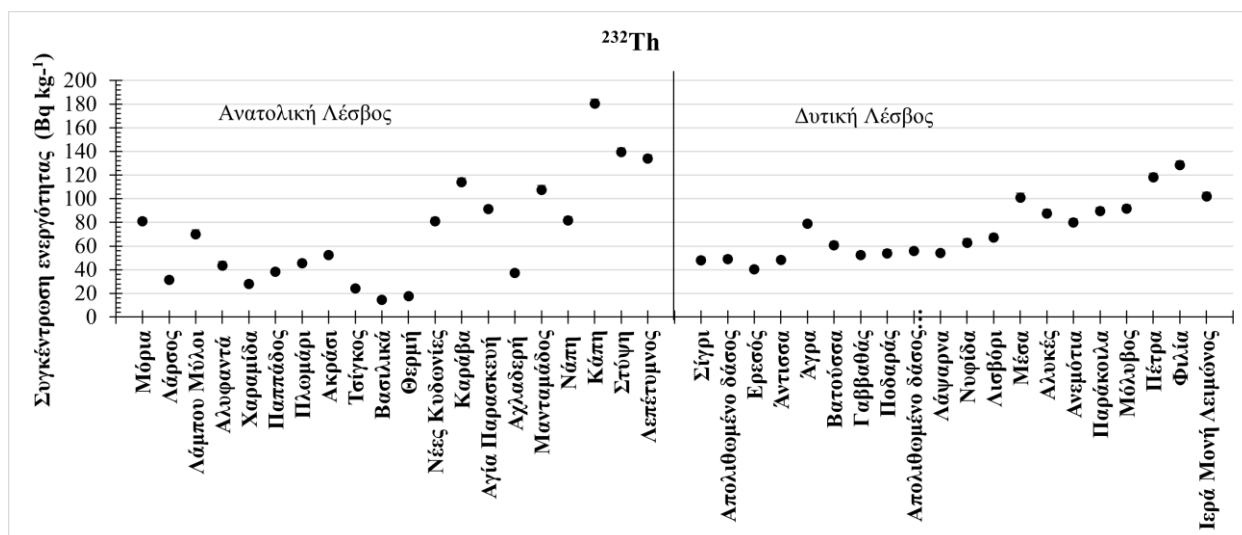
Παρακάτω παρατίθενται πέντε διαγράμματα, τα οποία παρουσιάζουν συγκεντρωτικά τις τιμές των συγκεντρώσεων ενεργότητας των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων ^{234}Th , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K αλλά και του τεχνητού ραδιενεργού ισοτόπου ^{137}Cs που υπολογίστηκαν για τη παρούσα εργασία (Ανατολική Λέσβος) και παλαιότερης εργασίας (Δυτική Λέσβος).



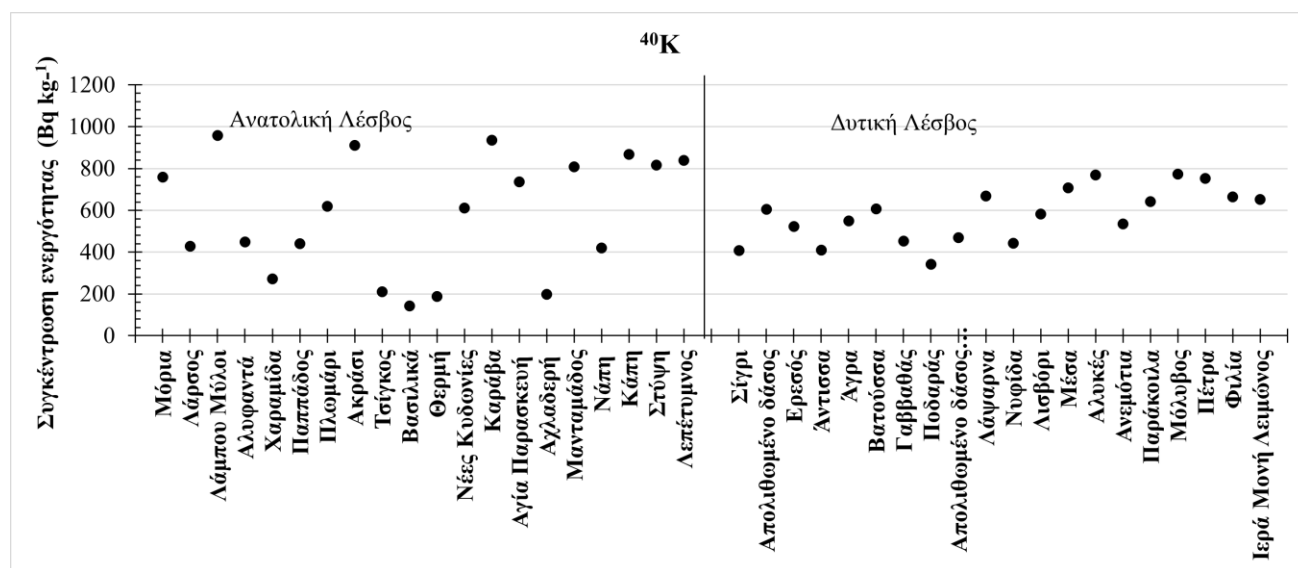
Διάγραμμα 13: Σύγκριση ενεργότητας ^{234}Th μεταξύ Ανατολικής και Δυτικής Λέσβου



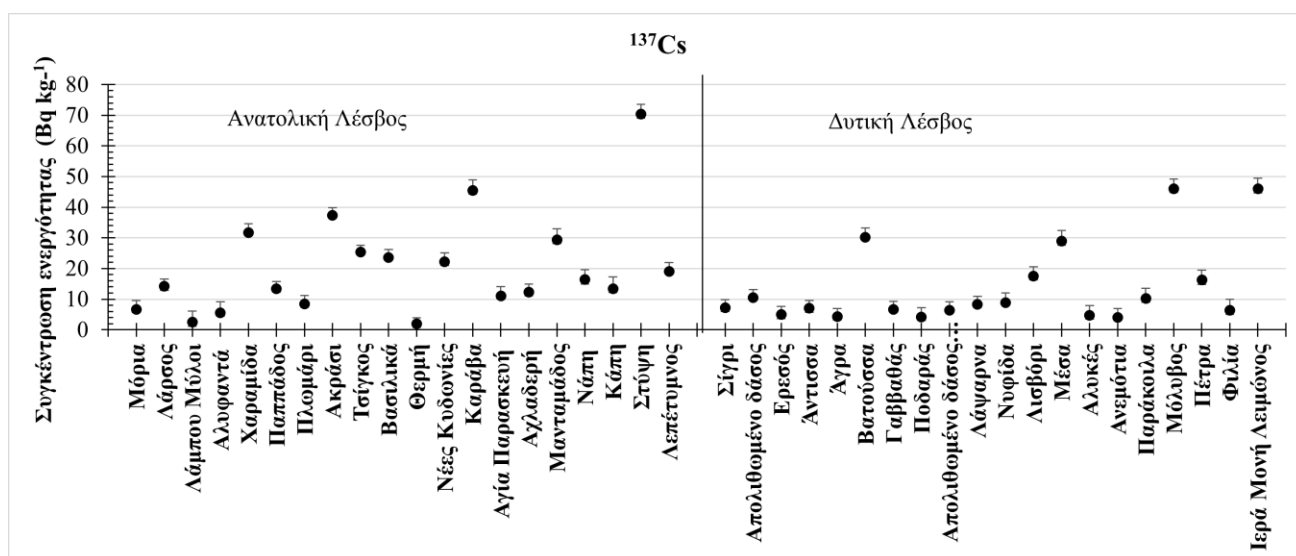
Διάγραμμα 14: Σύγκριση ενεργότητας ^{226}Ra μεταξύ Ανατολικής και Δυτικής Λέσβου



Διάγραμμα 15: Σύγκριση ενεργότητας ^{232}Th μεταξύ Ανατολικής και Δυτικής Λέσβου



Διάγραμμα 16: Σύγκριση ενεργότητας ^{40}K μεταξύ Ανατολικής και Δυτικής Λέσβου



Διάγραμμα 17: Σύγκριση ενεργότητας ¹³⁷Cs μεταξύ Ανατολικής και Δυτικής Λέσβου