



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ  
ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**



**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΔΥΤΙΚΗ ΛΕΣΒΟ ΜΕ  $\gamma$ -  
ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ**

***ΚΡΕΜΕΝΙΩΤΗ ΟΛΓΑ***

Επιβλέπων καθηγητής: Χ. Ματσούκας

ΜΥΤΙΑΗΝΗ, 2020

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ακτινοβολιών του Τμήματος Περιβάλλοντος, του Πανεπιστημίου Αιγαίου, κατά το χρονικό διάστημα Φεβρουάριος – Σεπτέμβριος 2020, υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή Τομέα Περιβαλλοντικής Μηχανικής Επιστήμης, Χρήστο Ματσούκα, τον οποίο και ευχαριστώ θερμά για την καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου προσέφερε.

Οι ευχαριστίες μου επεκτείνονται στον κ. Γιώργο Κουμπούρα και Γιώργο Πουλή, επιστημονικούς συνεργάτες του πανεπιστημίου για την καθοδήγηση και βοήθειά τους στη μέτρηση και ανάλυση των δειγμάτων, για τις γνώσεις που μου προσέφεραν και την άριστη επικοινωνία ως προς τη χρήση του εργαστηρίου.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά το φίλο και συμφοιτητή από το τμήμα Ωκεανογραφίας και Θαλάσσιων Βιοεπιστημών Τσαλαπάτη Α., για την ανεκτίμητη βοήθεια του στη συλλογή των δειγμάτων.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	5
ABSTRACT .....	6
1. Εισαγωγή .....	7
1.1. Γενικά .....	7
1.2 Ιστορική αναδρομή .....	7
1.3 Τύποι ακτινοβολίας.....	8
1.3.1 Σωματίδια α.....	9
1.3.2 Σωματίδια β.....	9
1.3.4 Σωματίδια (ακτινοβολία) γ.....	11
1.3.5 Άλλοι τύποι.....	11
1.4 Ενεργότητα.....	11
1.5 Νόμος ραδιενεργών διασπάσεων.....	12
1.6 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας – ύλης.....	14
1.6.1 Η ελαστική σκέδαση.....	14
1.6.2 Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο .....	15
1.6.3 Η σκέδαση Compton .....	15
1.6.4 Η δίδυμη γένεση .....	16
1.7 Δόσεις ακτινοβολιών.....	18
2. Ραδιενέργεια περιβάλλοντος.....	21
2.1 Γενικά .....	21
2.2 Πηγές ραδιενέργειας.....	21
2.2.1 Φυσικές πηγές.....	21
2.2.2 Τεχνητές πηγές ή ανθρωπογενείς.....	22
2.3 Φυσικές ραδιενεργές σειρές.....	24
2.4 Ανίχνευση και μέτρηση ραδιενέργειας.....	27
2.4.1 Ανιχνευτές ακτινοβολίας με αέριο.....	28
2.4.2 Ανιχνευτές σπινθηρισμού .....	30
2.4.3 Ημιαγωγικοί ανιχνευτές.....	31
2.5 Ραδιενέργεια στο έδαφος.....	34
2.5.1 Στοιχεία εδάφους.....	34
2.5.2 Συμπεριφορά μακρόβιων ραδιονουκλιδίων στο έδαφος .....	34
2.5.3 Συγκεντρώσεις Φυσικής και Τεχνητής Ραδιενέργειας στο χερσαίο περιβάλλον .....	35
2.6 Σκοπός εργασίας .....	37
3. Μεθοδολογία .....	38

3.1 Γεωλογικό υπόβαθρο Λέσβου .....	38
3.2 Συλλογή δεδομένων .....	40
3.3 Επεξεργασία δειγμάτων .....	42
3.4 Ανάλυση δειγμάτων .....	44
4. Αποτελέσματα .....	47
4.1 Μετρούμενη δόση με τον φορητό ανιχνευτή τύπου NaI .....	47
4.2 Αναλύσεις εδαφικών δειγμάτων και υπολογισμός δόσης .....	48
4.3 Σύγκριση μεταξύ μετρούμενης και εκτιμώμενης δόσης .....	51
4.4 Συσχέτιση μεταξύ μετρούμενης και εκτιμώμενης δόσης .....	52
5. Συζήτηση – Συμπεράσματα .....	55
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	57

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του, ο άνθρωπος είναι εκτεθειμένος στη ραδιενέργεια. Δέχεται συνεχώς ακτινοβολία τόσο από φυσικές πηγές, όσο και από πηγές που δημιουργήσε ο ίδιος. Ο προσδιορισμός των φυσικών ραδιονουκλιδίων είναι χρήσιμος καθώς τα φυσικά και τεχνητά ραδιονουκλίδια συμβάλλουν σημαντικά στην συνολική δόση που ο ίδιος λαμβάνει. Επιπλέον, ανάλογα με τα επίπεδα ραδιενέργειας σε κάθε περιοχή είναι εφικτός ο σχεδιασμός για την επιβάρυνση ή όχι της περιοχής με επιπλέον τεχνητές πηγές ραδιενέργειας. Η μελέτη της φυσικής ραδιενέργειας κρίνεται απαραίτητη για την ποσοτικοποίηση του ραδιενεργού υποβάθρου μιας περιοχής, η οποία παρουσιάζει ευρεία χρήση σε περιβαλλοντικούς, επιδημιολογικούς και τεχνολογικούς τομείς. Η παρούσα πτυχιακή εργασία μελετά το ραδιενεργό υπόβαθρο της Δυτικής Λέσβου. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από μετρήσεις της δόσης γάμμα ακτινοβολίας με φορητό ανιχνευτή NaI και αναλύσεις δειγμάτων χώματος με γάμμα φασματοσκοπία, που πραγματοποιήθηκαν σε 20 συνολικά θέσεις. Παραθέτει επίσης τις συγκεντρώσεις των φυσικών ραδιονουκλιδίων  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  και του  $^{137}\text{Cs}$  καθώς και τις εκτιμήσεις της γάμμα δόσης ακτινοβολίας που υπολογίστηκαν από τον ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου Ge. Τέλος, παρουσιάζει τα αποτελέσματα από τη σύγκριση μεταξύ της απευθείας μετρούμενης δόσης και της υπολογισθείσας. Εν κατακλείδι, οι τιμές των συγκεντρώσεων φυσικών ισοτόπων και της μετρούμενης και εκτιμώμενης γάμμα δόσης ακτινοβολίας είναι αυξημένες σε σχέση με τον μέσο όρο στην Ελλάδα όπως αναφέρεται στο UNSCEAR (2000) αλλά πάλι είναι εντός των φυσιολογικών ορίων.

## ABSTRACT

Throughout our life, people are exposed to radioactivity. We constantly receive radiation from both natural and artificial sources. Determination of natural radionuclides is useful as both natural and artificial radionuclides contribute significantly to outdoor total gamma effective dose rates. In addition, depending on the levels of radioactivity in each area, it is possible to plan for the burden or not of the area with additional artificial sources of radioactivity. The study of natural radioactivity is considered necessary for the quantification of the radioactive background of an area and is widely used in environmental, epidemiological and technological fields. The present dissertation studies the radioactive background due to gamma radiation in the western part of Lesvos Island. The study reports the results from 20 outdoor total gamma effective dose rate measurements conducted using a NaI portable detector and the measurements of outdoor gamma dose rates due to the  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  radionuclides as estimated via HPGe gamma-ray spectrometry. The study also reports radioactivity concentrations of physical radionuclides as well as a comparison and correlation study between measured and estimated dose rates. In conclusion, the radioactivity concentrations and the measured and estimated gamma dose rates seem to be higher than the average in Greece as reported in UNSCEAR (2000) but they are still within normal limits.

# 1. Εισαγωγή

## 1.1. Γενικά

Ως ραδιενέργεια καλείται η ιδιότητα που κατέχουν ορισμένα στοιχεία να παρουσιάζουν διάσπαση των πυρήνων τους, είτε αυτόματα είτε έπειτα από βομβαρδισμό με σωματίδια που έχουν υποστεί επιτάχυνση, προκαλώντας εκπομπή σωματιδίων ή/και ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Επομένως, όταν διενεργείται αυτόματη διάσπαση πρόκειται για φυσική ραδιενέργεια ενώ όταν η διάσπαση προκαλείται από βομβαρδισμό από τεχνητά παρασκευασμένα ισότοπα αναφέρεται ως τεχνητή.

Ο όρος χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά από την Marie Curie το 1898 για να περιγράψει την ραδιενεργό συμπεριφορά που είχε παρατηρήσει στο θόριο και στο ουράνιο. Το πρώτο συνθετικό της λέξης (radio-) προήλθε από το λατινικό radium, που σημαίνει ακτίνα ενώ το δεύτερο (activité-) αποδόθηκε στα ελληνικά ως ενέργεια. Τα ραδιενεργά νουκλίδια ονομάζονται και ραδιονουκλίδια (Βεργανελάκης et al., 1989).

## 1.2 Ιστορική αναδρομή

Η βιβλιογραφία που αναφέρεται στη ραδιενέργεια είναι ιδιαίτερα μεγάλης κλίμακας, ωστόσο για την παρούσα εργασία θα παρουσιαστούν εκείνα τα σημεία που θεωρήθηκαν πιο σημαντικά. Η ανασκόπηση προέρχεται σε μεγάλο βαθμό από τους Eisenbud & Gesell (1997) καθώς και από τον Αντωνόπουλος-Ντόμης (2004). Η ανακάλυψη των ακτίνων X από τον Wilhelm Röntgen στάθηκε το έναυσμα για μια διερεύνηση που κορυφώθηκε με την ανακάλυψη των ακτίνων Becquerel και της ραδιενέργειας, το 1896. Κατά τη διάρκεια των ερευνών του, ο Becquerel τοποθέτησε διάφορες φωσφορίζουσες ουσίες, μία κάθε φορά πάνω σε μία φωτογραφική πλάκα τυλιγμένη σε μαύρο χαρτί και τα τοποθέτησε στο ηλιακό φως περιμένοντας να παραχθούν ακτίνες, να διαπεράσουν το μαύρο χαρτί και να αφήσουν ένα αποτύπωμα στη φωτογραφική πλάκα (ακτίνες X). Από όλες τις ουσίες που δοκίμασε υπήρχε μία που περιείχε το μέταλλο ουράνιο στην οποία διαπίστωσε πως ό,τι συνέβαινε παρουσία ηλιακού φωτός, συνέβαινε και απουσία αυτού. Το γεγονός αυτό τον οδήγησε να καταλήξει στο συμπέρασμα πως το υλικό εξέπεμπε αυθόρμητα κάποια μορφής ακτινοβολία, που ονομάστηκε ακτίνες Becquerel και σήμερα είναι γνωστή ως ραδιενέργεια.

Παρέμενε ωστόσο η αμφιβολία για το αν η ραδιενέργεια οφειλόταν σε κάποιο ξένο σώμα στο ουράνιο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις έρευνες του Becquerel και για αυτή τη συγκεκριμένη αμφιβολία έδειξε η πολωνικής καταγωγής φυσικός και χημικός Marie Curie. Η Marie Curie μαζί με τον σύζυγό της και καθηγητή φυσικής και βιομηχανικής χημείας στο Παρίσι, Pierre Curie αποφάσισαν να διερευνήσουν την ικανότητα ακτινοβολίας του πισσουρανίου, της ουσίας από την οποία εξάγεται το ουράνιο. Ανακάλυψαν, λοιπόν, ότι κάποια από τα δείγματα του πισσουρανίου εμφάνιζαν τετραπλάσια ραδιενέργεια από το ίδιο το ουράνιο και ότι ήταν εφικτή η εξαγωγή ουσιών των οποίων η ραδιενέργεια είναι 100.000 περίπου φορές υψηλότερη. Με τον τρόπο αυτό, το 1898 ανακοίνωσαν την ανακάλυψη νέων στοιχείων, πέραν του ουρανίου, με καταπληκτική ισχύ ακτινοβολίας, του πολωνίου που ονομάστηκε έτσι προς τιμήν της Marie και του ραδίου από το οποίο πήρε και το όνομά του η ραδιενέργεια.

Την ίδια περίοδο, ο Ernest Rutherford ανακάλυψε την ύπαρξη τουλάχιστον δύο συστατικών στη δομή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ενώ το 1899 κατάφερε να προσδιορίσει συγκεκριμένα τα σωματίδια  $\alpha$  και  $\beta$ . Έναν χρόνο αργότερα, ανακαλύφθηκε από τον Paul Villard η ακτινοβολία  $\gamma$  που εκπέμπεται από το ράδιο.

Το 1903, ο Rutherford και ο Frederick Soddy ανακάλυψαν ότι η ραδιενέργεια ήταν μια άμεση εκδήλωση αστάθειας των ατόμων και οφείλει την ύπαρξή της στη μεταστοιχείωση αυτών, ενώ το 1919 ο Rutherford πραγματοποίησε την πρώτη τεχνητή μεταστοιχείωση, όταν βομβαρδίζοντας σταθερό άζωτο  $^{14}\text{N}$  με σωματίδια  $\alpha$  παρήγαγε σταθερό  $^{17}\text{O}$  και  $^1\text{H}$ .

Πολλές ακόμη ανακαλύψεις έλαβαν χώρα τη δεκαετία του 1930, όπως η ανακάλυψη του νετρονίου το 1932 από τον James Chadwick, η ανακάλυψη του ποζιτρονίου από τον Carl David Anderson την ίδια χρονιά και την επόμενη χρονιά η ανακάλυψη του δευτερίου από τον Harold C. Urey. Παράλληλα, σε διάφορα εργαστήρια κατασκευάστηκαν οι πρώτοι επιταχυντές φορτισμένων σωματιδίων.

Στη συνέχεια το όνομα Curie ήρθε και πάλι στο προσκήνιο καθώς η Irene Curie, κόρη της Marie Curie και ο σύζυγός της Frederic Joliot έγιναν οι πρώτοι που δημιούργησαν τεχνητή ραδιενέργεια όταν παρήγαγαν ραδιενεργό άζωτο ( $^{13}\text{N}$ ) και θείο ( $^{30}\text{S}$ ), βομβαρδίζοντας βόριο (B) και αργίλιο (Al) αντίστοιχα, με σωματίδια  $\alpha$  και πολώνιο.

Έπειτα από την τελευταία ανακάλυψη, αυτή της τεχνητής ραδιενέργειας, όλοι οι προαναφερθέντες αλλά και ακόμη πολλοί επιστήμονες συνέβαλαν στην παραγωγή και αναγνώριση εκατοντάδων νέων ραδιονουκλιδίων χρησιμοποιώντας επιταχυντές φτάνοντας σήμερα να είναι γνωστά περίπου 2.600 νουκλίδια (United States Environmental Protection Agency, 2020).

### 1.3 Τύποι ακτινοβολίας

Οι πυρήνες των ατόμων αποτελούνται από θετικά φορτισμένα σωματίδια, τα πρωτόνια και από ουδέτερα φορτισμένα σωματίδια, τα νετρόνια. Όπως ήδη προαναφέρθηκε, υπάρχουν ασταθή άτομα των οποίων οι πυρήνες υφίστανται αυθόρμητη διάσπαση, χωρίς κάποια εξωτερική διέγερση. Οι ασταθείς αυτοί πυρήνες έχουν την τάση να μετατρέπονται αυθόρμητα σε κάποιο άλλο είδος πυρήνα, διαφορετικό και πιο σταθερό από το αρχικό εκπέμποντας παράλληλα σωματίδια και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που ονομάζονται ραδιενεργός ακτινοβολία.

Η ιδιότητα αυτή καλείται ραδιενεργός διάσπαση και από έναν μητρικό πυρήνα προκύπτει ένας άλλος που ονομάζεται θυγατρικός. Τα σωματίδια που προκύπτουν από τη διάσπαση των φυσικών ραδιενεργών πυρήνων πήραν την ονομασία τους από την ελληνική αλφάβητο και διαχωρίζονται σε σωματίδια άλφα, βήτα και γάμμα. Επιπλέον εκπέμπονται και ποζιτρόνια, τα οποία συμπεριλαμβάνονται στην ακτινοβολία βήτα, νετρίνα και αντινετρίνα (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

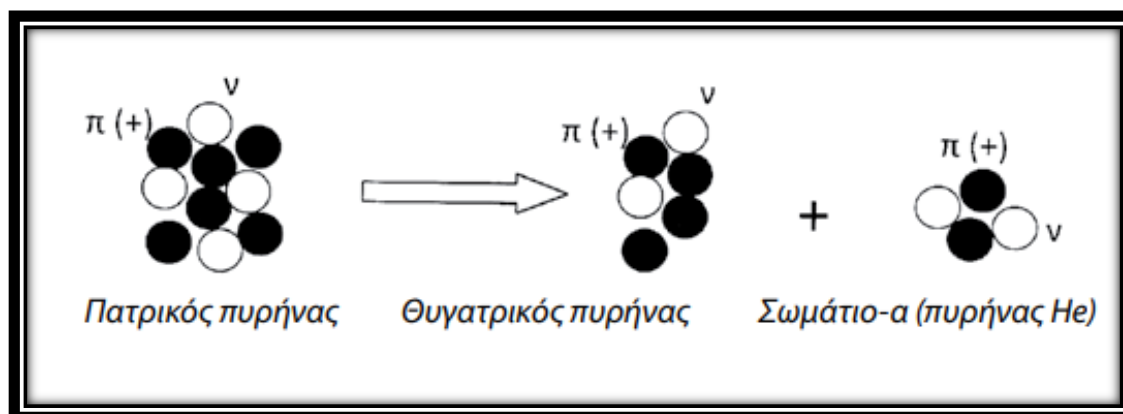
Ο τρόπος με τον οποίο η ενέργεια εναποτίθεται στην ύλη αποτελεί μέτρο της βλαπτικότητας μιας ακτινοβολίας και περιγράφεται από το φυσικό μέγεθος που καλείται συντελεστής γραμμικής μετάδοσης της ενέργειας LET (Linear Energy Transfer). Όσο πιο μεγάλο LET έχει μια ακτινοβολία τόσο πιο βλαπτική είναι (Βεργανελάκης et al., 1989).



### 1.3.1 Σωματίδια α

Ο πρώτος τρόπος διάσπασης αναφέρεται στην αποκόλληση ενός κομματιού μικρής μάζας από τον μεγάλο ασταθή πυρήνα. Το κομμάτι αποτελείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια και ουσιαστικά αποτελεί τον πυρήνα του ηλίου,  ${}^4_2\text{He}$  (Σχήμα 1). Το σωματίδιο φέρει το ηλεκτρικό φορτίο των δύο πρωτονίων του και άρα είναι θετικά φορτισμένο. Το σωματίδιο εκπέμπεται με τεράστια ταχύτητα της τάξης των 20.000 χιλιομέτρων το δευτερόλεπτο που αντιστοιχεί σε κινητική ενέργεια μερικών μεγα-ηλεκτρονιοβόλτ (MeV).

Πολλά κινούμενα σωματίδια α μαζί αποτελούν την ακτινοβολία α. Το πιο γνωστό παράδειγμα διάσπασης α αποτελεί η διάσπαση του ραδίου ( ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ ) σε ραδόνιο ( ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ ) με εκπομπή ακτινοβολίας α (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004). Η ακτινοβολία α χαρακτηρίζεται από υψηλό LET και είναι δυνατόν να αποκοπεί πλήρως από ένα και μόνο λεπτό φύλλο χαρτιού (Βεργανελάκης et al., 1989).



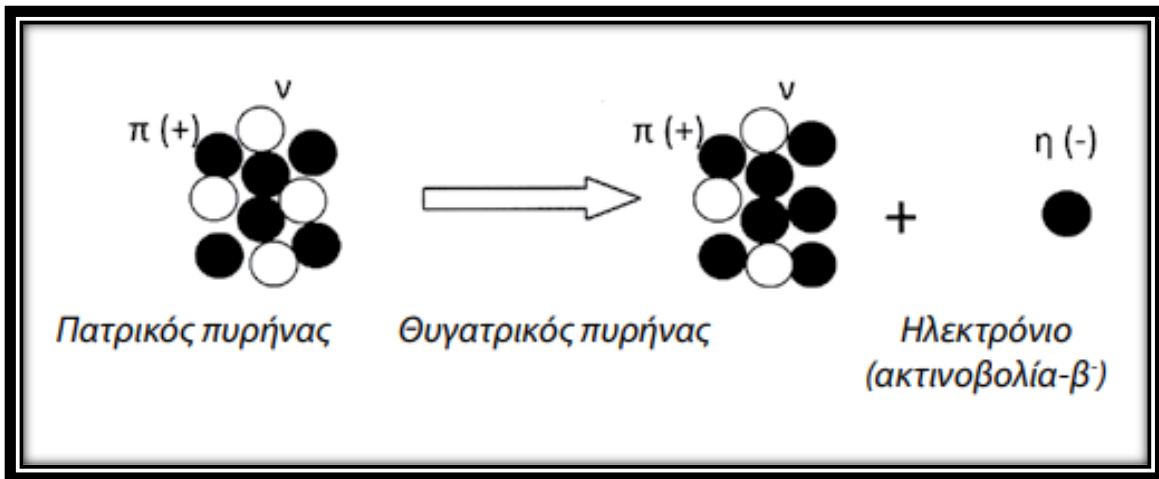
Σχήμα 1: Διάσπαση α. Ο μητρικός πυρήνας διασπάται σε έναν θυγατρικό και ένα σωματίο α (πυρήνας He) (Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, 2011)

### 1.3.2 Σωματίδια β

#### ➤ Σωματίδια β<sup>-</sup>

Η ακτινοβολία β<sup>-</sup> οφείλεται στη διάσπαση ενός νετρονίου του πυρήνα σε ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο. Έτσι, ο ασταθής πυρήνας αυξάνει τον αριθμό των πρωτονίων του κατά ένα ενώ μειώνει τον αριθμό των νετρονίων του κατά ένα. Το ηλεκτρόνιο, αποτελεί το σωματίδιο β<sup>-</sup> και εκπέμπεται από τον πυρήνα με πολύ μεγάλη ταχύτητα της τάξεως των 250.000 χιλιομέτρων το δευτερόλεπτο (Σχήμα 2).

Τέτοιου τύπου διασπάσεις λαμβάνουν χώρα σε πυρήνες που έχουν περισσότερα νετρόνια ως προς την ευστάθεια. Παράλληλα με το σωματίδιο β<sup>-</sup>, εκπέμπεται και ένα σωματίδιο μηδενικού ηλεκτρικού φορτίου και εξαιρετικά μικρής μάζας που ονομάζεται αντινεutrino (Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, 2011).

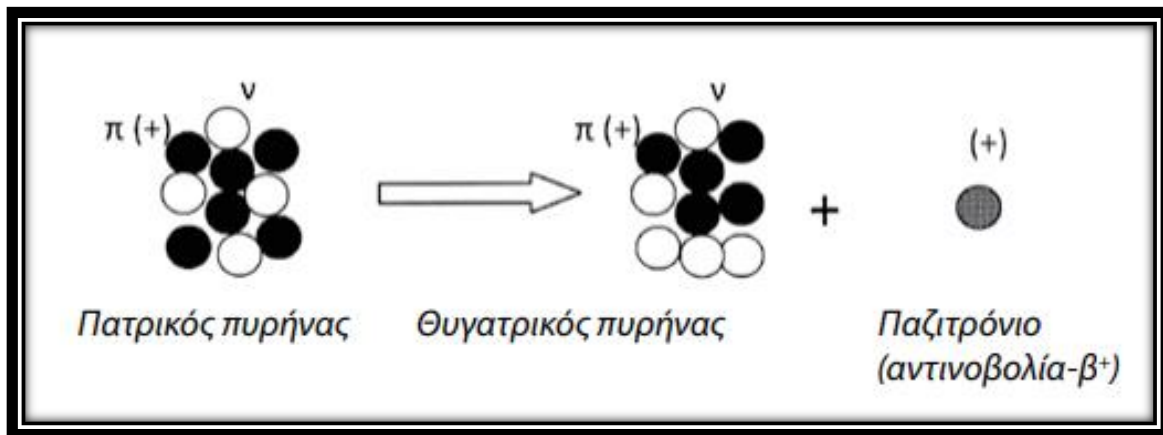


**Σχήμα 2:** Διάσπαση  $\beta^-$ . Ο μητρικός πυρήνας διασπάται σε έναν θυγατρικό (ο οποίος έχει ένα πρωτόνιο περισσότερο και ένα νετρόνιο λιγότερο) και ένα σωματίδιο  $\beta^-$  (ηλεκτρόνιο) (Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, 2011).

➤ **Σωματίδια  $\beta^+$  (ποζιτρόνιο)**

Η διάσπαση  $\beta^+$  αποτελεί ακριβώς το αντίθετο από τη διάσπαση  $\beta^-$ . Δηλαδή, ο μητρικός πυρήνας διασπάται σε έναν θυγατρικό που έχει ένα πρωτόνιο λιγότερο και ένα νετρόνιο περισσότερο (Σχήμα 3). Το σωματίδιο  $\beta^+$  ή ποζιτρόνιο έχει ίση μάζα με το ηλεκτρόνιο αλλά ίσο και αντίθετο φορτίο με αυτό. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα θετικά φορτισμένο ηλεκτρόνιο που προέκυψε από την μετατροπή ενός πρωτονίου σε ένα νετρόνιο και ένα ποζιτρόνιο.

Διασπάσεις σαν αυτή λαμβάνουν χώρα σε πυρήνες που έχουν περίσσεια πρωτονίων ως προς την ευστάθεια. Παράλληλα, λαμβάνει χώρα και η εκπομπή ενός νετρίνου με σχεδόν μηδενική μάζα και ουδέτερο φορτίο. Τα νετρίνα είναι πολύ δύσκολο να ανιχνευτούν διότι σπάνια αλληλεπιδρούν με την ύλη (Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, 2011).



**Σχήμα 3:** Διάσπαση  $\beta^+$ . Ο μητρικός πυρήνας διασπάται σε έναν θυγατρικό (ο οποίος έχει ένα πρωτόνιο λιγότερο και ένα νετρόνιο περισσότερο) και ένα σωματίδιο  $\beta^+$  (ποζιτρόνιο) (Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, 2011).

Η  $\beta$  ακτινοβολία ( $\beta^-$  και  $\beta^+$ ) διανύει σημαντικά μεγαλύτερη διαδρομή από ότι η ακτινοβολία  $\alpha$  και συνεπώς παρουσιάζει χαμηλότερο LET.

### 1.3.4 Σωματίδια (ακτινοβολία) $\gamma$

Κατά τις διασπάσεις  $\alpha$  και  $\beta$ , που αναφέρθηκαν πιο πάνω, είναι πιθανό ο θυγατρικός πυρήνας να βρίσκεται σε διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή να έχει περισσότερη ενέργεια από όση χρειάζεται. Η πλεονάζουσα αυτή ενέργεια αποβάλλεται με τη μορφή φωτονίων υψηλής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, όταν ένας πυρήνας μεταβαίνει από κάποια διεγερμένη ενεργειακή στάθμη σε κάποια άλλη χαμηλότερη, εκπέμπεται ένα φωτόνιο που έχει ενέργεια ίση με τη διαφορά ενέργειας των δύο επιπέδων. Η εκπομπή αυτή φωτονίου ονομάζεται ακτινοβολία  $\gamma$ . Η μόνη διαφορά του θυγατρικού από τον μητρικό πυρήνα είναι ότι βρίσκεται σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη από τον μητρικό χωρίς καμία διαφορά στον αριθμό των πρωτονίων ή των νετρονίων (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004). Χαρακτηρίζεται από μικρό LET και αποκόπτεται δύσκολα (Βεργανελάκης et al., 1989).

### 1.3.5 Άλλοι τύποι

Οι διασπάσεις  $\alpha$ ,  $\beta$  και  $\gamma$  αποτελούν τους πιο συνήθεις και πρακτικά τους μοναδικούς τρόπους διάσπασης φυσικών ραδιενεργών πυρήνων, ωστόσο υπάρχουν μερικές ακόμη περιπτώσεις.

Εξαιρετικά σπάνια περίπτωση που αφορά μόνο τεχνητά ραδιενεργά ισότοπα αποτελεί η διάσπαση με εκπομπή νετρονίων. Η διάσπαση αυτή λαμβάνει χώρα σε πυρήνες που έχουν περίσσεια νετρονίων και από τον μητρικό πυρήνα προκύπτει ένας θυγατρικός και ένα νετρόνιο.

Επίσης σπάνιο τρόπο διάσπασης βαρέων πυρήνων αποτελεί η αυθόρμητη σχάση, δηλαδή η αυθόρμητη διάσπαση ενός πυρήνα σε δύο άλλους επίσης ραδιενεργούς πυρήνες. Η σχάση συνοδεύεται από εκπομπή νετρονίων και ακτινοβολίας  $\beta$  και  $\gamma$  (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004) (Eisenbud & Gesell, 1997).

## 1.4 Ενεργότητα

Έχουν ήδη παρουσιαστεί οι τρόποι με τους οποίους πραγματοποιούνται οι διασπάσεις και εκπέμπεται ακτινοβολία. Ωστόσο, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει το μέγεθος που απεικονίζει την ποσότητα της ραδιενέργειας που υπάρχει μέσα σε ένα υλικό και αυτό είναι η ενεργότητα. Ενεργότητα μιας ποσότητας ύλης ορίζεται ως ο αριθμός των ραδιενεργών διασπάσεων των πυρήνων ανά μονάδα χρόνου.

$$A = \frac{dN}{dt}$$

Σύμφωνα με το Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) επίσημη μονάδα μέτρησης αποτελεί το Bq (becquerel), προς τιμήν του Henri Becquerel που περιέγραψε πρώτος τέτοιου είδους ακτινοβολία. Για δεδομένη χρονική στιγμή, μια ποσότητα ύλης έχει ενεργότητα ενός Bq αν κατά μέσο όρο λαμβάνει χώρα ακριβώς μια διάσπαση σε κάθε δευτερόλεπτο. Πρακτικά,

δηλαδή 1 Bq ισούται με μια διάσπαση το δευτερόλεπτο. Το Bq είναι εξαιρετικά μικρή μονάδα ενεργότητας για μετρήσεις των υλικών της φύσης και έτσι χρησιμοποιούνται πολλαπλάσια της μονάδας αυτής.

$$1 \text{ becquerel (Bq) [S.I.]} = 1 \text{ διάσπαση / s}$$

Μια άλλη μονάδα που χρησιμοποιούταν παλαιότερα και σε κάποιον βαθμό χρησιμοποιείται και σήμερα, είναι το Ci (curie). Το 1 Ci ισούται με  $3,7 \times 10^{10}$  διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο και άρα με 370 δισεκατομμύρια Bq. Πρόκειται, ουσιαστικά για εξαιρετικά μεγάλη μονάδα γι' αυτό κυρίως χρησιμοποιούνται υποπολλαπλάσιά του. Στην Πυρηνική Ιατρική, για παράδειγμα, εκεί που οι ραδιενεργοί πυρήνες παίζουν σημαντικό ρόλο, η ενεργότητα μετριέται σε MBq ή σε mCi με σχέση  $1 \text{ mCi} = 37 \text{ MBq}$  (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004) (Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, 2011).

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

## 1.5 Νόμος ραδιενεργών διασπάσεων

Το φαινόμενο της ραδιενεργού διάσπασης αντιστοιχεί σε στατιστική διαδικασία και δεν είναι δυνατή η πρόβλεψη του ακριβούς χρόνου διάσπασης ενός συγκεκριμένου ασταθούς πυρήνα. Αυτό που είναι εφικτό είναι ο προσδιορισμός της πιθανότητας διάσπασης κάθε είδους ραδιενεργών πυρήνων. Ένας ραδιενεργός πυρήνας δεν διασπάται αμέσως μόλις σχηματιστεί, ωστόσο συνήθως υπάρχει η πιθανότητα να διασπαστεί μέσα σε ένα χρονικό διάστημα και η πιθανότητα αυτή παραμένει σταθερή στο χρόνο.

Πειραματικά, διαπιστώνεται ότι ο αριθμός των διασπάσεων ανά μονάδα χρόνου (ενεργότητα) που λαμβάνουν χώρα σε μια ποσότητα ύλης είναι ανάλογος προς τον αριθμό N των ραδιενεργών πυρήνων συγκεκριμένου ραδιενεργού ισοτόπου που υπάρχουν στην ποσότητα αυτή.

$$A = \lambda * N$$

Το  $\lambda$  καλείται σταθερά διάσπασης και η τιμή του είναι μοναδική και χαρακτηριστική για κάθε ισότοπο. Η ενεργότητα και η σταθερά διάσπασης είναι μεγέθη ανάλογα και έτσι για δεδομένο αριθμό πυρήνων N, όσο πιο μεγάλη η σταθερά  $\lambda$  τόσο πιο μεγάλη θα είναι και η ενεργότητα.

Με κάθε ραδιενεργό διάσπαση όμως, ο μητρικός πυρήνας που διασπάστηκε παύει πλέον να υπάρχει και τη θέση του παίρνει ο θυγατρικός πυρήνας ο οποίος παρουσιάζει διαφορετικές χημικές και πυρηνικές ιδιότητες. Άρα με κάθε διάσπαση μειώνεται κατά ένα το πλήθος των μητρικών πυρήνων και αφού είναι ανάλογος με την ενεργότητα συμπεραίνουμε ότι και η ενεργότητα μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Υποθετικά λοιπόν, αν για δεδομένη χρονική στιγμή έχουμε  $N_0$  ραδιενεργούς πυρήνες, σύμφωνα με το νόμο των ραδιενεργών διασπάσεων μπορούμε να βρούμε πόσους πυρήνες N θα έχουμε μετά από κάποιο χρονικό διάστημα t.

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Όπου  $\lambda$  είναι η σταθερά διάσπασης που αναφέρθηκε και πιο πάνω και το  $e$  είναι η βάση των φυσικών λογαρίθμων.

Με τη συνεχή εκθετική μείωση που υφίστανται οι πυρήνες είναι λογικό πως κάποια στιγμή, το πλήθος των ραδιενεργών πυρήνων που θα έχουν μείνει αδιάσπαστοι θα ισούται με το μισό του αρχικού πλήθους  $N$ . Ο χρόνος που χρειάστηκε για να συμβεί αυτό ονομάζεται χρόνος ημιζωής ή χρόνος υποδιπλασιασμού και υπολογίζεται από τη σχέση που φαίνεται παρακάτω. Οι χρόνοι ημιζωής αποτελούν χαρακτηριστικά μεγέθη για κάθε ραδιενεργό πυρήνα και το εύρος τους μπορεί να είναι από λίγα δευτερόλεπτα μέχρι δισεκατομμύρια χρόνια (Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, 2011).

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Στον Πίνακα 1 δίνονται οι χρόνοι ημιζωής μερικών ραδιενεργών πυρήνων.

**Πίνακας 1:** Ενδεικτικοί χρόνοι ημιζωής γνωστών ραδιενεργών πυρήνων (Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, 2011).

ΣΤΟΙΧΕΙΟ	ΧΡΟΝΟΣ ΗΜΙΖΩΗΣ
$^{99m}\text{Tc}$ (τεχνήτιο)	6 ώρες
$^{131}\text{I}$ (ιώδιο)	8 ημέρες
$^{210}\text{Po}$ (πολώνιο)	138 ημέρες
$^{60}\text{Co}$ (κοβάλτιο)	5,2 χρόνια
$^{90}\text{Sr}$ (στρόντιο)	29,1 χρόνια
$^{137}\text{Cs}$ (καίσιο)	30 χρόνια
$^{226}\text{Ra}$ (ράδιο)	1600 χρόνια
$^{14}\text{C}$ (άνθρακας)	5730 χρόνια
$^{235}\text{U}$ (ουράνιο)	704 εκατομμύρια χρόνια

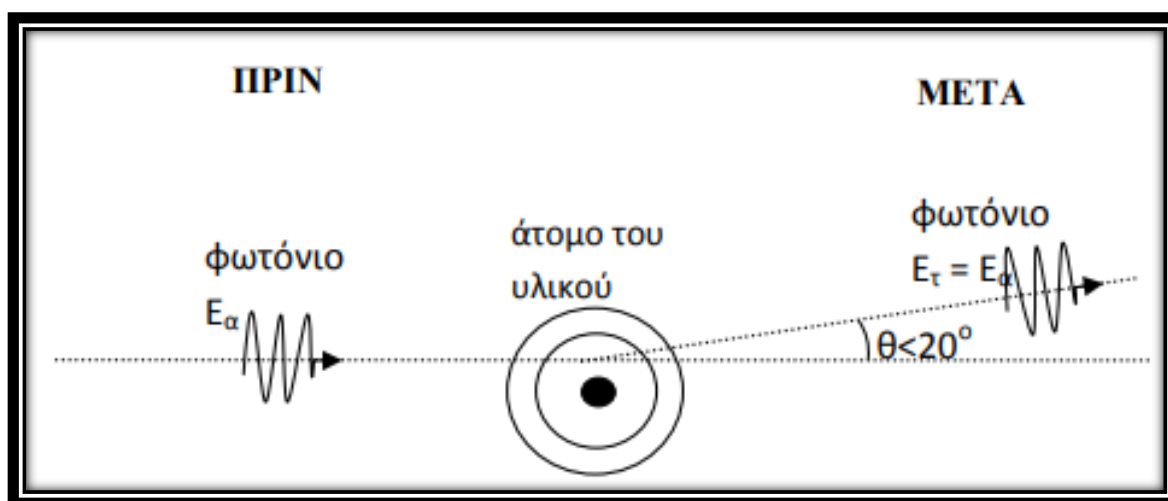
## 1.6 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας – ύλης

Από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα είναι γνωστό, ότι η εκπομπή και η απορρόφηση της ακτινοβολίας δεν πραγματοποιείται με συνεχή τρόπο, αλλά σε μικρά πακέτα τα οποία καλούνται κβάντα ενέργειας. Τα κβάντα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας γενικότερα ονομάζονται φωτόνια. Αυτά δεν έχουν μάζα ηρεμίας και είναι ηλεκτρικά ουδέτερα επομένως η αλληλεπίδραση των φωτονίων (ακτίνων X,  $\gamma$ ) με την ύλη γίνεται σημειακά.

Η παράμετρος που καθορίζει τον τρόπο της αλληλεπίδρασης είναι η ενέργεια του φωτονίου και το είδος του υλικού που διασχίζουν. Το αν και ο τρόπος με τον οποίο θα αλληλεπιδράσει ένα φωτόνιο με την ύλη εξαρτάται καθαρά από πιθανότητες. Τα φωτόνια αλληλεπιδρούν με την ύλη με 4 κυρίως μηχανισμούς οι οποίοι θα παρουσιαστούν στη συνέχεια και είναι: η ελαστική σκέδαση, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η σκέδαση Compton και η δίδυμη γένεση (Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, 2011) (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

### 1.6.1 Η ελαστική σκέδαση

Όταν ένα πλήθος φωτονίων μικρής ενέργειας ( $< 20$  keV) εισέρχεται σε ένα υλικό, κυρίως με μεγάλο ατομικό αριθμό, υπάρχει η πιθανότητα αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός φωτονίου και ενός ατόμου με ελαστική σκέδαση. Στην περίπτωση αυτή, η ενέργεια του φωτονίου δεν είναι αρκετή ούτε για να διεγείρει κάποιο ηλεκτρόνιο σε διεγερμένη κατάσταση ούτε για να ιονίσει το άτομο. Το μόνο που θα συμβεί είναι μικρή αλλαγή στη διεύθυνση του νέου φωτονίου χωρίς όμως να επηρεαστεί η ενέργεια του. Καθώς, λοιπόν η τελική ενέργεια ισούται με την αρχική, η ελαστική σκέδαση δεν θεωρείται σημαντικός μηχανισμός αλληλεπίδρασης. Γενικά μόνο το 5% των αλληλεπιδράσεων είναι αυτού του τύπου.



**Σχήμα 4:** Ελαστική σκέδαση. Το φωτόνιο σκεδάζεται από το άτομο του υλικού αλλάζοντας τη διεύθυνση του έως και  $20^\circ$  ενώ η τελική του ενέργεια  $E_t$  διατηρείται ίση με την αρχική  $E_\alpha$  (Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, 2011).

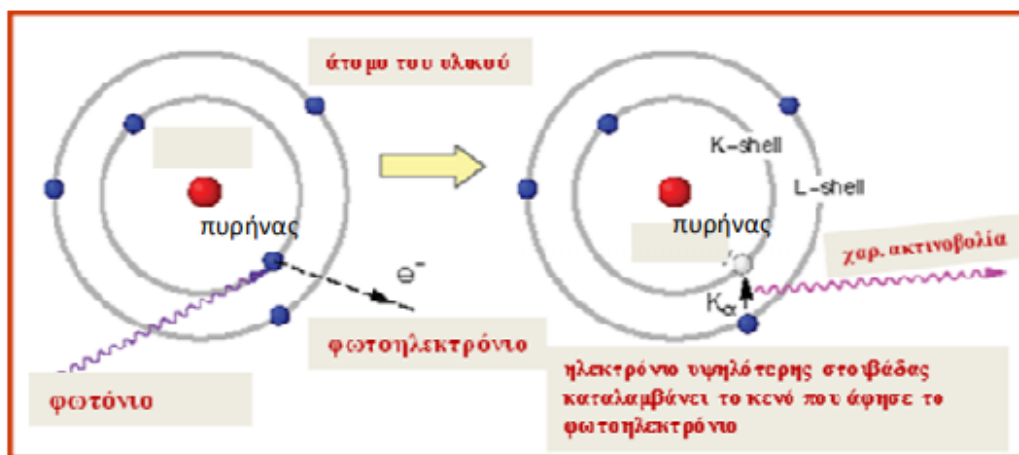
## 1.6.2 Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Ο πιθανότερος τρόπος αλληλεπίδρασης φωτονίων χαμηλής ενέργειας ( $< 50\text{keV}$ ) με την ύλη είναι με φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Τα φωτόνια κινούνται με ταχύτητα μέσα σε κάποιο υλικό και έχουν επομένως κινητική ενέργεια. Όταν ένα φωτόνιο αλληλεπιδράσει με ένα άτομο, ουσιαστικά μεταφέρει σε ένα ηλεκτρόνιο της εσωτερικής στοιβάδας την ενέργεια του κι έπειτα εξαφανίζεται. Η ενέργεια που δέχεται το ηλεκτρόνιο είναι αρκετή ώστε να του επιτρέψει να ξεφύγει από την τροχιά του, να εγκαταλείψει δηλαδή το άτομο και να ελευθερωθεί.

Το ηλεκτρόνιο αυτό καλείται φωτοηλεκτρόνιο λόγω της προέλευσής του και της αύξησης της ενέργειάς του. Το άτομο του υλικού, έχοντας πλέον χάσει ένα ηλεκτρόνιο αποκτά θετικό φορτίο και έτσι έχουμε ιονισμό του ατόμου. Παράλληλα με την εκπομπή του φωτοηλεκτρονίου, λαμβάνει χώρα και εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας ως απόρροια των ηλεκτρονιακών μεταπτώσεων, δηλαδή της διαδικασίας κατά την οποία ένα ηλεκτρόνιο από την εξωτερική στοιβάδα κινείται προς την εσωτερική στοιβάδα ώστε να συμπληρώσει το κενό που άφησε το ηλεκτρόνιο που εκτοξεύτηκε.

Συνεπώς, στο τέλος του φωτοηλεκτρικού φαινομένου θα έχουμε 1 ελεύθερο ηλεκτρόνιο που θα αποδώσει την ενέργειά του στο υλικό και εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας. Επίσης, η πιθανότητα να συμβεί φωτοηλεκτρικό αυξάνει έντονα όσο αυξάνει ο ατομικός αριθμός του υλικού (Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, 2011).

Στο σχήμα 5, φαίνεται η διαδικασία που λαμβάνει χώρα σε ένα φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.



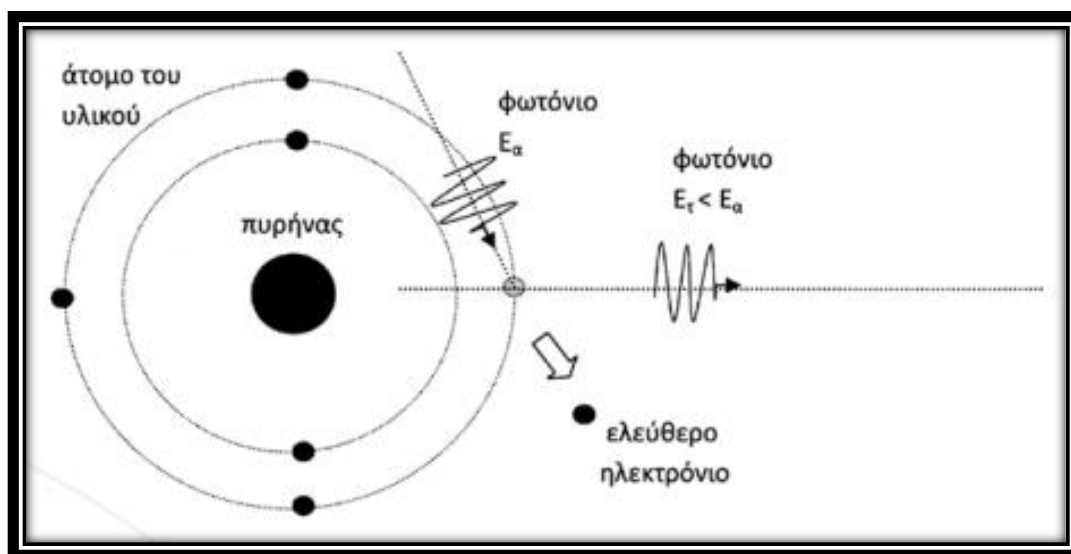
**Σχήμα 5:** Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Το φωτόνιο απορροφάται πλήρως από εσωτερικό ηλεκτρόνιο το οποίο ελευθερώνεται (φωτοηλεκτρόνιο). Το κενό που άφησε το φωτοηλεκτρόνιο καταλαμβάνεται από ηλεκτρόνιο εξωτερικής στοιβάδας με ταυτόχρονη εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας (Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, 2011).

## 1.6.3 Η σκέδαση Compton

Η αλληλεπίδραση Compton εμφανίζεται όταν φωτόνια με σχετικά υψηλή ενέργεια αυτή τη φορά ( $> 50\text{keV}$ ) εισέρχονται σε ένα υλικό, ανταλλάσσοντας ορμή και ενέργεια όπως συμβαίνει περίπου σε ένα φαινόμενο κρούσης. Το φωτόνιο, αρχικής ενέργειας  $E_a$  αλληλεπιδρά με ένα ελεύθερο ή σχεδόν ελεύθερο ηλεκτρόνιο της εξωτερικής στοιβάδας, δίνοντας του ένα μέρος της ενέργειάς του.

Μετά τη σύγκρουση, το φωτόνιο συνεχίζει με σαφώς μικρότερη ενέργεια και παρουσιάζοντας μια μικρή αλλαγή στη διεύθυνσή του (σκέδαση). Το ηλεκτρόνιο έχοντας απορροφήσει κινητική ενέργεια, απομακρύνεται από την αρχική του θέση και τελικά εγκαταλείπει το άτομο. Με τη σειρά του το άτομο αποκτά θετικό φορτίο και ιονίζεται. Έμμεσα λοιπόν, τα φωτόνια ιοντίζουν το υλικό στο οποίο εισέρχονται.

Η εκτροπή που θα υποστεί το φωτόνιο κυμαίνεται από μερικές μοίρες έως και 180 μοίρες, δηλαδή πλήρη επιστροφή του, περίπτωση η οποία ονομάζεται οπισθοσκέδαση. Συνεπώς, στο τέλος της σκέδασης Compton έχουμε ένα σκεδασμένο φωτόνιο με τελική ενέργεια μικρότερη της αρχικής του και ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο από την εξωτερική στοιβάδα.



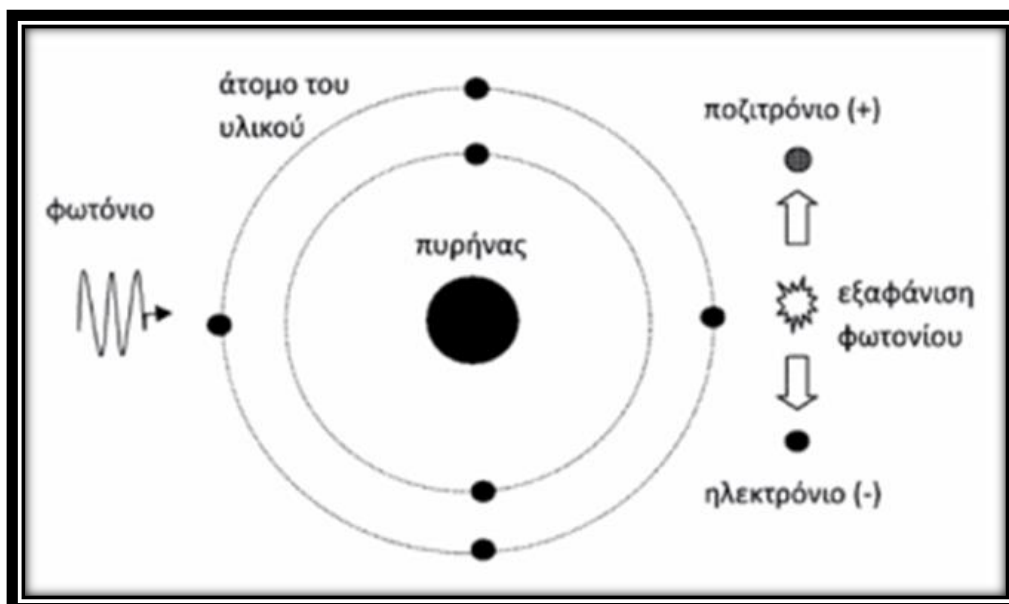
**Σχήμα 6:** Φαινόμενο Compton: Το φωτόνιο έχοντας αρχική ενέργεια  $E_a$  αλληλεπιδρά με ηλεκτρόνιο της τελευταίας στοιβάδας δίνοντας του μέρος της ενέργειας του. Το ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει το άτομο και ελευθερώνεται. Το φωτόνιο συνεχίζει με ενέργεια  $E_f$  μικρότερη της αρχικής του  $E_a$  και με αλλαγή της διεύθυνσης του. Μετά τη διαδικασία αυτή το άτομο είναι ιονισμένο αφού έχασε 1 ηλεκτρόνιο (Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, 2011).

#### 1.6.4 Η δίδυμη γένεση

Η δίδυμη γένεση συμβαίνει όταν φωτόνια με ενέργειες μεγαλύτερες από 1022 keV αλληλεπιδρούν με την ύλη και υφίστανται ριζική μετατροπή. Στους τρόπους που έχουν ήδη αναφερθεί, η αλληλεπίδραση διαδραματίζεται μεταξύ των φωτονίων και των ηλεκτρονίων του ατόμου του υλικού ενώ σε αυτήν την περίπτωση γίνεται μεταξύ των φωτονίων και του πυρήνα του ατόμου.

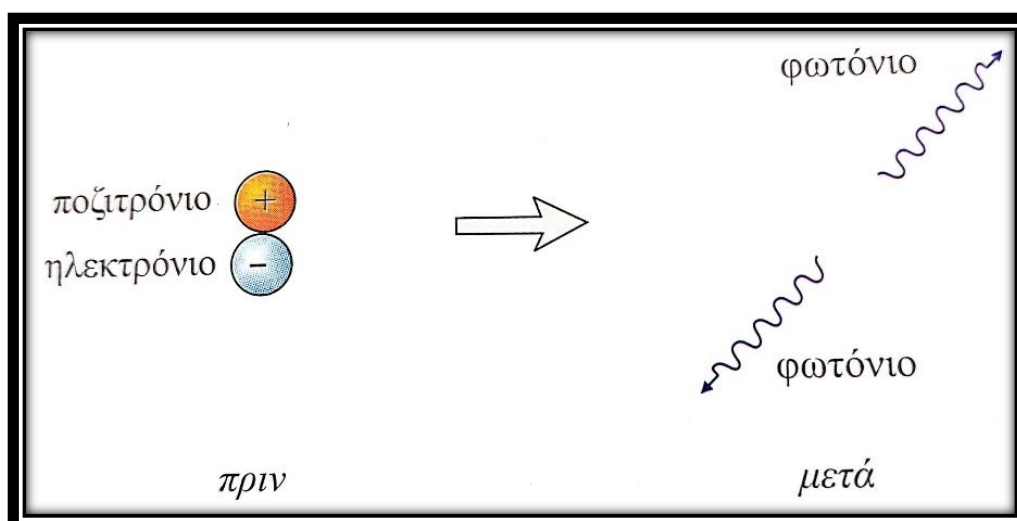
Το φαινόμενο αυτό, που ονομάζεται και δημιουργία ζεύγους, βασίζεται στην εξαφάνιση ενός φωτονίου και τη δημιουργία ενός ζεύγους σωματιδίων, ενός ηλεκτρονίου κι ενός ποζιτρονίου. Το φωτόνιο, δηλαδή δεν συγκρούεται με κάποιο άλλο σωματίδιο όπως προηγουμένως αλλά λόγω του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα, μετατρέπεται αυτόματα σε ηλεκτρόνιο και ποζιτρόνιο (Σχήμα 7). Στην περίπτωση αυτή λοιπόν έχουμε για πρώτη φορά, μετατροπή μέρους της ενέργειας του φωτονίου σε μάζα του ηλεκτρονίου και του ποζιτρονίου.





**Σχήμα 7:** Δίδυμη γένεση. Το φωτόνιο αλληλεπιδρά με τον πυρήνα του ατόμου και εξαφανίζεται. Στη θέση του εμφανίζονται ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο τα οποία κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις (Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, 2011).

Το ηλεκτρόνιο και το ποζιτρόνιο που δημιουργήθηκαν με αυτόν τον τρόπο, έχουν μεγάλη κινητική ενέργεια, αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρόνια του ατόμου και καθώς παράγουν μεγάλο αριθμό ζευγών θετικών ιόντων και ελεύθερων ηλεκτρονίων, και κατά συνέπεια το υλικό ιονίζεται. Στο τέλος της τροχιάς του, όπου το ποζιτρόνιο έχει επιβραδυνθεί σε πολύ χαμηλές ενέργειες, όταν συναντήσει ένα ηλεκτρόνιο και τα δύο μαζί θα εξαφανίζονται με ταυτόχρονη παραγωγή δύο φωτονίων (Σχήμα 8). Εδώ, έχουμε ακριβώς το αντίστροφο φαινόμενο από το προηγούμενο στάδιο, όπου η μάζα των δύο σωματιδίων μετατρέπεται σε ενέργεια φωτονίων (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).



**Σχήμα 8:** Δίδυμη γένεση, στάδιο 2. Όταν ένα ποζιτρόνιο πολύ χαμηλής ενέργειας και ένα ηλεκτρόνιο συναντηθούν, εξαυλώνονται και στη θέση τους εμφανίζονται δύο φωτόνια (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

## 1.7 Δόσεις ακτινοβολιών

Η έκθεση ενός πληθυσμού σε ακτινοβολία που προέρχεται από ραδιενέργεια μπορεί αποδεδειγμένα να προκαλέσει προβλήματα στους βιολογικούς ιστούς. Κάθε τρόπος έκθεσης είναι διαφορετικός και ενέχει διαφορετικούς κινδύνους ενώ το μέγεθος της ζημιάς που θα προκληθεί εξαρτάται από την ποσότητα της ενέργειας που απελευθερώνεται από τις ακτινοβολίες και απορροφάται από τον οργανισμό.

Οι τρόποι που μπορεί κάποιος να εκτεθεί σε ακτινοβολία είναι είτε εξωτερικοί, από ραδιενεργά ισότοπα στο περιβάλλον είτε εσωτερικοί, από την εισπνοή ή κατανάλωση ραδιενεργών ατόμων από την ατμόσφαιρα ή το φαγητό αντίστοιχα (Βεργανελάκης et al., 1989) (Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, 2011).

### Απορροφούμενη δόση

Όταν μια ποσότητα ακτινοβολιών προσπέσει σε ένα υλικό, ένα μέρος αυτής θα διέλθει μέσα από αυτό, χωρίς να αλληλεπιδράσει, ενώ ένα άλλο μέρος θα αλληλεπιδράσει μεταφέροντας στο υλικό ενέργεια, που είναι σχετικά εύκολα υπολογίσιμη. Η ενέργεια που μεταφέρεται από τη δέσμη ακτινοβολιών και απορροφάται από το υλικό καλείται απορροφούμενη δόση. Απορροφούμενη δόση,  $D$ , λοιπόν, ορίζεται ο λόγος της ενέργειας που απορροφήθηκε από το υλικό προς τη μάζα του:

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

Αποτελεί το βασικό μέγεθος εκτίμησης της πιθανότητας πρόκλησης ζημιάς αλλά και του μεγέθους αυτής και μετριέται με τη μονάδα μέτρησης gray (Gy) που ισούται με joule/kg. Ως μονάδα μέτρησης είναι αρκετά μεγάλη, οπότε πρακτικά χρησιμοποιούνται υποπολλαπλάσια της.

### Ισοδύναμη δόση

Όσον αφορά τους βιολογικούς ιστούς οι επιπτώσεις δεν εξαρτώνται μόνο από την ποσότητα αλλά και από το είδος της ακτινοβολίας. Για το λόγο αυτό, εισήχθη ένας νέος όρος, ο συντελεστής στάθμισης  $W_R$ , που προσδιορίζει κατά προσέγγιση τη σχετική βιολογική δραστηριότητα κάθε είδους ακτινοβολίας, σε σχέση με τη βιολογική δραστηριότητα των ακτίνων γάμμα ή  $X$ . Προκειμένου λοιπόν να ληφθεί υπόψιν και αυτός ο παράγοντας χρησιμοποιείται και η έννοια της ισοδύναμης δόσης.

Η ισοδύναμη δόση ( $H_T$ ) που λαμβάνει ένας ιστός, ορίζεται ως το γινόμενο της απορροφούμενης δόσης ( $D$ ) με το συντελεστή στάθμισης  $W_R$ .

$$H_T = D \times W_R$$

Η ισοδύναμη δόση μετρείται σε sievert (Sv). Ως μονάδα είναι αρκετά μεγάλη και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται υποπολλαπλάσια της. Για τα φωτόνια ο συντελεστής στάθμισης ισούται με ένα ( $W_R = 1$ ). Άρα για τα φωτόνια, η απορροφούμενη δόση (σε Gy) είναι ίση με την ισοδύναμη δόση (σε Sv).

**Πίνακας 2:** Συντελεστής  $W_R$  στάθμισης της ακτινοβολίας (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

Είδος και φάσμα ενεργειών	$W_R$
Φωτόνια οποιασδήποτε ενέργειας	1
Ηλεκτρόνια οποιασδήποτε ενέργειας	1
Νετρόνια με ενέργεια:	
μικρότερη από: 10 keV	5
μικρότερη από: 10 keV έως 100 keV	10
μικρότερη από: 100 keV έως 2 MeV	20
μικρότερη από: 2 MeV έως 20 MeV	10
μεγαλύτερη από: 20 MeV	5
Πρωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από 2 MeV	5
Σωματίδια α, θραύσματα σχάσης, βαρείς πυρήνες	20

### Ενεργός δόση

Οι εκθέσεις σε ακτινοβολία και οι αντίστοιχες δόσεις διακρίνονται σε ολόσωμες, όταν η ακτινοβολία προσπίπτει ομοιογενώς σε ολόκληρο το ανθρώπινο σώμα και σε δόσεις μεμονωμένων ιστών ή οργάνων. Τα μέρη του σώματος δεν εμφανίζουν όλα την ίδια ευαισθησία όταν εκτίθενται σε ακτινοβολία. Έτσι, για συγκεκριμένη ποσότητα και δόση ακτινοβολίας, είναι πιθανό να προκληθεί μεγαλύτερη ζημιά σε ένα μέρος του σώματος από ότι σε ένα άλλο.

Για να υπολογιστεί λοιπόν η συνολική επιβάρυνση της υγείας από την ακτινοβολία ενός ή περισσοτέρων οργάνων ή ιστών, χρησιμοποιείται η έννοια της ενεργού δόσης. Η ενεργός δόση ( $E_{eff}$ ) υπολογίζεται από το γινόμενο της ισοδύναμης δόσης που απορροφήθηκε από έναν ιστό (T) και ενός συντελεστή  $W_T$  ο οποίος εξαρτάται από το είδος του ιστού.

$$E_{eff} = H_T \times W_T$$

Για ολόσωμη δόση ο συντελεστής  $W_T$  είναι ίσος με ένα ( $W_T = 1$ ).

**Πίνακας 3:** Συντελεστής στάθμισης  $W_T$  για την ενεργό δόση (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

Ιστός ή όργανο	Συντελεστής στάθμισης $W_T$
Γεννητικοί αδένες	0,20
Μυελός οστών	0,12
Κόλον	0,12
Πνεύμονας	0,12
Στόμαχος	0,12
Ουροδόχος κύστη	0,05
Μαστός	0,05
Ήπαρ	0,05
Οισοφάγος	0,05
Θυρεοειδής αδένας	0,05
Δέρμα	0,01
Επιφάνεια οστού	0,01
Λοιπά	0,05

## 2. Ραδιενέργεια περιβάλλοντος

### 2.1 Γενικά

Από τη στιγμή της δημιουργίας του, ο άνθρωπος είναι εκτεθειμένος σε ένα ραδιενεργό περιβάλλον. Δεν υπάρχει τοποθεσία στη Γη όπου να μην υπάρχει φυσική ραδιενέργεια. Από τα 340 νουκλίδια που έχουν βρεθεί στη φύση, περίπου τα 70 είναι ραδιενεργά. Όλα τα στοιχεία που έχουν ατομικό αριθμό μεγαλύτερο από 80 εμπεριέχουν ραδιενεργά ισότοπα και όλα τα ισότοπα με αριθμό μεγαλύτερο του 83 είναι ραδιενεργά.

Πέραν όμως της φυσικής ραδιενέργειας που υπάρχει στη φύση, εντοπίζεται και τεχνητή ραδιενέργεια, ως προϊόν της ανθρώπινης τεχνολογίας και γενικότερα της ανθρώπινης δραστηριότητας (Eisenbud & Gesell, 1997).

### 2.2 Πηγές ραδιενέργειας

Οι πηγές ραδιενέργειας λοιπόν στο περιβάλλον μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες, τις φυσικές, που συμπεριλαμβάνουν την κοσμική ακτινοβολία και τη γήινη και τις τεχνητές ή ανθρωπογενείς, που αφορούν τις σύγχρονες ανθρώπινες δραστηριότητες.

#### 2.2.1 Φυσικές πηγές

##### ➤ Κοσμική ακτινοβολία

Η Γη βομβαρδίζεται συνεχώς με σωματίδια υψηλής ενέργειας από το διάστημα και τον Ήλιο. Τα σωματίδια αυτά ταξιδεύουν ομαδικά προς τη γη, με ταχύτητα κοντά σε αυτήν του φωτός, με σταθερό ρυθμό και από όλες τις διευθύνσεις. Τα σωματίδια είναι περίπου κατά 79% πρωτόνια, 20% σωματίδια α και 1% ιόντα βαρέων ατόμων. Αυτά τα πρωτογενή κοσμικά σωματίδια έχουν ένα φάσμα ενεργειών που κυμαίνεται από  $10^8$  eV έως  $10^{20}$  eV.

Ένα πολύ μικρό ποσοστό αυτών φτάνει στην επιφάνεια της Γης ενώ τα υπόλοιπα αλληλεπιδρούν με τα στοιχεία που βρίσκονται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Από την αλληλεπίδραση αυτή μεταξύ της κοσμικής ακτινοβολίας και της ατμόσφαιρας παράγονται δευτερογενής ακτινοβολία η οποία μειώνεται σε ένταση όσο πλησιάζει στην επιφάνεια της γης και ραδιενεργά ισότοπα που ονομάζονται κοσμογενή. Αυτά μπορεί να είναι  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$  και  $^{22}\text{Na}$ . Από αυτά τα ραδιονουκλίδια, ένα ποσοστό φτάνει στην γήινη επιφάνεια ενώ το υπόλοιπο απορροφάται από την ατμόσφαιρα, που λειτουργεί ως προστατευτικό "κέλυφος" της Γης.

Η κοσμική ακτινοβολία εξαρτάται από το υψόμετρο και η τιμή της ελαττώνεται καθώς πλησιάζει την γήινη επιφάνεια. Ενδεικτικά, αναφέρεται πως σε υψόμετρο 1600 μέτρων, η δόση που προσλαμβάνεται από κάποιον έχει σχεδόν τη διπλάσια τιμή σε σχέση με την αντίστοιχη δόση στην επιφάνεια της θάλασσας.

Άλλος παράγοντας που επηρεάζει το μέγεθος της ακτινοβολίας είναι το μαγνητικό πεδίο της Γης. Καθώς τα σωματίδια ταξιδεύουν προς την επιφάνεια το μαγνητικό πεδίο εκτρέπει την

πορεία τους προς τους πόλους. Αυτό έχει ως συνέπεια, η κοσμική ακτινοβολία να είναι περίπου 15% υψηλότερη κοντά στους πόλους από ότι στον Ισημερινό.

Αξίζει τέλος, να σημειωθεί πως από την αλληλεπίδραση μεταξύ ατμόσφαιρας και κοσμικής ακτινοβολίας παράγεται και το ισότοπο του άνθρακα  $^{14}\text{C}$ , που αποτελεί την αρχή μεθόδου μέτρησης της ηλικίας (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

### ➤ Ακτινοβολία από τη γη

Η κατηγορία αυτή αναφέρεται στα φυσικά ραδιενεργά ισότοπα που εντοπίζονται παντού στο φυσικό περιβάλλον, από το φλοιό της Γης μέχρι και την επιφάνειά της. Τα ραδιοϊσότοπα που απαντώνται στο φλοιό της Γης εκπέμπουν άλφα, βήτα και γάμα ακτινοβολία, ωστόσο μόνο η ακτινοβολία γάμμα φθάνει στον άνθρωπο καθώς οι άλφα και βήτα δεν είναι ικανές να περάσουν το μεγάλο πάχος της ύλης μέχρι την επιφάνεια.

Η δόση που δέχεται ο άνθρωπος από εξωτερική έκθεση από τη Γη έχει ως τυπική τιμή τα 0.5 mSv ανά έτος και κυμαίνεται από 0.3 mSv έως 0.6 mSv ανά έτος, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

Τα επίπεδα της δόσης εξαρτώνται από την ποσότητα των ραδιονουκλιδίων στα εδάφη και άρα από τους τύπους των εδαφών και τα πετρώματα από τα οποία προέρχονται. Τα κύρια ραδιονουκλίδια της κατηγορίας αυτής είναι το  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$  και  $^{238}\text{U}$ .

Το ραδιενεργό φυσικό ισότοπο κάλιο  $^{40}\text{K}$  αποτελεί μια σημαντική, εσωτερική αυτήν τη φορά, πηγή ραδιενέργειας και βρίσκεται στο φυσικό κάλιο σε ποσοστό 0.0118%. Ο άνθρωπος προσλαμβάνει το ισότοπο αυτό μέσω της τροφικής αλυσίδας. Άλλη σημαντική πηγή αποτελούν επίσης το ουράνιο  $^{238}\text{U}$  και το θόριο  $^{232}\text{Th}$  καθώς και τα προϊόντα από τις διασπάσεις τους, που φτάνουν στον άνθρωπο μέσω της τροφικής αλυσίδας ή της αναπνοής.

Το ουράνιο βρίσκεται στη γη με τη μορφή διοξειδίου του ουρανίου ( $\text{UO}_2$ ) και η συγκέντρωση του διαφέρει σημαντικά ανά περιοχή, με τη μέγιστη συγκέντρωση να εντοπίζεται στα κοιτάσματα φυσικού ουρανίου. Στη φυσική ραδιενεργή σειρά του ουρανίου βρίσκεται το ισότοπο του ραδίου  $^{226}\text{Ra}$  με χρόνο ημιζωής ίσο με 1622 χρόνια, το οποίο μαζί με τα προϊόντα αποσύνθεσής του είναι υπεύθυνο για το μεγαλύτερο ποσοστό δόσης που δέχεται ο άνθρωπος από φυσικές πηγές. Υπάρχει σε όλα τα εδάφη και τα πετρώματα ενώ επειδή έχει παρόμοιες χημικές ιδιότητες με το ασβέστιο συσσωρεύεται στα οστά. Το ράδιο 226 ( $^{226}\text{Ra}$ ) με τη διάσπαση του, παράγει ένα αδρανές αέριο, το ραδιενεργό ισότοπο ραδόνιο 222 ( $^{222}\text{Rn}$ ) το οποίο διαφεύγει στην ατμόσφαιρα και αν αυτό ή κάποιο από τα θυγατρικά του εισέλθει στους πνεύμονες μπορεί να προκαλέσει βλάβη (Eisenbud & Gesell, 1997).

## 2.2.2 Τεχνητές πηγές ή ανθρωπογενείς

Πέραν του ποσοστού των ραδιονουκλιδίων που προέρχονται από τη φύση, ο άνθρωπος με τις δραστηριότητές του και τη σύγχρονη τεχνολογία του έχει συμβάλει στην αύξηση των επιπέδων συγκέντρωσής του στο περιβάλλον. Υλικά που συναντώνται συνεχώς στην καθημερινότητά μας αποτελούν πηγές ανθρωπογενών ραδιοϊσοτόπων. Οι κυριότερες ανθρωπογενείς πηγές είναι τα δομικά υλικά, οι δοκιμές πυρηνικών όπλων, τα συμβατικά

καύσιμα, η πυρηνική βιομηχανία και τα πυρηνικά ατυχήματα καθώς και οι ιατρικές εφαρμογές (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004).

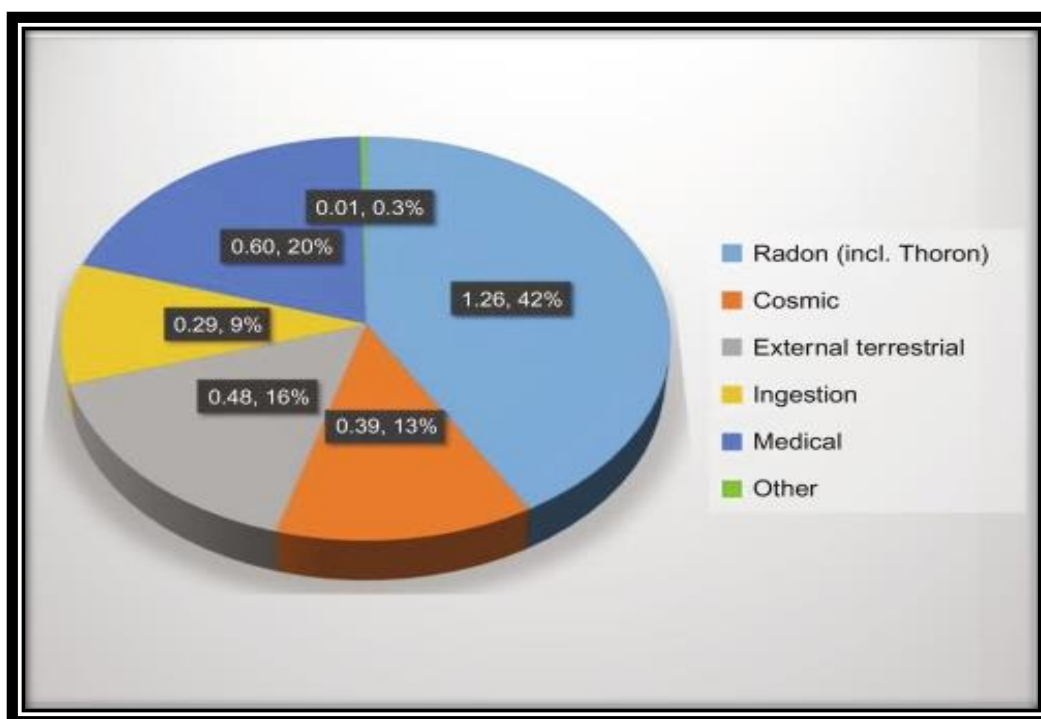
**Δομικά υλικά** που προέρχονται από ορυκτά, όπως η πέτρα, ο γύψος και το μπετόν εμπεριέχουν ράδιο, θόριο και κάλιο σε μικρές ποσότητες και εκλύουν ραδόνιο στην ατμόσφαιρα. Η δόση εξαρτάται από το είδος των υλικών που χρησιμοποιείται και τις ποσότητές τους, από τον εξαερισμό των κτιρίων και προφανώς παρουσιάζει μεγάλες τοπικές διακυμάνσεις.

**Η πυρηνική βιομηχανία** με τη λειτουργία των πυρηνικών σταθμών, παράγει πυρηνικό καύσιμο, και παράγει και διαχειρίζεται ραδιενεργά κατάλοιπα. Όλη αυτή η διαδικασία αυξάνει τα επίπεδα ραδιενέργειας στο περιβάλλον. Σε αυτήν τη ρύπανση έρχεται να συμβάλλει η εξόρυξη ορυκτών που εμπεριέχουν ουράνιο καθώς και οι ελεγχόμενες υγρές και αέριες εκροές ραδιενεργών προϊόντων στο περιβάλλον. Έκθεση σε πολύ υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας προκαλείται επίσης από πυρηνικά ατυχήματα, όπου εκλύονται στην ατμόσφαιρα ραδιενεργά στοιχεία με πολύ μικρότερους χρόνους ημιζωής, που εκπέμπουν περισσότερη ακτινοβολία σε μικρότερο διάστημα και επιβαρύνουν περισσότερο τα κύτταρα συγκεκριμένων οργάνων (π.χ. ραδιενεργό ιώδιο-131, καίσιιο-137, στρόντιο-90 κ.α.). Για το λόγο αυτό, επιβάλλεται συγκεκριμένος σχεδιασμός και διαδικασίες λειτουργίας αυτών, ώστε να τηρούνται τα προκαθορισμένα όρια περί δόσεων (Αντωνόπουλος-Ντόμης, 2004).

**Οι δοκιμές πυρηνικών όπλων** έχουν εξακριβωθεί προκαλέσει τη μεγαλύτερη ραδιενεργό ρύπανση στο περιβάλλον. Κάθε δοκιμή επιφέρει έναν αριθμό σωματιδίων, ως αποτέλεσμα της σχάσης, τα οποία προσκολλώνται στα αιωρούμενα σωματίδια σκόνης και νερού στην ατμόσφαιρα. Με αυτόν τρόπο επέρχεται μόλυνση στην περιοχή της έκρηξης από τα σωματίδια που λόγω βαρύτητας επικάθισαν στην επιφάνεια αλλά και παγκοσμίως από τα ελαφρύτερα σωματίδια που με την πάροδο του χρόνου διαχύθηκαν στην ατμόσφαιρα.

**Τα συμβατικά καύσιμα:** Ορυκτά όπως ο γαιάνθρακας που εμπεριέχουν ουράνιο ακόμη και σε ελάχιστες ποσότητες εκλύουν ραδιενεργά ισότοπα με την καύση τους και την τέφρα. Συνεπώς, οι συμβατικοί ηλεκτροπαραγωγοί σταθμοί με καύσιμο προκαλούν ρύπανση του περιβάλλοντος με ουράνιο, θόριο, ράδιο και ραδόνιο. Ακόμη και πιο εναλλακτικά καύσιμα όπως το φυσικό αέριο που περιέχει  $^{222}\text{Rn}$  μπορεί σε εσωτερικούς χώρους όχι καλά αεριζόμενους, να ευθύνεται για μια σημαντική τιμή δόσης.

**Ιατρικές εφαρμογές:** Οι ακτινογραφίες και η οδοντιατρική ευθύνονται για τη υψηλότερη μέση δόση ανά άτομο. Η δόση από μία ακτινογραφία θώρακος ανέρχεται σε περίπου 0,14 mSv και από μία ακτινογραφία δοντιών σε 0,02 mSv. Συνεχώς αυξανόμενη είναι επίσης η χρήση ραδιοϊσοτόπων στη διαγνωστική και τη θεραπευτική ιατρική.



**Σχήμα 9:** Εκτιμήσεις των παγκόσμιων ετήσιων εκθέσεων και η κατανομή των πηγών έκθεσης, τόσο σε mSv όσο και σε ποσοστό της συνολικής έκθεσης (UNSCEAR, 2008). Το "Άλλο" περιλαμβάνει την έκθεση από επιπτώσεις που προκύπτει από πυρηνικές δοκιμές, από το ατύχημα του Τσερνομπίλ και από εκπομπές πυρηνικών σταθμών.

### 2.3 Φυσικές ραδιενεργές σειρές

Τα ραδιονουκλίδια που υπάρχουν στη φύση εντοπίζονται με τη μορφή ραδιενεργών σειρών διάσπασης. Πρόκειται για αλυσίδες διαδοχικών διασπάσεων, κατά τις οποίες ένας μητρικός πυρήνας (U, Th) ενός στοιχείου υφίσταται συνεχείς διαδοχικές διασπάσεις σε έναν άλλο (θυγατρικό) μέχρι να καταλήξει σε κάποιο σταθερό ισότοπο μολύβδου (Pb). Οι μητρικοί πυρήνες αποτελούνται από τα νουκλίδια,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  (Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2004) (Eisenbud & Gesell, 1997).

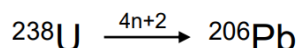
Οι 3 φυσικές ραδιενεργές σειρές μελετήθηκαν από τον Frederick Soddy το 1911 και το 1913 και είναι: η σειρά ουρανίου  $^{238}\text{U}$  ( $4n+2$ ), η σειρά θορίου  $^{232}\text{Th}$  ( $4n+0$ ) και η σειρά ακτινίου  $^{235}\text{U}$  ( $4n+3$ ).

#### ➤ Σειρά ουρανίου $^{238}\text{U}$ ( $4n+2$ )

Το ουράνιο που απαντάται στη φύση αποτελείται από τρία ισότοπα με τους μαζικούς αριθμούς 234, 235 και 238. Στο φλοιό της Γης συναντώνται και τα τρία ισότοπα αλλά με διαφορετικό ποσοστό εμφάνισης. Το  $^{238}\text{U}$  εμφανίζεται με ένα ποσοστό 99.28% και βρίσκεται συνήθως σε ραδιενεργή ισορροπία ή κοντά στην ισορροπία με το  $^{234}\text{U}$ , το οποίο συναντάται σε ποσοστό 0.0058%. Τέλος, το  $^{235}\text{U}$ , ισότοπο που εμφανίζεται στη σειρά του ακτινίου που θα παρουσιαστεί παρακάτω ανέρχεται στο ποσοστό του 0,71% (Eisenbud & Gesell, 1997).

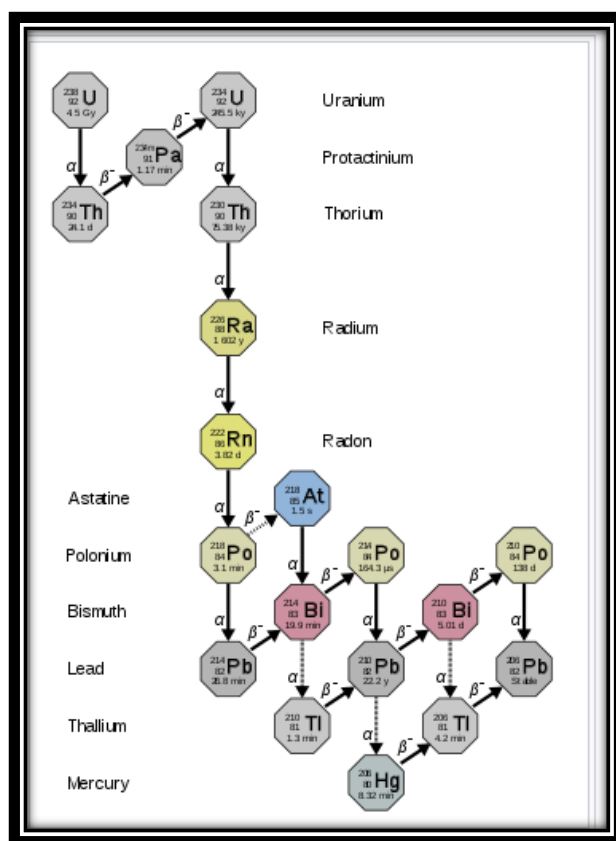


Η σειρά αυτή ξεκινά με τη διάσπαση του  $^{238}\text{U}$  λόγω εκπομπής α σωματιδίων και μετά από μια σειρά διαδοχικών διασπάσεων, ολοκληρώνεται με τελικό προϊόν, το μη ραδιενεργό (σταθερό) ισότοπο του μολύβδου, το νουκλίδιο  $^{206}\text{Pb}$ .



Κάθε ισότοπο αναγνωρίζεται από το χαρακτηριστικό χρόνο ημιζωής του και όλα τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα που βρίσκονται μεταξύ του ουρανίου και του μολύβδου απεικονίζονται σε αυτήν τη σειρά. Χαρακτηριστικό της σειράς αυτής αποτελεί το γεγονός ότι ο μαζικός αριθμός όλων των ισωτόπων που την απαρτίζουν μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο  $(4n+2)$ , γι' αυτό συνήθως εμφανίζεται και στο όνομά της.

Στην Εικόνα 4, απεικονίζονται όλες οι διαδοχικές διασπάσεις που αποτελούν τη σειρά ουρανίου καθώς και τα σωματίδια που απελευθερώνονται σε κάθε περίπτωση.



**Εικόνα 1:** Σειρά ουρανίου  $^{238}\text{U}$  (4n+2). Απεικονίζονται όλες οι διαδοχικές διασπάσεις που λαμβάνουν χώρα στη σειρά ουρανίου (wikipedia, 2020).

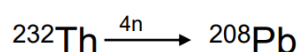
### ➤ Σειρά θορίου $^{232}\text{Th}$ (4n)

Το θόριο βρίσκεται σε ποσοστό 0.0007% στο φλοιό της Γης. Το  $^{232}\text{Th}$  έχει χρόνο ημιζωής ίσο με  $1.4 \times 10^{10}$  χρόνια και είναι το μητρικό νουκλίδιο που καθώς διασπάται με διάσπαση α, ξεκινά την αλυσιδωτή αντίδραση της ραδιενεργού σειράς του θορίου. Στη φύση συναντώνται ακόμη το  $^{227}\text{Th}$  ( $t_{1/2}=18.2$  ημέρες), το  $^{228}\text{Th}$  ( $t_{1/2}=1.91$  χρόνια), το  $^{230}\text{Th}$  ( $t_{1/2}=8 \cdot 10^4$  χρόνια), το

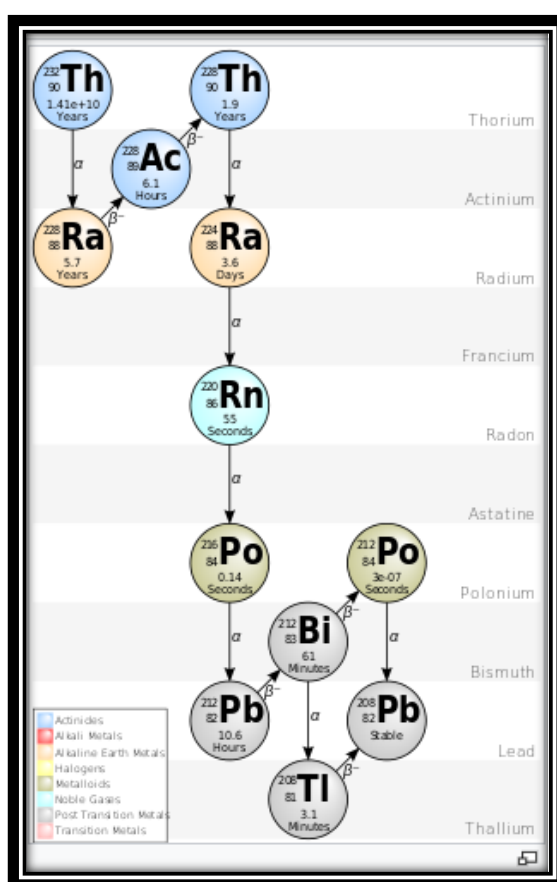
$^{231}\text{Th}$  ( $t_{1/2}=25.52$  ημέρες) και το  $^{234}\text{Th}$  ( $t_{1/2}=24.1$  ημέρες), που είναι μέλη των διαφόρων φυσικών ραδιενεργών οικογενειών (Eisenbud & Gesell, 1997).

Οι τιμές του θορίου στα διάφορα πετρώματα κυμαίνονται από 8,1 έως 33 ppm για τα πυριγενή πετρώματα με σημαντικότερη τα 12 ppm, για τους ψαμμόλιθους τα 6 ppm και για τους ασβεστόλιθους το 1 ppm (Faul, 1954).

Στη σειρά αυτή λοιπόν, το μητρικό φυσικό νουκλίδιο,  $^{232}\text{Th}$ , καταλήγει στο τελικό θυγατρικό, το  $^{208}\text{Pb}$ . Ο τύπος υπολογισμού του μαζικού αριθμού των ισοτόπων σε αυτή την σειρά είναι  $4n$ .



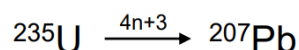
Στην Εικόνα 2 φαίνονται οι διαδοχικές διασπάσεις του μητρικού  $^{232}\text{Th}$  έως ότου καταλήξει στο τελικό  $^{208}\text{Pb}$ .



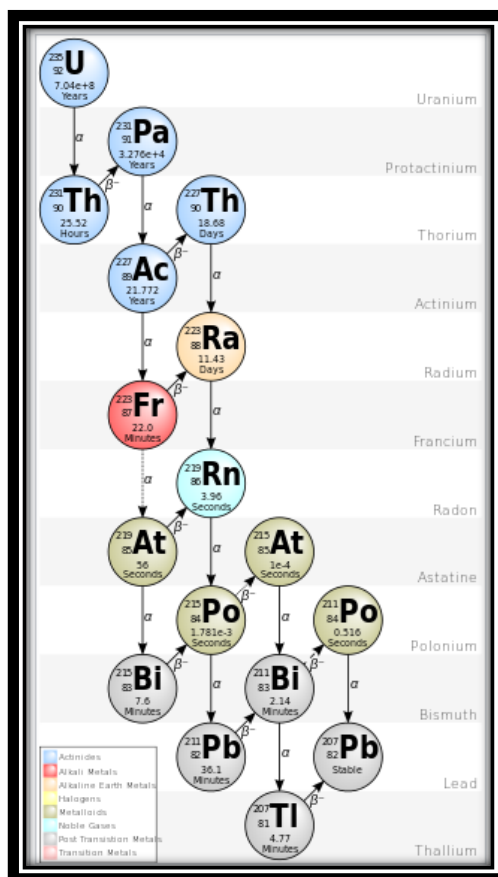
**Εικόνα 2:** Σειρά θορίου  $^{232}\text{Th}$  ( $4n$ ). Απεικονίζονται όλες οι διαδοχικές διασπάσεις που λαμβάνουν χώρα στη σειρά θορίου (wikipedia, 2020).

➤ **Σειρά ακτινίου  $^{235}\text{U}$  ( $4n+3$ )**

Η διάσπαση του  $^{235}\text{U}$  με ταυτόχρονη εκπομπή σωματιδίου  $\alpha$ , αποτελεί το έναυσμα για την αλυσιδωτή αντίδραση που θα ολοκληρωθεί με το τελικό σταθερό ισότοπο  $^{207}\text{Pb}$ . Ο τύπος υπολογισμού της μάζας των ισοτόπων της αλυσίδας είναι  $(4n + 3)$ .



Στην Εικόνα 3 φαίνεται η αλυσιδωτή αντίδραση και τα ισότοπα που την απαρτίζουν μέχρι να εμφανιστεί το τελικό προϊόν.



**Εικόνα 3:** Σειρά ακτινίου  $^{235}\text{U}$  ( $4n+3$ ). Απεικονίζονται όλες οι διαδοχικές διασπάσεις που λαμβάνουν χώρα στη σειρά θορίου (wikipedia, 2020).

Τέλος, η βιβλιογραφία αναφέρει πως πρέπει να υπήρξε και μία τέταρτη φυσική ραδιενεργή σειρά, αυτή του ποσειδωνίου  $^{237}\text{Np}$  ( $4n+1$ ). Σύμφωνα με αυτή, το αρχικό στοιχείο  $^{237}\text{Np}$  διασπάται μέχρι να σχηματιστεί το τελικό προϊόν  $^{209}\text{Bi}$ . Ωστόσο ο χρόνος ημιζωής του ήταν ίσος με  $2,14 \times 10^6$  χρόνια και άρα πολύ μικρότερος από την ηλικία της Γης ( $4,7 \times 10^9$  χρόνια). Το ίδιο ισχύει για όλα τα θυγατρικά του, οπότε η σειρά δεν εντοπίζεται πια στη φύση (Eisenbud & Gesell, 1997).

## 2.4 Ανίχνευση και μέτρηση ραδιενέργειας

Οι ανθρώπινες αισθήσεις δεν επαρκούν για την ανίχνευση των ραδιενεργών σωματιδίων όπως άλφα, βήτα ή υψηλής ενέργειας γάμμα και ακτίνες X. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται ειδικοί ανιχνευτές που ανιχνεύουν ποσοτικά ή ποιοτικά τη ραδιενέργεια μέσω των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την αλληλεπίδραση της με την ύλη. Οι

διεγέρσεις και οι ιονισμοί που προκαλούνται έχουν ως αποτέλεσμα μεταφορά ενέργειας στο υλικό, το ποσό της οποίας προσδιορίζεται έμμεσα από τους ανιχνευτές.

Τα περισσότερα συστήματα ανιχνευτών χρησιμοποιούν τον ιονισμό ως μέσο ανίχνευσης των ακτινοβολιών (Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, 2011). Ο τύπος του ανιχνευτή που θα επιλεγεί εξαρτάται από το είδος και την ένταση της ακτινοβολίας.

Στην παρούσα εργασία, θα μας απασχολήσουν μόνο οι τρόποι ανίχνευσης που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της γάμμα ακτινοβολίας και υπάρχουν στο εργαστήριο ακτινοβολιών του τμήματος Περιβάλλοντος, του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Ευτυχώς, η ηλεκτρομαγνητική φύση των ακτίνων γάμμα επιτρέπει την έντονη αλληλεπίδρασή τους με τα ηλεκτρόνια στα άτομα κάθε ύλης και συνεπώς την ανίχνευσή τους.

Οι ανιχνευτές γάμμα ακτινοβολίας μπορούν συνήθως να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες, τους ανιχνευτές ακτινοβολίας με αέριο, τους ανιχνευτές σπινθηρισμού και τους ημιαγωγικούς ανιχνευτές. Είναι συνήθως απαραίτητη η μέτρηση όχι μόνο της ποσότητας της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από ένα δείγμα αλλά και η καταγραφή του ενεργειακού φάσματος αυτής.

### 2.4.1 Ανιχνευτές ακτινοβολίας με αέριο

#### ➤ Ανιχνευτής Geiger–Müller

Αποτελεί μία από τις πρώτες συσκευές ανίχνευσης και μέτρησης της ιονίζουσας ακτινοβολίας που χρονολογείται πίσω στο 1928 από τους Geiger και Müller. Η ευρεία χρήση της όμως συνεχίζεται μέχρι και σήμερα λόγω της απλής λειτουργίας της και της σχετικά φθηνής κατασκευής της (Knoll, 1999). Λειτουργεί με υψηλό δυναμικό και ανιχνεύει ακτινοβολία τύπου άλφα, βήτα και γάμμα μέσω της μεγέθυνσης του φαινομένου του ιονισμού που δημιουργείται.

Πιο συγκεκριμένα, η συσκευή αποτελείται από έναν σωλήνα γεμισμένο με αδρανές αέριο όπως Αργό (Argon) και Νέον (Neon) σε χαμηλή πίεση, με πρόσμειξη μεθανίου σε ποσοστό 10%, που ονομάζεται Geiger – Müller και από τον οποίο πήρε το όνομά της η συσκευή. Μέσα στο σωλήνα υπάρχει ένα μεταλλικό σύρμα ανόδου που λειτουργεί ως μεταλλικός αγωγός με εφαρμοζόμενη τάση τουλάχιστον 500 βολτ και κάθε φορά που φορτισμένα σωματίδια εισέρχονται μέσα στο σωλήνα, αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρόνια των ατόμων του αερίου και τα απομακρύνει από αυτά (ιονισμός). Αυτά με τη σειρά τους, έχοντας την απαραίτητη υψηλή ενέργεια προκαλούν το ίδιο φαινόμενο με αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλών ελεύθερων ηλεκτρονίων και ταυτόχρονα ιονισμένων ατόμων. Το πεδίο μέσα στο σωλήνα ασκεί δυνάμεις αντίθετων κατευθύνσεων στα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια και στα θετικά φορτισμένα ιόντα. Οι δυνάμεις αυτές τείνουν να διαχωρίσουν τα ιόντα που έλκονται από την κάθοδο και από τα ηλεκτρόνια που έλκονται από την άνοδο και να εμποδίσουν την επανασύνδεσή τους. Συνεπώς το ιονισμένο αέριο παράγει ρεύμα, το οποίο διαβιβάζεται σε έναν μετρητή (Εικόνα 4).

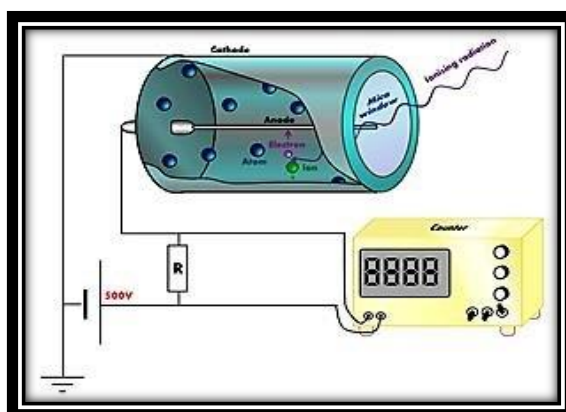
Το μεθάνιο μέσα στον ανιχνευτή λειτουργεί και ως παράγοντας σβέσης που τερματίζει τη ροή μετά από λίγα δευτερόλεπτα. Ο χρόνος απόκρισής τους είναι μεγαλύτερος από αυτόν των θαλάμων ιονισμού και φτάνουν εύκολα σε κορεσμό (τερματισμός ένδειξης) όταν βρεθούν σε πεδίο υψηλών επιπέδων ακτινοβολίας (Khan, 2017). Οι ανιχνευτές Geiger- Müller (GM)

διαθέτουν και ηχητική ειδοποίηση κατά την ανίχνευση ακτινοβολίας σε έναν χώρο (Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, 2011).

Κάθε περιστατικό εκκένωσης αερίου μετράται σε κρούσεις ανά λεπτό (cpm). Ωστόσο, οι θάλαμοι ιονισμού δεν μπορούν να ανιχνεύσουν ένα μόνο σωματίδιο εκπομπών αλλά απαιτεί υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας για ανίχνευση (Knoll, 1999). Συμπερασματικά, στους ανιχνευτές ιοντισμού αερίου, όπως είναι οι Geiger- Müller, η μέτρηση της ραδιενέργειας βασίζεται στη συλλογή ζευγών ιόντων μετά από αλληλεπίδραση ιοντίζουσας ακτινοβολίας με αέριο που βρίσκεται σε κλειστό θάλαμο.

Ο σωλήνας μπορεί να χαρακτηρίζεται από την παρουσία παραθύρου ή όχι. Οι ανιχνευτές με παράθυρο χρησιμοποιούνται για ανίχνευση άλφα και χαμηλής ενέργειας βήτα ακτινοβολία. Σε αυτούς, η ακτινοβολία εισέρχεται μέσω ενός πολύ λεπτού παραθύρου στο ένα άκρο του σωλήνα, το οποίο είναι συνήθως κατασκευασμένο από μαρμαρυγία (mica)<sup>1</sup>. Ο σωλήνας Geiger-Müller δεν μπορεί από μόνος του να αναγνωρίσει τη διαφορά μεταξύ των ακτινοβολιών.

Για το λόγο αυτό, διαφορετικά υλικά όπως π.χ το χαρτί ή ο μόλυβδος τοποθετούνται μπροστά από το παράθυρο μαρμαρυγίας για να ανακαλύψουν ποιος τύπος ακτινοβολίας είναι υπεύθυνος για την ανίχνευση. Υπάρχουν ωστόσο, και οι ανιχνευτές χωρίς παράθυρο, όπου ανάλογα με το πάχος του τοιχώματος, μπορούν να ανιχνεύσουν υψηλής ενέργειας ακτινοβολίες β μέχρι υψηλής ενέργειας ακτινοβολία γ.



**Εικόνα 4:** Μηχανισμός μέτρησης της συσκευής Geiger- Müller. Η τάση που εφαρμόζεται στο σωλήνα επιτρέπει την ανίχνευση χαμηλής ενέργειας σωματιδίων (Bermúdez-Reyes, 2014)

<sup>1</sup> Ο φυσικός μαρμαρυγίας αποτελεί φυσικό ορυκτό, το οποίο είναι μηχανικά σταθερό σε λεπτά φύλλα τάξης μικρόμετρου, τα οποία είναι σχετικά διαφανή στην ακτινοβολία ενώ είναι αδιαπέραστα από ορυκτά. Έτσι χρησιμοποιείται σαν παράθυρο στους ανιχνευτές Geiger- Müller.



Εικόνα 5: Ανιχνευτής Geiger- Müller (wikipedia, 2020)

## 2.4.2 Ανιχνευτές σπινθηρισμού

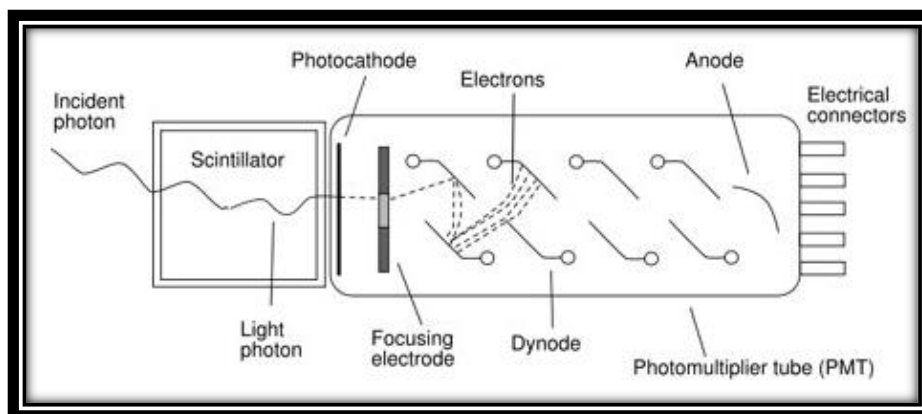
Σπινθηριστές ή φθορίζουσες ενώσεις ονομάζονται κάποια υλικά που όταν απορροφούν ενέργεια από ιοντίζουσα ακτινοβολία, εκπέμπουν με τη μορφή ασθενών λάμπσεων, ορατό φως που ονομάζεται σπινθηρισμός. Έτσι λοιπόν, οι ανιχνευτές σπινθηρισμού αλληλεπιδρούν, με φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, με την ιοντίζουσα ακτινοβολία και μετατρέπουν την ενέργεια που απορροφούν σε ορατό φως. Το ορατό φως συλλέγεται σε ειδικές διατάξεις που καλούνται φωτοπολλαπλασιαστές και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα.

Το υλικό σπινθηρισμού που απαιτείται για τους καλούς ανιχνευτές μπορεί να είναι οργανικό ή ανόργανο (πιο κοινό) και πρέπει να χαρακτηρίζεται από διαφάνεια, διαθεσιμότητα σε μεγάλο μέγεθος και μεγάλη απόδοση φωτός ανάλογα με την ενέργεια των ακτίνων γάμμα. Τα υλικά που είναι κατάλληλα για ανιχνευτές είναι σχετικά ελάχιστα. Παραδείγματα οργανικών σπινθηριστών αποτελούν το ανθρακένιο, τα πλαστικά και τα υγρά, με τα δύο τελευταία να είναι λιγότερο αποτελεσματικά από το πρώτο.

Τα πιο κοινά ανόργανα υλικά σπινθηρισμού είναι το ιωδιούχο νάτριο (NaI), ιωδιούχο καίσιο (CsI), θειούχος ψευδάργυρος (ZnS) και ιωδιούχο λίθιο (LiI). Οι πιο συνηθισμένοι ανιχνευτές σπινθηρισμού είναι στερεοί και το πιο δημοφιλές υλικό είναι συνήθως οι κρύσταλλοι ιωδιούχου νατρίου με προσμείξεις θαλλίου (NaI). Το NaI αποτελεί το κυρίαρχο υλικό για την ανίχνευση γάμμα επειδή παρέχει καλή ανάλυση ακτίνων γάμμα και είναι σχετικά οικονομικό (Reilly et al., 1991).

Διατίθενται σε μεγέθη διαμέτρου 3,8-45 cm και πάχους 1,3-13 cm ενώ εμφανίζουν πυκνότητα σε ικανοποιητικά επίπεδα ( $3,67 \text{ g/cm}^3$ ) για απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών και σε συνδυασμό με το υψηλό ατομικό βάρος του ιωδίου ( $Z=53$ ) και την παρουσία θαλλίου (περίπου 0,1-0,4 mole %) προσφέρεται για καλή παραγωγή φωτονίων (περίπου μία λάμψη ανά 30 eV ακτινοβολίας), με ελάχιστη αυτοαπορρόφηση φωτονίων (Ανδρουλακάκη, 2013).

Οι ανιχνευτές σπινθηρισμών χρησιμοποιούνται για μετρήσεις ακτινοβολίας χώρου όπου εκτός από το επίπεδο της ακτινοβολίας μπορούν παρέχουν πληροφορίες για την ενέργειά τους, κάτι που δεν ισχύει για τους ανιχνευτές αερίου (Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, 2011).



**Εικόνα 6:** Σχηματικό διάγραμμα ενός ανιχνευτή σπινθηρισμού που περιλαμβάνει ένα υλικό σπινθηρισμού συνδεδεμένο με έναν σωλήνα φωτοπολλαπλασιαστή (Stanford University, 2020).



**Εικόνα 7:** Φορητός ανιχνευτής σπινθηρισμών NaI (Εργαστήριο Ποιότητας Υδάτων και Αέρα, Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου)

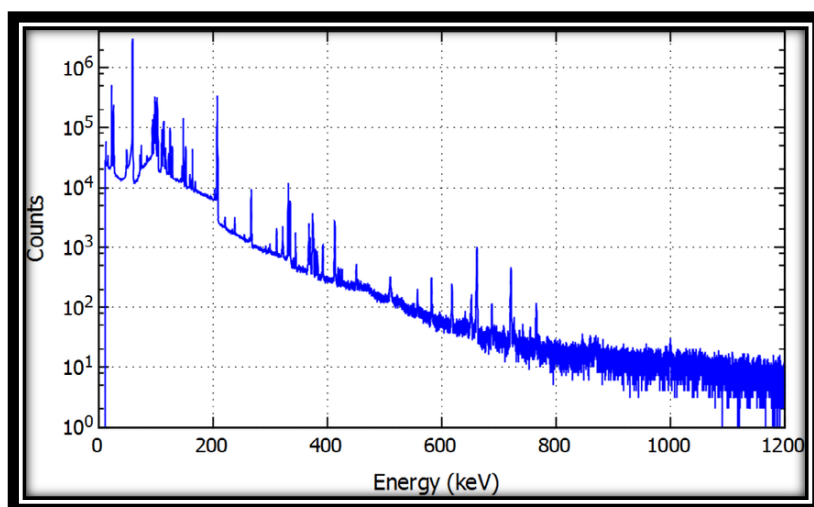
### 2.4.3 Ημιαγωγοί ανιχνευτές

Οι ημιαγωγοί επιτυγχάνουν το ίδιο αποτέλεσμα με τους ανιχνευτές σπινθηρισμού, μετατρέπουν δηλαδή την ακτινοβολία γάμμα σε ηλεκτρικούς παλμούς, αλλά με διαφορετική διαδικασία. Η αρχή λειτουργίας τους έγκειται στη διέγερση των ηλεκτρονίων σε υψηλότερες ενεργειακές καταστάσεις μέσω της ακτινοβολίας γάμμα και συνεπώς στη δημιουργία κενών θέσεων ηλεκτρονίων(οπών).

Ένα ζεύγος ηλεκτρονικών-οπών παράγεται κατά μέσο όρο για κάθε 3 eV που απορροφούνται από τον ανιχνευτή. Τα ηλεκτρόνια οδηγούνται υπό τη δύναμη ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου στην άνοδο, γεγονός που οδηγεί στην ανίχνευση της ακτινοβολίας (Knoll, 1999).

Η πιο δημοφιλής μέθοδος για τη μέτρηση της  $\gamma$ -ακτινοβολίας και αυτή που θα μας απασχολήσει σε αυτήν την εργασία είναι η  $\gamma$ -φασματοσκοπία χαμηλού υποβάθρου. Η μέθοδος της  $\gamma$ -φασματοσκοπικής ανάλυσης χρησιμοποιείται για τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό της συγκέντρωσης ραδιοϊσοτόπων σε δείγματα. Η ανίχνευση της ακτινοβολίας γάμμα βασίζεται στην αλληλεπίδρασή της με την ύλη με τους τρόπους που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 1.6.

Οι αλληλεπιδράσεις των φωτονίων με την ύλη δημιουργούν ιονισμούς που μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα, ανάλογα με το φαινόμενο αλληλεπίδρασης. Έπειτα από τη συλλογή, την καταμέτρηση και την καταγραφή αυτών των σημάτων δημιουργείται ένα ιστόγραμμα γεγονότων συναρτήσει της ενέργειας που ονομάζεται φάσμα (Ανδρουλακάκη, 2013) (Εικόνα 8).



**Εικόνα 8:** Τυπικό φάσμα ακτινοβολίας γάμμα, που ελήφθη με ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe) στον οποίο κάθε κορυφή αντιστοιχεί σε μια γραμμή εκπομπής γάμμα της πηγής (wikipedia, 2020).

Η μέτρηση γίνεται με τη βοήθεια ανιχνευτών με κρυστάλλους υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe), οι οποίοι ψύχονται σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία ( $\sim -200^{\circ}\text{C}$ ) και τοποθετούνται στο εσωτερικό θωράκισης μολύβδου, έτσι ώστε να μην επηρεάζονται από την ακτινοβολία του περιβάλλοντος (ΕΕΑΕ Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, 2020).

Όλα σχεδόν τα υλικά περιέχουν έστω και σε μικρές ποσότητες ραδιενεργά ισότοπα που εκπέμπουν  $\gamma$ -ακτινοβολία δηλαδή φωτόνια γνωστής ενέργειας (Knoll, 1999). Αυτά αλληλεπιδρούν με το γερμάνιο μέσα στον ανιχνευτή, ο οποίος με τη σειρά του εκπέμπει σήματα που αντιστοιχούν στις ενέργειες των εισερχόμενων φωτονίων.

Τα σήματα από τον κρύσταλλο του ανιχνευτή δρομολογούνται μέσω ενός ενισχυτή και κατευθύνονται σε σύστημα πολυκαναλικού αναλυτή (Multi Channel Analyzer (MCA)). Κατόπιν, οι μετρήσεις των εκπομπών καταγράφονται συναρτήσει των ενεργειών σε ένα φάσμα. Τα πακέτα λογισμικού μετατρέπουν τις πληροφορίες σε συγκεκριμένες ενεργότητες, χρησιμοποιώντας βαθμονόμηση ενέργειας και απόδοσης με χρήση πρότυπης πηγής ισοτόπων συγκεκριμένης γεωμετρίας (Zapata, 2003).

Το ενεργειακό φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είναι χαρακτηριστικό για κάθε νουκλίδιο. Από το χαρακτηριστικό φάσμα που εκπέμπει το ραδιενεργό ισότοπο δύναται να διαγνωστεί η παρουσία ακόμη και αμελητέων ποσοτήτων κάποιου στοιχείου σε ένα υλικό. Από τα φάσματα των ακτινοβολιών αυτών προσδιορίζεται ταυτόχρονα η παρουσία πλήθους

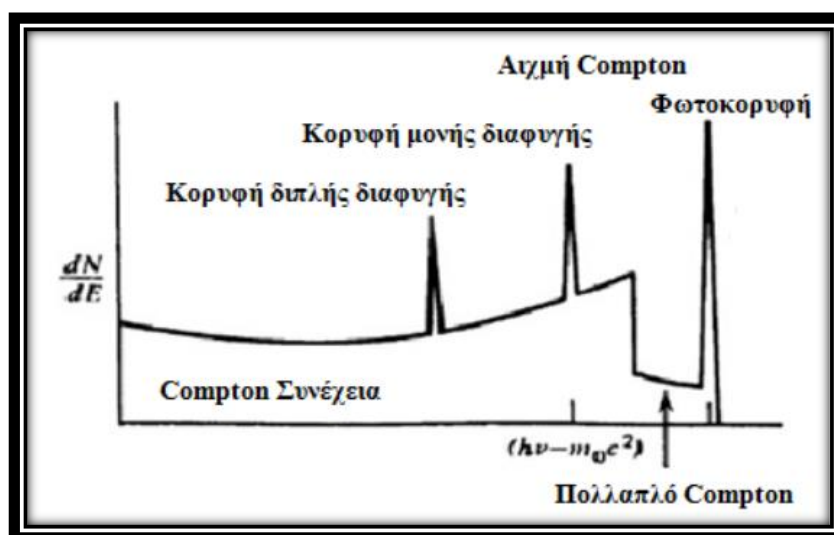


ραδιοϊσοτόπων στο υλικό, όπως Cs-134, Cs-137, Co-60, I-131, Ra-226, Am-241 (ΕΕΑΕ Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, 2020).

Ο προσδιορισμός αυτός, επιτυγχάνεται με την ανίχνευση και ταυτοποίηση των κορυφών που παρουσιάζονται στο φάσμα ενεργειών. Είναι απαραίτητη η γνώση της απόδοσης του ανιχνευτή στη συγκεκριμένη ενέργεια, της γεωμετρίας δείγματος, της πυκνότητας και σύστασης του μετρούμενου δείγματος και του ποσοστού εκπομπής της εν λόγω ακτινοβολίας- $\gamma$  προκειμένου να γίνει αναγωγή από τη μετρούμενη ποσότητα ακτινοβολίας στη συγκέντρωση του ισοτόπου στο δείγμα. Υπάρχουν πολλά στοιχεία που μπορεί κανείς να εξάγει από ένα ενεργειακό φάσμα.

Στην Εικόνα 9, παρουσιάζεται φάσμα που έχει ληφθεί με ανιχνευτή ιωδιούχου νατρίου (όπως εκείνος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για τη μέτρηση εξωτερικών δόσεων) όπου απεικονίζονται τέσσερις κορυφές καθώς και ένα συνεχές υπόστρωμα κάτω από τις κορυφές. Το πρωτεύον από αυτά είναι η φωτοκορυφή (photopeak), η οποία δημιουργείται από την πλήρη απορρόφηση μιας ακτίνας γάμμα από τον ανιχνευτή (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο). Η πιθανότητα πλήρους απορρόφησης των ακτίνων γάμμα αυξάνει με την αύξηση της πυκνότητας και του μεγέθους του ανιχνευτή. Οι υπόλοιπες πληροφορίες που εμφανίζονται στο φάσμα είναι αποτέλεσμα της διαφυγής των ακτίνων  $\gamma$  πέραν του όγκου του ανιχνευτή.

Η αιχμή Compton (Compton edge) αντιστοιχεί στη μέγιστη κινητική ενέργεια που αποκτά το ηλεκτρόνιο κατά τη σκέδαση ενώ το συνεχές υπόστρωμα είναι απόρροια της διαφυγής μιας ακτίνας γάμμα έπειτα από διαδοχικές σκεδάσεις μέσα στον ανιχνευτή. Οι άλλες δύο κορυφές που απεικονίζονται είναι αποτελέσματα της διαφυγής μιας ή και των δύο ακτίνων γάμμα (κορυφή μονής και διπλής διαφυγής αντίστοιχα) που δημιουργούνται κατά την αλληλεπίδραση (εξαΰλωση) ενός ποζιτρονίου, που παράγεται μέσω του φαινομένου της δίδυμης γένεσης, με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του υλικού του ανιχνευτή (Ανδρουλακάκη, 2013).



Εικόνα 9: Τυπικό φάσμα ανιχνευτή  $\gamma$ - ακτινοβολίας (Ανδρουλακάκη, 2013)

## 2.5 Ραδιενέργεια στο έδαφος

### 2.5.1 Στοιχεία εδάφους

Το έδαφος αποτελεί το επιφανειακό στρώμα της λιθόσφαιρας το οποίο βρίσκεται σε αλληλεπίδραση με την ατμόσφαιρα, την υδρόσφαιρα και τη βιόσφαιρα. Πρόκειται για υλικό με σύνθετες βιογεωχημικές ιδιότητες που προέρχεται από την αποσάθρωση των πετρωμάτων του στερεού φλοιού της Γης λόγω διαφόρων φυσικών, χημικών ή βιολογικών διεργασιών. Αποτελείται από ανόργανες και οργανικές ενώσεις και στοιχεία. Σε γενικές γραμμές το έδαφος διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες (ορίζοντες).

Ο ανώτατος ορίζοντας, περιλαμβάνει την επιφάνεια του εδάφους και εκτείνεται έως 30 με 60 cm βάθος. Ο τύπος του χώματος στον ανώτατο ορίζοντα είναι αυτός που θα μας απασχολήσει στην παρούσα εργασία και το οποίο διαφέρει σημαντικά από το υπόστρωμα των πετρωμάτων από το οποίο έχει προκύψει, όσον αφορά στις φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητές του. Ο δεύτερος ορίζοντας είναι ουσιαστικά το υπέδαφος και εκτείνεται έως περίπου το 1 m βάθος.

Τέλος, ο κατώτερος ορίζοντας εκτείνεται σε 1,5 m βάθος και είναι ένα στρώμα από χαλαρά και εν μέρει σαθρά βράχια που αποτελεί το μητρικό υλικό όλων των εδαφών. Εξαιρέσεις προκύπτουν όταν, λόγω υγρής ή αέριας εναπόθεσης, το χώμα συσσωρεύεται από απομακρυσμένες πηγές από το υποκείμενο πέτρωμα (M. Eisenbud, T. Gesell, 1997) (Φυτιανός & Σαμαρά-Κωνσταντίνου, 2009).

Οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους είναι:

- Σύσταση, η αναλογία των συστατικών του εδάφους.
- Υφή, η ένωση των μορίων του εδάφους.
- Πορώδες, προσδιορίζεται από τον όγκο που έχουν τα διάκενα του εδάφους.
- Υγροσκοπικότητα του εδάφους, παρουσιάζει το μέγιστο όταν όλα τα διάκενα του εδάφους είναι γεμάτα νερό.
- Ειδικό βάρος.
- Ειδική θερμότητα.

Οι χημικές ιδιότητες είναι:

- Απορροφητική ικανότητα
- Οξύτητα
- Ανταλλαγή ιόντων
- Οξειδοαναγωγή

### 2.5.2 Συμπεριφορά μακρόβιων ραδιονουκλιδίων στο έδαφος

Η σύνθεση των εδαφών παίζει σημαντικό ρόλο στον τρόπο με τον οποίο κινούνται τα ραδιονουκλίδια στο έδαφος. Η οργανική ύλη του εδάφους προκαλεί απορρόφηση και συμπλοκοποίηση ενώ από την άλλη βιολογικές διεργασίες μπορεί να αυξήσουν την ταχύτητα

κίνησής τους. Οι παράγοντες που συμβάλλουν στη συμπεριφορά των νουκλιδίων είναι πολλοί μεταξύ των οποίων οι χημικές ιδιότητες του κάθε στοιχείου, τα χαρακτηριστικά του εδάφους στο οποίο βρίσκεται κτλ (Eisenbud & Gesell, 1997).

Αναλυτικά, οι μηχανισμοί αυτοί μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, σε αυτούς που βοηθούν την μετακίνηση του ραδιονουκλιδίου και σε αυτούς που καθυστερούν την μετακίνηση (Eisenbud & Gesell, 1997) (Ανεσιάδου, 2013-2014).

### 2.5.2.1 Μηχανισμοί που προάγουν την μετακίνηση των ραδιονουκλιδίων στο έδαφος

- Μεταφορά με Διάδοση

Αφορά ευδιάλυτα ραδιονουκλίδια που λόγω των καιρικών συνθηκών, υπάρχει πιθανότητα μεταφοράς τους στα κατώτερα στρώματα του εδάφους. Για παράδειγμα η βροχή αποτελεί παράγοντα που ευνοεί αυτήν τη μεταφορά, με το μέγεθος της βροχής να είναι προφανώς ανάλογο με το μέγεθος της μεταφοράς.

- Μεταφορά με Διάχυση

Παρατηρείται μόνο σε πολύ ξηρά εδάφη καθώς γενικά χωρίς τη διάδοση του νερού τα ραδιονουκλίδια κινούνται με πολύ αργούς ρυθμούς.

- Μεταφορά με Μετακίνηση

Σωματίδια που δεν διαλύονται, κάποιες φορές δημιουργούν συσσωματώματα με το ήδη υπάρχον χώμα καθώς καθιζάνουν. Όσο το μέγεθός τους παραμένει μικρότερο των πόρων του εδάφους συνεχίζουν να μετακινούνται.

- Βιολογικοί και Ανθρωπογενείς Παράγοντες

Σημαντικό ρόλο στη μεταφορά των ραδιενεργών ισοτόπων διαδραματίζουν τα φυτά, με το ριζικό σύστημά τους. Απορροφούνται από τις ρίζες των φυτών και συνεχίζουν την πορεία τους είτε προς τα πάνω, το φύλλωμα των φυτών είτε προς τα κάτω. Άλλοι παράγοντες που ευνοούν τη μεταφορά είναι οι καλλιέργειες, που αναμιγνύουν το χώμα ή οι δραστηριότητες μικρών ζώων που ζουν μέσα στο χώμα.

- Μεταβολή της Ταχύτητας Μεταφοράς του Νερού στο Έδαφος

Η ταχύτητα μεταφοράς του νερού στο έδαφος μεταβάλλεται καθώς συνεχώς αλλάζει η δομή των πόρων στο χώμα. Μεγάλες ταχύτητες ευνοούν μεγάλη μεταφορά.

### 2.5.3 Συγκεντρώσεις Φυσικής και Τεχνητής Ραδιενέργειας στο χερσαίο περιβάλλον

Στο έδαφος εμπεριέχονται διάφορα ραδιενεργά ισότοπα προερχόμενα είτε από τον στερεό φλοιό της γης, μέσω των τριών φυσικών ραδιενεργών σειρών, είτε ως μεμονωμένα ραδιενεργά ισότοπα φυσικής ή τεχνητής προέλευσης. Όλα αυτά συνιστούν την ραδιενέργεια υποστρώματος του εδάφους (Παπαστεφάνου, 2010). Οι τρεις ραδιενεργές σειρές αφορούν τα

$^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  καθώς και τα προϊόντα των ραδιενεργών διασπάσεων τους ενώ τα μεμονωμένα ραδιενεργά ισότοπα αναφέρονται κυρίως στο  $^{40}\text{K}$ .

Από την άλλη, τα τεχνητά ραδιονουκλίδια είναι προϊόντα της πυρηνικής βιομηχανίας και είναι αποτέλεσμα της σχάσης του  $^{235}\text{U}$  ή  $^{239}\text{Pu}$  ή της ενεργοποίησης αρχικώς σταθερών νουκλιδίων μετά από βομβαρδισμό νετρονίων σε αντιδραστήρες ή κατά τη διάρκεια πυρηνικών ατυχημάτων ή συμβάντων. Αξίζει να σημειωθεί πως το ατύχημα του Chernobyl στην Ουκρανία το 1986, αύξησε σημαντικά τα αποθέματα  $^{137}\text{Cs}$  σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες (Παπαστεφάνου, 2010).

Στην Εικόνα 10, περιλαμβάνονται τυπικές τιμές των συγκεντρώσεων των φυσικών και τεχνητώς παραγομένων ραδιενεργών ισωτόπων στο χώμα που συνιστούν και το υπόστρωμα της ραδιενέργειας του περιβάλλοντος, όσον αφορά το έδαφος, μετά το ατύχημα του Chernobyl (26 Απριλίου 1986) (International Atomic Energy Agency, 1995).

Ισότοπο	$T^{1/2}$	Συγκέντρωση ( $\text{Bq kg}^{-1}$ )
$^{90}\text{Sr}$	28.78 γ	10
$^{137}\text{Cs}$	30.17 γ	30
$^{239}\text{Pu}$	$2.44 \times 10^4$ γ	0.1
$^{241}\text{Pu}$	14.7 γ	0.3
$^{241}\text{Am}$	432 γ	0.03
$^{238}\text{U}$	$4.47 \times 10^9$ γ	20
$^{234}\text{U}$	$2.44 \times 10^5$ γ	20
$^{232}\text{Th}$	$1.40 \times 10^{10}$ γ	15
$^{235}\text{U}$	$7.04 \times 10^8$ γ	1

Εικόνα 10: Συγκεντρώσεις των Ραδιενεργών Ισοτόπων στο Χώμα (IAEA, 1995)

## 2.6 Σκοπός εργασίας

Η μελέτη της φυσικής ραδιενέργειας κρίνεται απαραίτητη για την ποσοτικοποίηση του ραδιενεργού υποβάθρου μιας περιοχής, η οποία παρουσιάζει ευρεία χρήση σε περιβαλλοντικούς, επιδημιολογικούς και τεχνολογικούς τομείς. Ο προσδιορισμός των φυσικών ραδιονουκλιδίων είναι χρήσιμος καθώς τα φυσικά και τεχνητά ραδιονουκλίδια έχουν σημαντική συνεισφορά στην συνολική δόση, που λαμβάνει ο άνθρωπος από διάφορες, φυσικής ή τεχνητής προέλευσης πηγές. Επιπλέον, ανάλογα με τα επίπεδα ραδιενέργειας σε κάθε περιοχή είναι εφικτός ο σχεδιασμός για την επιβάρυνση ή όχι της περιοχής με επιπλέον τεχνητές πηγές ραδιενέργειας.

Ο σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η μελέτη της ραδιενέργειας υποβάθρου στα εδάφη της δυτικής Λέσβου, με εδαφικά δείγματα και μετρήσεις έκθεσης, η οποία δεν έχει μελετηθεί επαρκώς από τη διεθνή βιβλιογραφία. Η μελέτη θα περιλαμβάνει τόσο τις συγκεντρώσεις επιλεγμένων ραδιονουκλιδίων, όσο και εκτιμήσεις συνολικής δόσης στους κατοίκους. Σύμφωνα με τους Petalas et al. (2005), έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες σε μετρήσεις εξωτερικής δόσης (UNSCEAR, 2000). Συνολικά τρεις τέτοιες έρευνες αφορούν τον ελληνικό χώρο, με τις δυο από αυτές να αφορούν εργαστηριακές μετρήσεις γάμμα φασματοσκοπίας σε διάφορες περιοχές της Ελλάδος (Probonas & Kritidis, 1993), ενώ η τρίτη αφορά *in situ* μετρήσεις γάμμα φασματοσκοπίας που δεν συμπεριλαμβάνει ωστόσο νησιωτικές περιοχές (Anagnostakis et al., 1996). Οι Petalas et al. (2005) συμβάλλουν στην υπάρχουσα βιβλιογραφία με τη δημοσίευσή τους για το νησί της Λέσβου. Η συγκεκριμένη εργασία έρχεται να συμπληρώσει το έργο των Petalas et al. (2005) με επιπλέον σημεία δειγματοληψίας που αφορούν τη Δυτική Λέσβο, πιο ακριβείς μετρήσεις και για μεγαλύτερο όγκο εδάφους με χρήση γερμανίου και βαθμονομημένου φορητού ανιχνευτή ο οποίος έχει αυτόματη εξισορρόπηση σε αλλαγές θερμοκρασίας. Έτσι, στόχο αποτελεί η αποκάλυψη νέων στοιχείων που θα διευκρινίσουν περαιτέρω τυχόν αβεβαιότητες που μπορεί να υπήρξαν λόγω του ότι η *in situ* γάμμα φασματοσκοπία λαμβάνει υπόψιν μόνο έναν μικρό όγκο εδάφους αλλά και επηρεάζεται από το κλίμα της περιοχής.

Παράλληλα με την ποσοτικοποίηση του υποβάθρου ραδιενέργειας, θα ελεγχθεί η συμφωνία μεταξύ της απευθείας μέτρησης δόσης από τον φορητό ανιχνευτή NaI με την υπολογισθείσα δόση από τον ανιχνευτή υπερκαθαρού Ge. Αν και η μέτρηση είναι ακριβέστερη μέσω του Ge, η φορητότητα του NaI διευκολύνει πολύ τη δειγματοληψία και επιθυμούμε λοιπόν να δούμε τη συσχέτισή τους.

### 3. Μεθοδολογία

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ο τρόπος συλλογής των δειγμάτων χώματος και η ανάλογη επεξεργασία στην οποία υποβλήθηκαν για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων των φυσικών ραδιοϊσοτόπων σε αυτά. Περιγράφεται επίσης ο τρόπος μέτρησης της έκθεσης με τον φορητό ανιχνευτή. Η περιοχή δειγματοληψίας αφορά το δυτικό τμήμα της νήσου Λέσβου ενώ η επεξεργασία και η ανάλυση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ποιότητας Υδάτων και Αέρα του Τμήματος Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Αιγαίου.

#### 3.1 Γεωλογικό υπόβαθρο Λέσβου

Το νησί της Λέσβου, με έκταση 1630 km<sup>2</sup>, αποτελεί το τρίτο μεγαλύτερο νησί της Ελλάδος μετά από την Κρήτη και την Εύβοια. Τοποθετημένο στο βορειοανατολικό Αιγαίο απέναντι από τις Μικρασιατικές ακτές, απέχει από τον Πειραιά 188 ναυτικά μίλια ενώ από τη Θεσσαλονίκη 218.

Το νησί της Λέσβου, χαρακτηρίζεται από έντονη νεοτεκτονική δραστηριότητα. Το γεγονός αυτό έχει συμβάλει στη δημιουργία μεγάλων βυθισμάτων και μεταπτώσεων και έχει επηρεάσει γενικότερα τη μορφολογία του νησιού. Η βορειοδυτική πλευρά του νησιού είναι καλυμμένη κυρίως από ηφαιστειογενή πετρώματα (Θωμαΐδου, 2009).

**Το νησί της Λέσβου διακρίνεται σε τρεις διαφορετικές ενότητες βάσει του γεωλογικού υποβάθρου (Θωμαΐδου, 2009):**

##### ➤ **Αυτόχθονη σειρά**

Πρόκειται ουσιαστικά για το υπόστρωμα του νησιού χωρίς τα μεταγενέστερα προϊόντα της ηφαιστειακής δράσης. Αποτελείται από δύο επιμέρους σχηματισμούς, τους νεοπαλαιοζωικούς και τους τριαδικούς. Πρόκειται για μια συνεχή σειρά πετρωμάτων αποτελούμενη κυρίως από σχιστόλιθους και μεταψαμμίτες. Ανάμεσά τους παρεμβάλλονται και μικρές στρώσεις ανθρακικών πετρωμάτων με πάχος που συχνά ξεπερνά τα 400 m.

Στα βόρεια και δυτικά του νησιού εμφανίζονται μεταψαμμίτες, σερικιτικοί-ψαμμιτικοί σχιστόλιθοι, χαλαζιακοί σχιστόλιθοι, χαλαζιακά λατυποπαγή και τοπικά φυλλίτες που εναλλάσσονται μεταξύ τους. Η νοτιοανατολική πλευρά συντελείται από σχιστόλιθους κυρίως μοσχοβιτικούς, χαλαζιακούς και ασβεστιτικούς, με παρεμβολές μεταψαμμιτών. Τέλος, χαρακτηρίζεται από χαμηλό βαθμό μεταμόρφωσης (Θωμαΐδου, 2009).

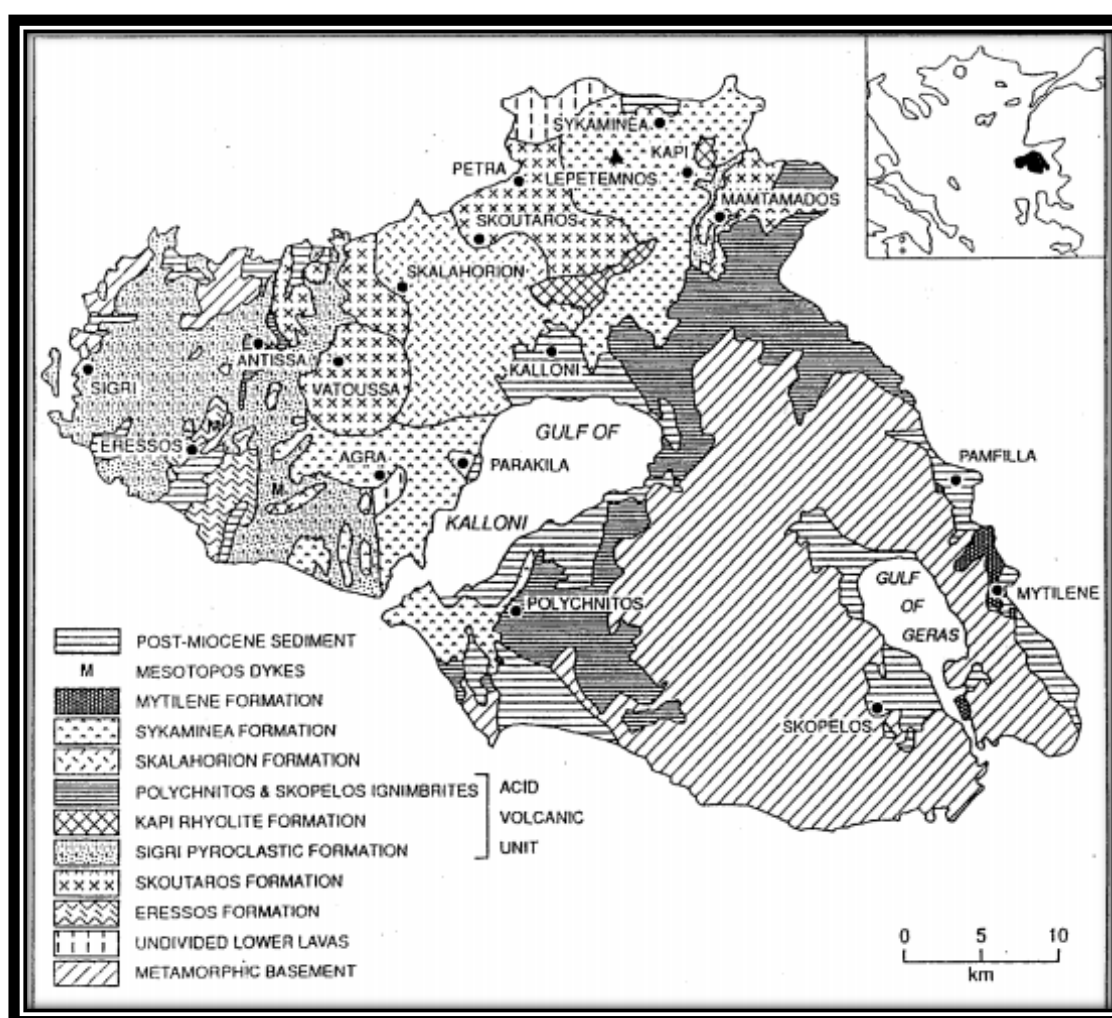
##### ➤ **Αλλόχθονη σειρά**

Η αλλόχθονη σειρά αποτελείται από τα πετρώματα που βρίσκονται πάνω στην αυτόχθονη σειρά. Μπορεί επίσης να διαχωριστεί σε δύο επιμέρους ενότητες, την ενότητα του τεκτονικού καλύμματος αποτελούμενο από ηφαιστειοϊζηματογενή πετρώματα και την ενότητα του τεκτονικού καλύμματος οφιολιθικών πετρωμάτων.

Οι αλλόχθονοι σχηματισμοί συναντώνται στη νοτιοανατολική πλευρά του νησιού με εξαίρεση ένα μικρό κομμάτι της ηφαιστειοϊζηματογενούς ενότητας να κάνει την εμφάνιση του στη βορειοδυτική πλευρά. Το κεντρικό και δυτικό τμήμα είναι σχεδόν εξολοκλήρου καλυμμένο από ηφαιστειακά πετρώματα ηλικίας Νεογενούς. Τα ηφαιστειοϊζηματογενή πετρώματα αποτελούνται κυρίως από κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, σχιστόλιθους, μεταβασίτες, κυρίως πρασινίτες και πρασινόλιθους (Θωμαΐδου, 2009).

### ➤ Μετα-Αλπικοί σχηματισμοί

Αναφέρεται στους νεότερους σχηματισμούς και αποτελούνται κυρίως από ηφαιστειακά πετρώματα ηλικίας Άνω Ολιγοκαίνου – Κάτω Μειοκαίνου, που ακολουθούνται από θαλάσσιες και λιμναίες αποθέσεις Πλειοκαίνου και Τεταρτογενούς. Συναντάται σε μεγάλες περιοχές του νησιού, κυρίως βορειοδυτικά, και ανατολικά και περιλαμβάνει βασάλτες, δακίτες, πυροκλαστικά, ιγνιμβρίτες κλπ (Θωμαΐδου, 2009).



**Εικόνα 11:** Ηφαιστειακά πετρώματα της Λέσβου. Τα όρια των γεωλογικών ενοτήτων βασίζονται στην χαρτογράφηση του Hecht (1972, 1974) και ο καθορισμός των ηφαιστειακών σχηματισμών σε στοιχεία των Pe-Piper & Piper (2002) (Θωμαΐδου, 2009).

### 3.2 Συλλογή δεδομένων

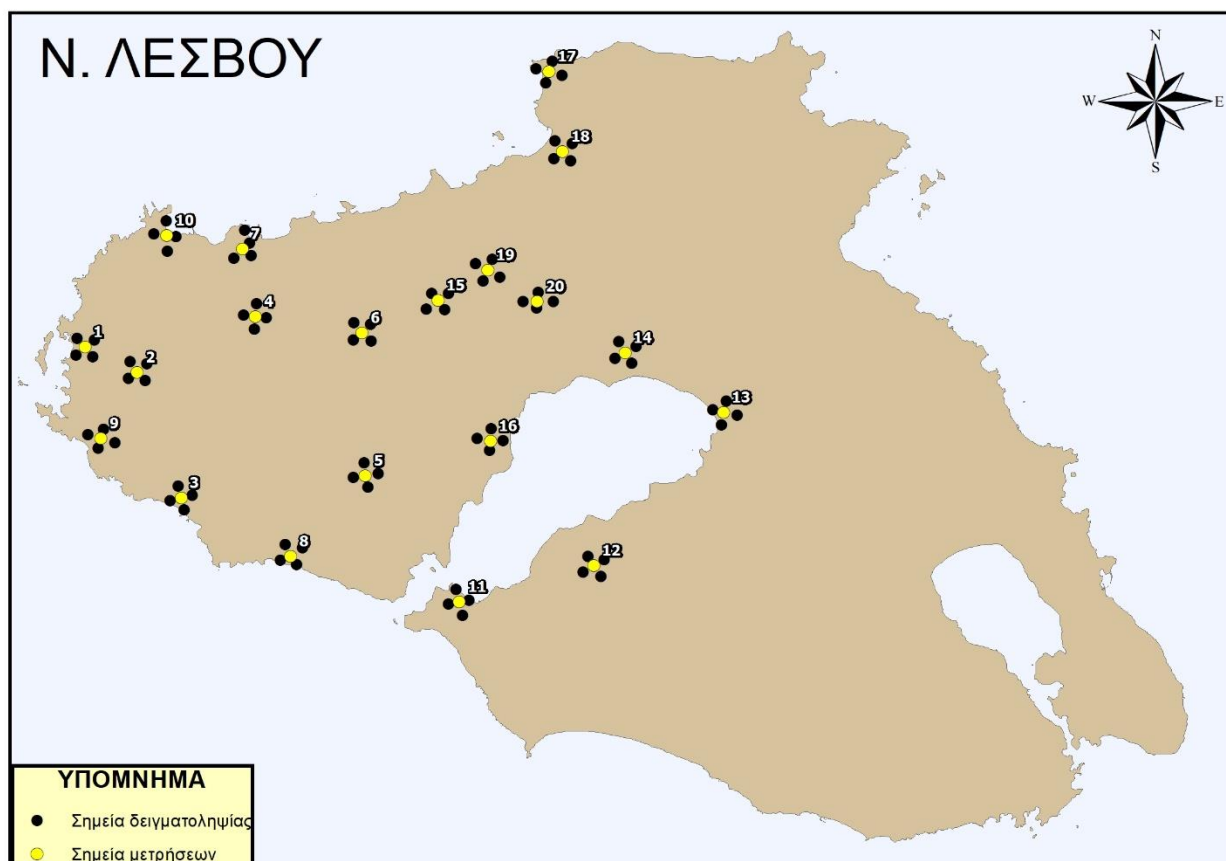
Με σκοπό ο αριθμός των δειγμάτων να επαρκεί για τις ανάγκες της μεθόδου μέτρησης και ανάλυσης αλλά και λαμβάνοντας υπόψιν το χρονικό περιθώριο διεκπεραίωσης της παρούσας πτυχιακής εργασίας, αποφασίστηκε η λήψη συνολικά δειγμάτων χώματος και μετρήσεων έκθεσης, από 20 θέσεις της Δυτικής Λέσβου. Καθώς όμως τα δείγματα που λαμβάνονται πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικά της ευρύτερης περιοχής, ελήφθησαν τέσσερα δείγματα από τις κορυφές τετραγώνου πλευράς 1 km γύρω από τη θέση, που αργότερα με την ανάμιξή τους θα αποτελέσουν το δείγμα προς μέτρηση. Σε κάθε ένα από τα είκοσι σημεία δηλαδή, αντιστοιχούν ουσιαστικά τέσσερις δειγματοληψίες και άρα συνολικά ελήφθησαν 80 δείγματα όπως αυτά απεικονίζονται στην Εικόνα 12. Μετρήσεις της δόσης γάμμα ακτινοβολίας έγιναν με τον φορητό ανιχνευτή τύπου NaI στις 80 κορυφές των τετραγώνων. Αργότερα υπολογίστηκε ο μέσος όρος της τετράδας των δόσεων, που αντιστοιχεί στην δόση κάθε μιας από τις 20 θέσεις. Η επιλογή των σημείων ήταν τυχαία με μοναδικό γνώμονα την, όσο το δυνατόν καλύτερη, χωρική κάλυψη του πεδίου δειγματοληψίας. Η διαδικασία έλαβε χώρα τον καλοκαιρινό μήνα Ιούλιο και τα δείγματα ελήφθησαν ομαδοποιημένα βάσει περιοχής σε συγκεκριμένες ημέρες.

Η διαδικασία της δειγματοληψίας αποδείχθηκε το πιο δύσκολο κομμάτι της εργασίας λόγω κυρίως της παγκόσμιας πανδημίας Covid-19 που οδήγησε στην μεγάλη καθυστέρηση του αρχικού προγραμματισμού. Επιπρόσθετα, το κακό οδικό δίκτυο της Λέσβου και οι ιδιότητες περιουσίες κατέστησαν κάποιες φορές δύσκολη ή και αδύνατη την πραγματοποίηση του αρχικού σχεδίου. Αρκετές φορές, ήταν αναπόφευκτος ο επαναπρογραμματισμός των αρχικών θέσεων των σημείων δειγματοληψίας ή τελικά η μικρή απόκλιση κάποιων σημείων από την αρχική τους θέση.

#### **Η μέθοδος που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία περιγράφεται ως εξής:**

Συλλογή, όσο είναι δυνατόν, αδιατάρακτου χώματος με ταυτόχρονη μέτρηση της έκθεσης με το φορητό ανιχνευτή τύπου NaI που διαθέτει το εργαστήριο. Όσον αφορά τα δείγματα χώματος, συλλέγονται σε κάθε σημείο σε μέγιστο βάθος 5 εκατοστών και σε βάρος που δεν απαιτείται να υπερβαίνει τα 200 g καθαρού χώματος. Για το λόγο αυτό, ήταν απαραίτητος ένα μικρός επιτόπου καθαρισμός του δείγματος ώστε να απομακρυνθούν μεγάλο μεγέθους σωματίδια όπως πέτρες και ξύλα. Οι μετρήσεις της απορροφούμενης δόσης πραγματοποιήθηκαν με τον 2 x 2 ίντσες φορητό ανιχνευτή NaI (SpiR-ID LT, Mirion industries) τοποθετημένο σε ύψος περίπου 60 cm. Η μέτρηση αυτή αντιστοιχεί στη μέση τιμή που καταγράφεται από τον ανιχνευτή σε χρονικό διάστημα πέντε λεπτών. Παράλληλα, πραγματοποιείται αυτόματη καταγραφή των ακριβών συντεταγμένων του σημείου από τον ανιχνευτή αλλά και χειρόγραφη καταγραφή του υψομέτρου μέσω της εφαρμογής Google.





**Εικόνα 12:** Στον χάρτη απεικονίζονται με μαύρο τα σημεία όπου πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία ενώ με κίτρινο αυτά που αντιστοιχούν στην μίξη και αναλύθηκαν στη γάμμα- φασματοσκοπία.




**Πίνακας 4:** Περιοχές και υψόμετρα των είκοσι (20) σημείων προς μέτρηση.

Δείγμα	Περιοχή	Συντεταγμένες		Υψόμετρο (m)
1	Σίγρι	39°13'9.56"N	25°51'54.84"E	67.5
2	Απολιθωμένο Δάσος	39°12'22.57"N	25°54'3.20"E	214.7
3	Ερεσός	39° 8'25.22"N	25°55'54.58"E	11.8
4	Άντισσα	39°14'11.30"N	25°58'51.52"E	232.2
5	Άγρα	39° 9'10.47"N	26° 3'23.95"E	336.0
6	Βατούσσα	39°13'42.53"N	26° 3'12.72"E	268.8
7	Γαββαθάς	39°16'19.62"N	25°58'17.08"E	29.8
8	Ποδαράς	39° 6'36.28"N	26° 0'23.77"E	40.2
9	Απολιθωμένο Δάσος (Νότια)	39°10'16.24"N	25°52'36.31"E	36.8
10	Λάψαρνα	39°16'43.94"N	25°55'12.22"E	48.5
11	Νυφίδα	39° 5'12.40"N	26° 7'17.48"E	19.0
12	Λισβόρι	39° 6'24.04"N	26°12'44.94"E	100.2
13	Μέσα	39°11'17.43"N	26°17'59.47"E	2.0
14	Αλυκές	39°13'9.61"N	26°13'57.05"E	3.5
15	Ανεμότια	39°14'45.43"N	26° 6'18.30"E	409.5
16	Παράκοιλα	39°10'19.15"N	26° 8'29.24"E	41.5
17	Μόλυβος	39°22'3.19"N	26°10'45.09"E	21.8
18	Πέτρα	39°19'31.34"N	26°11'19.80"E	46.8
19	Φίλια	39°15'44.01"N	26° 8'18.77"E	347.5
20	Ιερά Μονή Λειμώνος	39°14'45.28"N	26°10'20.98"E	185.5


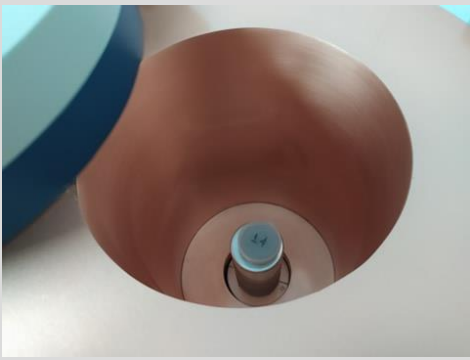
### 3.3 Επεξεργασία δειγμάτων

Κατόπιν συλλογής τους, τα δείγματα μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Ποιότητας υδάτων και Αέρα του τμήματος Περιβάλλοντος, για την περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυσή τους. Πιο συγκεκριμένα, η επεξεργασία στην οποία υποβλήθηκαν αποτελείται από τα παρακάτω στάδια.

**Πίνακας 5** Ανάλυση σταδίων επεξεργασίας δειγμάτων.

Στάδια	Επεξήγηση	Απεικονίσεις
Στάδιο 0	Συγκέντρωση των τεσσάρων επιμέρους δειγμάτων της κάθε θέσης.	
Στάδιο 1	Ίση ποσότητα χώματος από τα τέσσερα επιμέρους δείγματα που ελήφθησαν από τις κορυφές του κάθε τετραγώνου αναμιγνύονται και τοποθετούνται, καλύπτοντας την βάση ενός ταψιού.	
Στάδιο 2	Το ταψί τοποθετείται στο φούρνο του εργαστηρίου, στους 102° C για περίπου 8 ώρες με σκοπό την ξήρανση του δείγματος ώστε η συγκέντρωση που μετράμε να μην εξαρτάται από την περιεχόμενη υγρασία του δείγματος.	

<p>Στάδιο 3</p>	<p>Το ξηρό πλέον χώμα, επεξεργάζεται σε κεραμικό γουδί με σκοπό τη διάλυση των συσσωματωμάτων και την καλύτερη ομογενοποίησή του.</p>	
<p>Στάδιο 4</p>	<p>Κοσκινίζεται σε μεταλλική σίτα των 250 μm ώστε να διαχωριστεί το πλέον χονδρόκοκκο κλάσμα και τα ξένα σώματα (χόρτα, κλαδιά)</p>	
<p>Στάδιο 5</p>	<p>Ζύγιση του άδειου περιέκτη που θα τοποθετηθεί το δείγμα σε ζυγό ακριβείας εκατοστού του γραμμαρίου. Πρόκειται για μικρού μεγέθους, κυλινδρικό περιέκτη, κατασκευασμένο από πολυπροπυλένιο με ενεργό όγκο 40 ml.</p>	
<p>Στάδιο 6</p>	<p>Τοποθέτηση του χώματος στον άδειο περιέκτη μέχρι την πλήρωσή του έως τη χαραγή και αναγραφή του αριθμού δείγματος πάνω σε αυτόν. Τέλος συμπιέζεται ελάχιστα για την εξάλειψη των κενών αέρος.</p>	

<p><b>Στάδιο 7</b></p>	<p>Ζύγιση του γεμάτου περιέκτη σε ζυγό ακριβείας εκατοστού του γραμμαρίου.</p>	
<p><b>Στάδιο 8</b></p>	<p>Τοποθέτηση του περιέκτη στον ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου HPGe για 24 ώρες με σκοπό την εξαγωγή του φάσματος.</p>	

### 3.4 Ανάλυση δειγμάτων

Με το πέρας του σταδίου της επεξεργασίας, κάθε ένα από τα είκοσι δείγματα τοποθετήθηκε στον ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe) για 1 ημέρα. Όλα τα δείγματα περιέχουν ραδιενεργά ισότοπα σε διαφορετικές ποσότητες, που αλληλεπιδρούν με τον ανιχνευτή. Ο ανιχνευτής με τη σειρά του λαμβάνει σήματα που αντιστοιχούν στις ενέργειες των εισερχόμενων φωτονίων και δημιουργείται έτσι το ενεργειακό φάσμα. Για τα στοιχεία που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, εξήχθησαν από το φάσμα ενεργειών πληροφορίες που σχετίζονται με την φωτοκορυφή, δηλαδή το ολοκλήρωμα των υπό την φωτοκορυφή παλμών (Gross integral), ο αριθμός των κρούσεων στο μικρότερο ενεργειακό όριο της φωτοκορυφής (N left), ο αριθμός των κρούσεων στο μεγαλύτερο ενεργειακό όριο της φωτοκορυφής (N right) και ο αριθμός των καναλιών μεταξύ των δύο ενεργειακών ορίων.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε το ολοκλήρωμα μετά την αφαίρεση του υποστρώματος (Net integral) και όντας γνωστή η απόδοση του ανιχνευτή στη συγκεκριμένη ενέργεια του κάθε στοιχείου, η γεωμετρία του δείγματος και το ποσοστό εκπομπής της εν λόγω ακτινοβολίας-γ, γίνεται αναγωγή από τη μετρούμενη ποσότητα ακτινοβολίας στη συγκέντρωση του κάθε ισότοπου στο δείγμα σύμφωνα με τον τύπο:

$$A = \frac{\text{Net area}}{\text{Yield} * \text{Efficiency} * \text{Time}}$$

Όπου το Net area ισούται με το ολοκλήρωμα μετά την αφαίρεση του υποστρώματος, Yield η πιθανότητα διάσπασης με αυτόν τρόπο, Efficiency η απόδοση του ανιχνευτή στη συγκεκριμένη ενέργεια και Time ο χρόνος.

Έμμεσα βρίσκεται η συγκέντρωση του  $^{238}\text{U}$  (που υπολογίζεται από τη συγκέντρωση του  $^{234}\text{Th}$  στα 63,29 και 92,59 keV), η συγκέντρωση του  $^{226}\text{Ra}$  (που υπολογίζεται από τις συγκεντρώσεις των  $^{214}\text{Pb}$  στα 295,22 και 351,93 keV και του  $^{214}\text{Bi}$  στα 609,32 keV) και η συγκέντρωση του  $^{232}\text{Th}$  (υπολογίζεται από τις συγκεντρώσεις των  $^{228}\text{Ac}$  στα 338.32 και 911,20 keV, του  $^{212}\text{Pb}$  στα 238,63 keV και του  $^{208}\text{Tl}$  στα 583,19 keV). Η συγκέντρωση του  $^{137}\text{Cs}$ , υπολογίζεται απευθείας στα 661,66 keV. Τέλος, η συγκέντρωση του  $^{40}\text{K}$ , υπολογίζεται απευθείας στα 1460,82 keV.

**Πίνακας 6:** Στον πίνακα αναγράφονται τα ραδιονουκλίδια (Nuclide) που χρειάστηκαν για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων των φυσικών ραδιοϊσοτόπων, οι ενέργειες εκπομπής τους (E), η πιθανότητα διάσπασης τους (I), η απόδοση του ανιχνευτή γερμανίου στην κάθε ενέργεια ( $E_{ff}$ ), το υπόστρωμα στην κάθε ενέργεια (BKG) καθώς και το σφάλμα υποστρώματος (d BKG).

E (keV)	Nuclide	I	$E_{ff}$	BKG (cps)	d BKG (cps)
63.29	Th234	0.0370	0.0491	0.0053	0.0009
92.59	Th234	0.0425	0.0933	0.0106	0.0011
186.21	Ra226	0.0364	0.0912	0.0066	0.0012
295.22	Pb214	0.1842	0.0656	0.0010	0.0009
351.93	Pb214	0.3560	0.0572	0.0021	0.0008
609.32	Bi214	0.4549	0.0373	0.0016	0.0005
338.32	Ac228	0.1127	0.0590	0.0001	0.0009
911.20	Ac228	0.2580	0.0273	0.0001	0.0004
238.63	Pb212	0.4360	0.0773	0.0041	0.0009
583.19	Tl208	0.3594	0.0386	0.0014	0.0004
661.66	Cs137	0.8510	0.0350	0.0003	0.0004
1173.23	Co60	0.9985	0.0225	0.0001	0.0003
1332.49	Co60	0.9998	0.0205	0.0001	0.0003
1460.82	K40	0.1066	0.0191	0.0007	0.0004

Η ενεργότητα των ραδιοϊσοτόπων είναι πλέον γνωστή και έτσι γίνεται ο προσδιορισμός της δόσης σύμφωνα με τον τύπο (UNSCEAR, Sources and Effects of Ionizing Radiation, 2000):

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

όπου  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  οι αντίστοιχες ενεργότητες των στοιχείων. Οι αριθμοί  $A=0,0417$ ,  $B=0,462$  και  $\Gamma=0,604$  αποτελούν τους συντελεστές εξωτερικής δόσης (σε nGy/h per Bq/kg) για κάθε ισότοπο, που υπολογίστηκαν από διάφορες συγκεντρώσεις χερσαίων ραδιονουκλιδίων και αναφέρονται στο (UNSCEAR, 2000). Καθώς έγινε συλλογή αδιατάρακτου (κατά το δυνατόν χώματος) θεωρείται ότι το  $^{238}\text{U}$  και το  $^{226}\text{Ra}$  είναι εξισορροπημένα. Επομένως στην παραπάνω εξίσωση χρησιμοποιήθηκαν οι συγκεντρώσεις ενεργότητας του  $^{226}\text{Ra}$  αντί εκείνων του  $^{238}\text{U}$ .

Τέλος για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος:

$$\delta = \sqrt{(A * \delta 40K)^2 + (B * \delta 238U)^2 + (Γ * \delta 232 Th)^2}$$

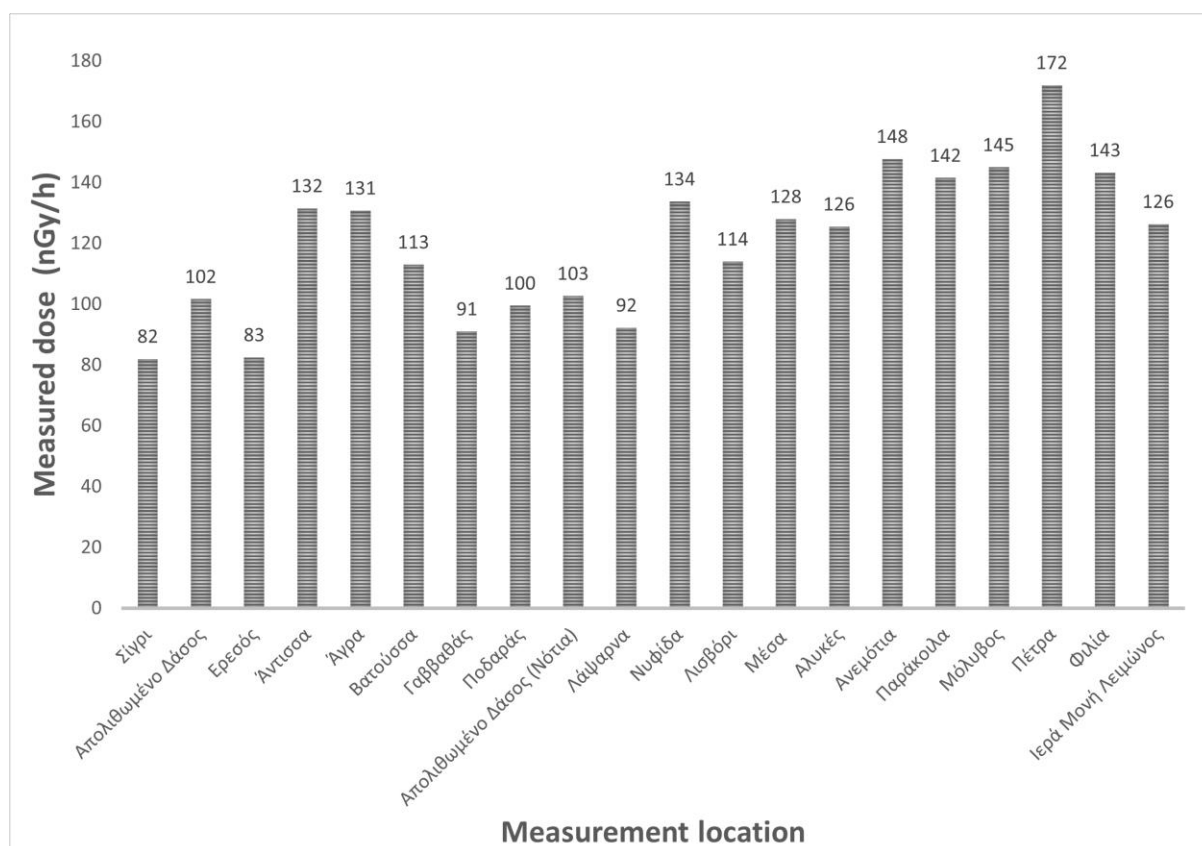
όπου A, B, Γ οι συντελεστές δόσης που αναφέρθηκαν παραπάνω και αντίστοιχα στη θέση της αβεβαιότητας του  $^{238}\text{U}$  χρησιμοποιήθηκε η αβεβαιότητα του  $^{226}\text{Ra}$  και άρα ο τελικός τύπος είναι:

$$\delta = \sqrt{(A * \delta 40K)^2 + (B * \delta 226Ra)^2 + (Γ * \delta 232Th)^2}$$

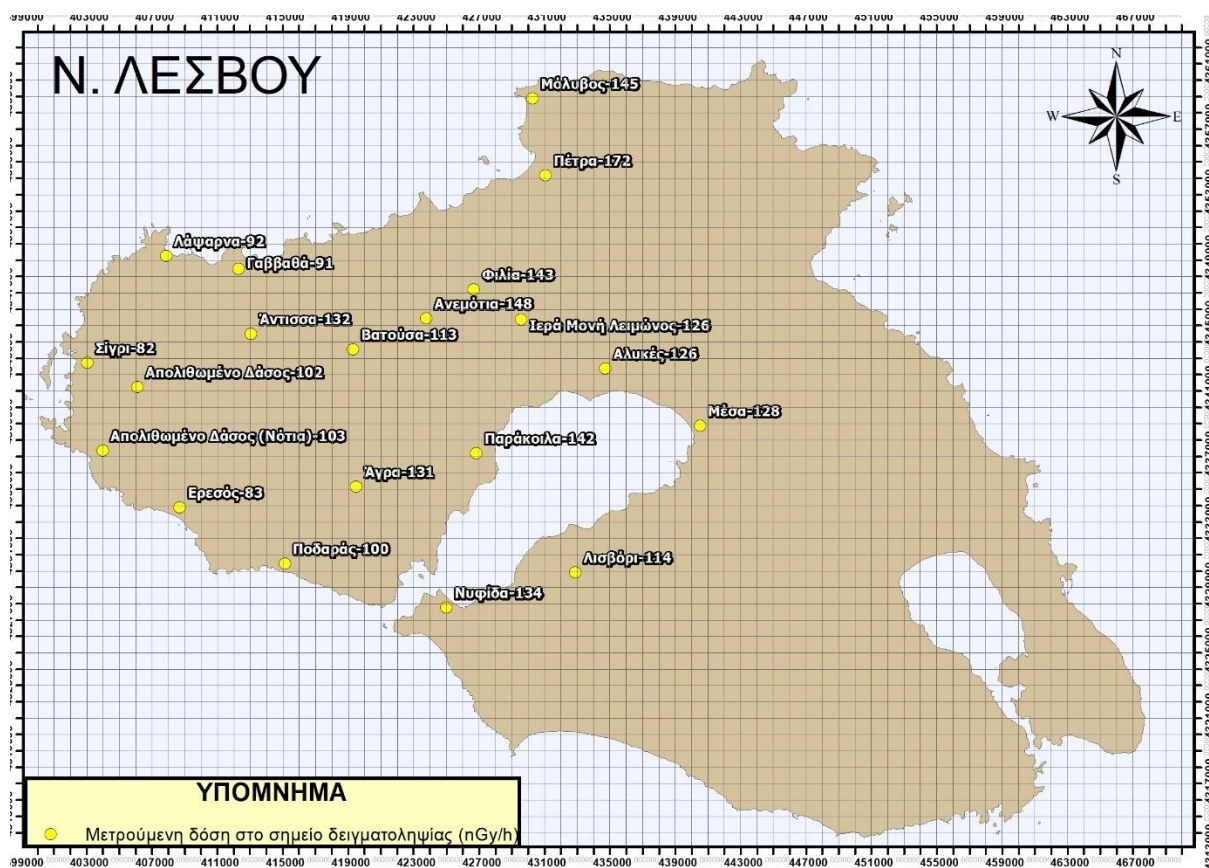
## 4. Αποτελέσματα

### 4.1 Μετρούμενη δόση με τον φορητό ανιχνευτή τύπου NaI

Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας, από τις τέσσερις δειγματοληψίες που έλαβαν χώρα σε κάθε μία από τις κορυφές των τετραγώνων, υπολογίστηκε ο μέσος όρος τους που αντιστοιχεί στη δόση ακτινοβολίας στο κέντρο του τετραγώνου. Στο παρακάτω ιστόγραμμα, απεικονίζονται οι τιμές των δόσεων για τα 20 σημεία, με την ελάχιστη να εντοπίζεται στο Σίγρι και να ισούται με 82 nGy/h και η μέγιστη στην περιοχή της Πέτρας και να είναι ίση με 172 nGy/h. Τέλος, ο μέσος όρος της μετρούμενης δόσης στις 20 θέσεις ανέρχεται στα  $120 \pm 24$  nGy/h, με το σφάλμα να αντιστοιχεί στην γεωγραφική ετερογένεια.



**Διάγραμμα 1:** Στο διάγραμμα απεικονίζεται για κάθε περιοχή, η δόση (σε nGy/h) που μετρήθηκε με τον φορητό ανιχνευτή NaI.



Εικόνα 13: Απεικόνιση των τιμών της μετρούμενης δόσης (σε nGy/h) για κάθε σημείο δειγματοληψίας.

## 4.2 Αναλύσεις εδαφικών δειγμάτων και υπολογισμός δόσης

Από τις αναλύσεις των εδαφικών δειγμάτων στον ανιχνευτή γερμανίου, έγινε προσδιορισμός της ενεργότητας των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  καθώς και του  $^{137}\text{Cs}$ , οι τιμές των οποίων εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα. Τα σφάλματα στον Πίνακα 7 προκύπτουν από τη στατιστική φύση των μετρήσεων φωτονίων  $\gamma$  ακτινοβολίας σε κάθε μετρούμενο δείγμα.



**Πίνακας 7:** Στον πίνακα αναγράφονται οι ενεργότητες (σε Bq/kg) των ραδιοϊσοτόπων  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  που υπολογίστηκαν από τα αποτελέσματα της γ-φασματοσκοπίας.

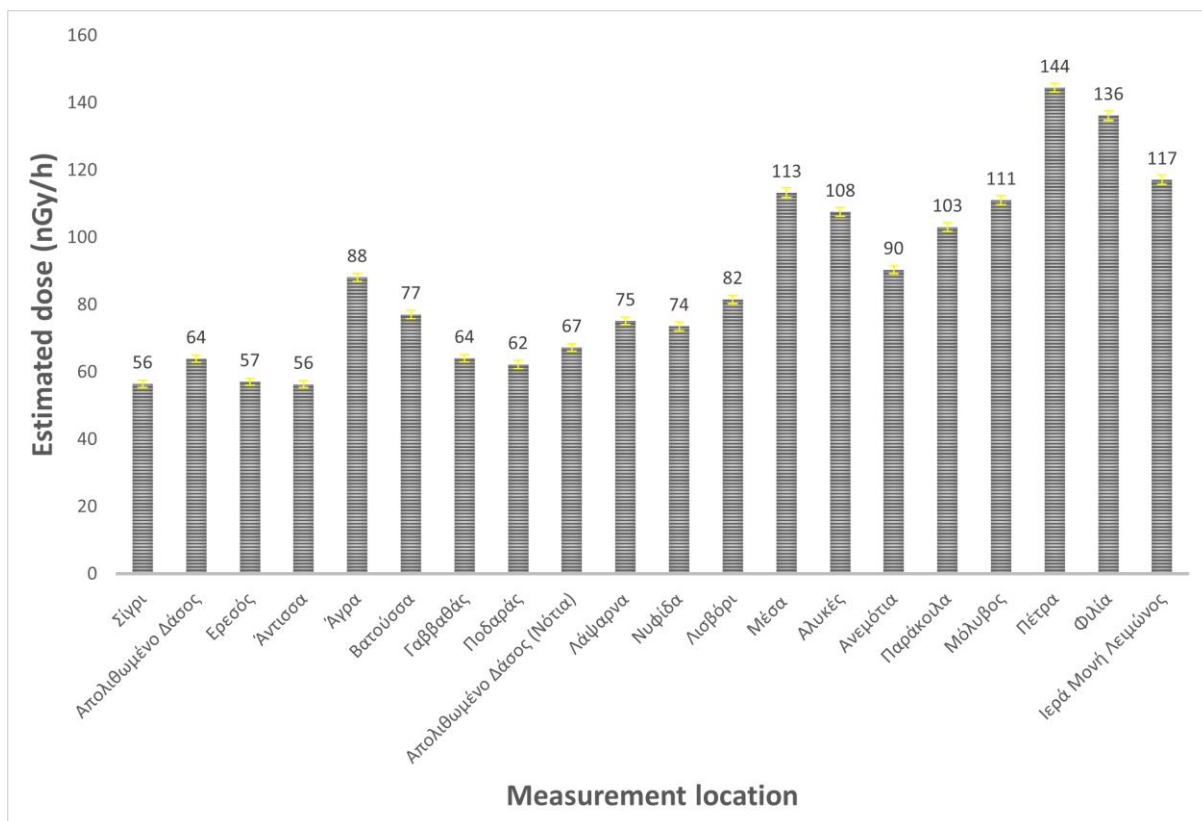
A/A	Περιοχή μέτρησης	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^{137}\text{Cs}$
1	Σίγρι	23 ± 1	48 ± 1	410 ± 10	7.2 ± 0.6
2	Απολιθωμένο Δάσος	20 ± 1	49 ± 1	600 ± 10	10.6 ± 0.5
3	Ερεσός	24 ± 1	40 ± 1	520 ± 10	5.0 ± 0.6
4	Άντισσα	22 ± 1	48 ± 1	410 ± 10	7.1 ± 0.6
5	Άγρα	38 ± 1	79 ± 1	550 ± 10	4.3 ± 0.5
6	Βατούσσα	33 ± 1	61 ± 2	610 ± 10	30.2 ± 0.9
7	Γαββαθάς	29 ± 1	52 ± 1	450 ± 10	6.7 ± 0.5
8	Ποδαράς	34 ± 1	54 ± 2	340 ± 10	4.2 ± 0.6
9	Απολιθωμένο Δάσος (Νότια)	30 ± 1	56 ± 1	470 ± 10	6.5 ± 0.6
10	Λάγαρνα	32 ± 1	54 ± 1	670 ± 10	8.3 ± 0.6
11	Νυφίδα	37 ± 1	63 ± 2	440 ± 10	8.9 ± 0.7
12	Λισβόρι	36 ± 1	67 ± 2	580 ± 10	17.6 ± 0.7
13	Μέσα	49 ± 1	101 ± 2	710 ± 10	28.9 ± 1.0
14	Αλυκές	49 ± 1	88 ± 2	770 ± 10	4.7 ± 0.6
15	Ανεμότια	43 ± 1	80 ± 2	540 ± 10	4.0 ± 0.6
16	Παράκοιλα	48 ± 1	89 ± 2	640 ± 10	10.3 ± 0.7
17	Μόλυβος	51 ± 1	92 ± 2	770 ± 10	46.0 ± 1.0
18	Πέτρα	90 ± 1	118 ± 2	750 ± 10	16.3 ± 0.7
19	Φιλία	67 ± 1	128 ± 2	660 ± 10	6.4 ± 0.8
20	Ιερά Μονή Λειμώνος	61 ± 1	102 ± 2	650 ± 10	46.1 ± 1.0

Οι ενεργότητες των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή, είναι ωστόσο σύμφωνες με τις αναμενόμενες τιμές για την Ελλάδα όπως αυτές παρουσιάζονται από την Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για τις Επιπτώσεις της Ατομικής Ακτινοβολίας όπως αυτά φαίνονται στον πίνακα 8 (UNSCEAR, Sources and Effects of Ionizing Radiation, 2000).

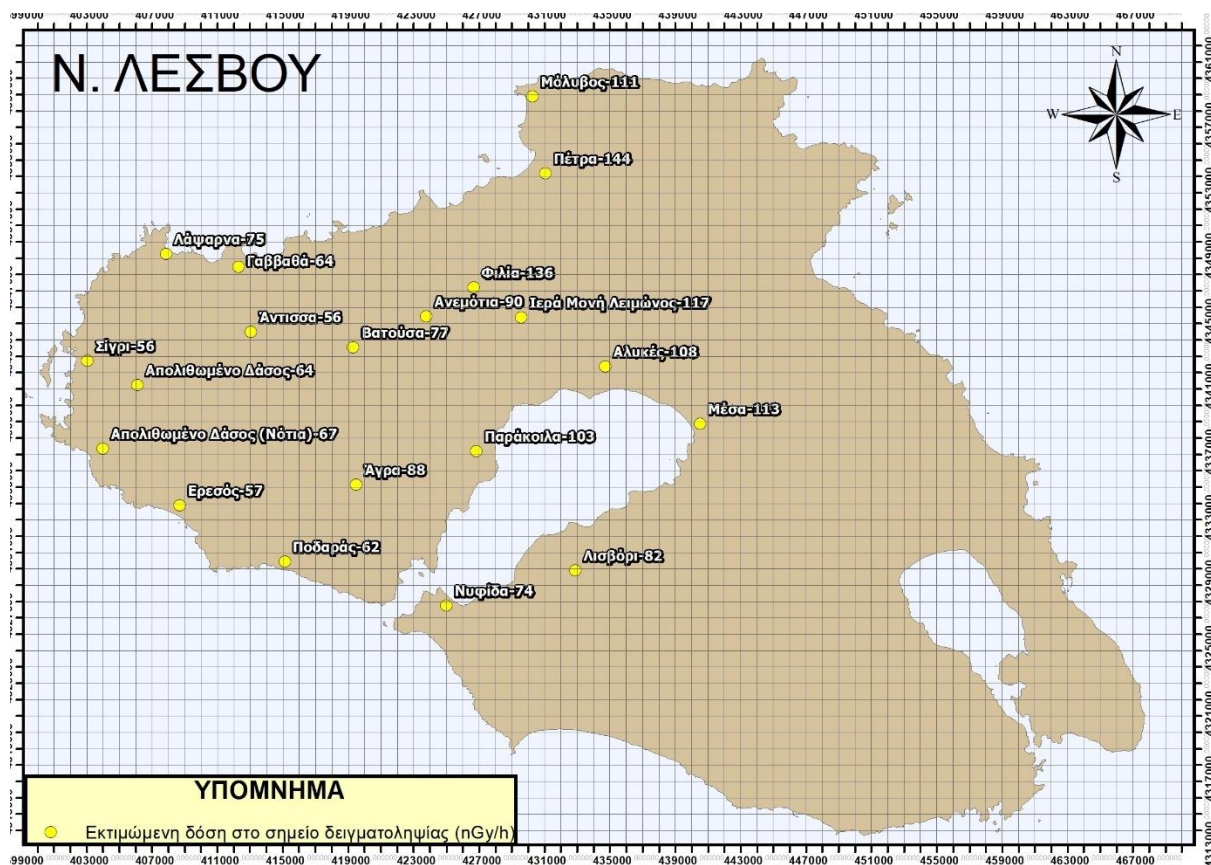
**Πίνακας 8:** Στον πίνακα αναγράφονται τα διεθνή όρια που αφορούν τις συγκεντρώσεις των ραδιενεργών ισοτόπων στο έδαφος όπως αυτά καθορίζονται από την Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για τις Επιπτώσεις της Ατομικής Ακτινοβολίας (UNSCEAR, Sources and Effects of Ionizing Radiation, 2000).

Χώρα	Συγκεντρώσεις στο έδαφος (Bq/kg)							
	$^{40}\text{K}$		$^{238}\text{U}$		$^{226}\text{Ra}$		$^{232}\text{Th}$	
Ελλάδα	Μ.Ο	Εύρος	Μ.Ο	Εύρος	Μ.Ο	Εύρος	Μ.Ο	Εύρος
	360	12-1.570	25	1-240	25	1-240	21	1-190

Μετά την εξαγωγή του φάσματος και τον προσδιορισμό των ενεργοτήτων των φυσικών ραδιοϊσοτόπων, έγινε η εκτίμηση της δόσης ακτινοβολίας από τις ενεργότητες των  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  και  $^{232}\text{Th}$  όπως περιγράφηκε στη μεθοδολογία με τα αποτελέσματα να εμφανίζονται στο Διάγραμμα 2. Σύμφωνα με το UNSCEAR (2000), κύρια αιτία της δόσης από το έδαφος αποτελούν μόνο οι δύο φυσικές σειρές και το κάλιο ενώ η συνεισφορά του καϊσίου από το έδαφος στη δόση θεωρείται αμελητέα. Η ελάχιστη εκτιμώμενη δόση φαίνεται να εντοπίζεται στις περιοχές Σίγρι και Άντισσα (56 nGy/h) ενώ η μέγιστη στην περιοχή της Πέτρας (144 nGy/h). Ο μέσος όρος των μετρήσεων ανέρχεται στα  $87 \pm 27$  nGy/h, με το σφάλμα να αντιστοιχεί στην γεωγραφική ετερογένεια.



**Διάγραμμα 2:** Στο διάγραμμα απεικονίζεται για κάθε περιοχή, η δόση (σε nGy/h) που υπολογίστηκε από τις ενεργότητες των εδαφικών δειγμάτων με σφάλμα ίσο με ±1 (κίτρινες μπάρες).



**Εικόνα 14:** Απεικόνιση των τιμών της εκτιμώμενης δόσης (σε nGy/h) για κάθε σημείο δειγματοληψίας.

### 4.3 Σύγκριση μεταξύ μετρούμενης και εκτιμώμενης δόσης

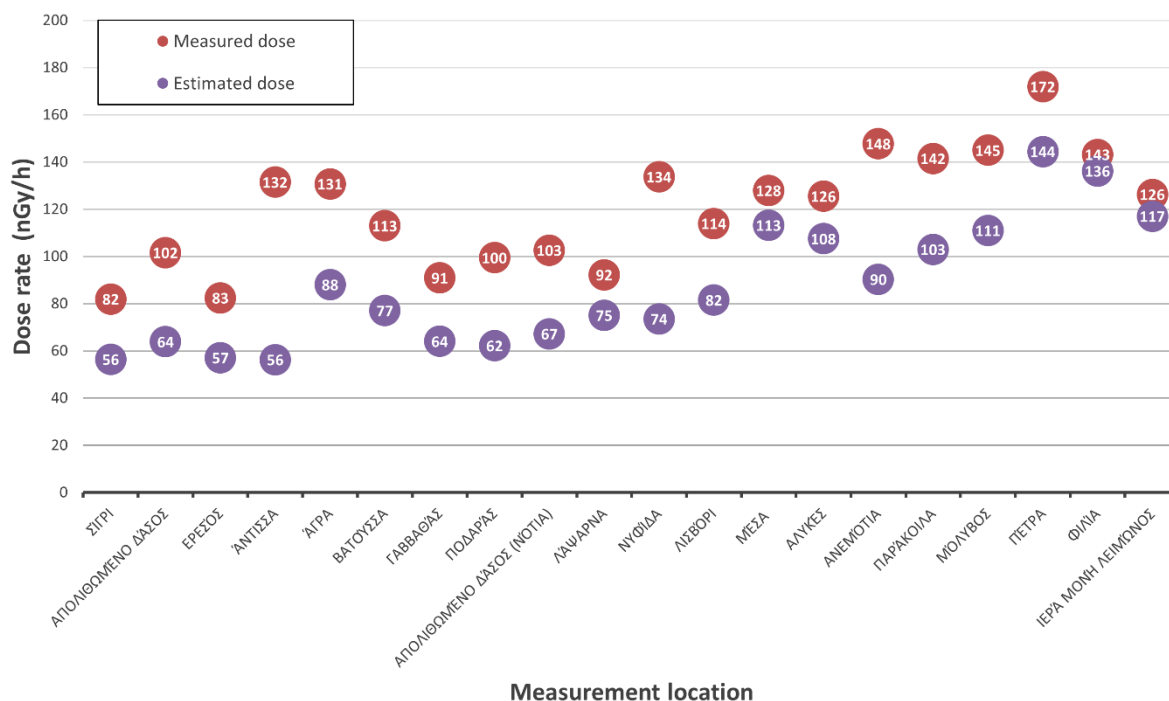
Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται οι τιμές της μετρούμενης και εκτιμώμενης δόσης καθώς και η ετήσια τιμή αυτών. Για τον υπολογισμό των ετήσιων τιμών (AED) χρησιμοποιήθηκε συντελεστής πληρότητας εξωτερικού χώρου ίσο με 0.2 (UNSCEAR, 2008), συντελεστής μετατροπής της απορροφούμενης δόσης στον αέρα στην αποτελεσματική δόση που λαμβάνουν οι ενήλικες ίσο με 0.7 Sv/Gy (UNSCEAR, 2000) και η παρακάτω εξίσωση από τους Karanukara et al. (2014):

$$\text{AED}_{\text{Outdoor}} \text{ (mSv/y)} = \text{Absorbed dose rate (nGy/h)} \times \text{T (h)} \times 10^{-6} \times 0.2 \times 0.7 \text{ Sv/Gy}$$

Όπου Absorbed dose rate η τιμή της δόσης, T (h) ο χρόνος που είναι ίσος με 8760 ώρες, 0.2 ο συντελεστής πληρότητας και 0.2 ο συντελεστής μετατροπής. Αξίζει να σημειωθεί πως αναφερόμαστε σε αγροτικές περιοχές και συνεπώς το 0.2 μπορεί να μην είναι ακριβής εκτίμηση. Όπως φαίνεται και στον πίνακα αλλά και στο Διάγραμμα 3, οι τιμές της μετρούμενης και της εκτιμώμενης δόσης εμφανίζουν απόκλιση, με τον μέσο όρο της εκτιμώμενης να ανέρχεται σε  $87 \pm 27$  nGy/h και της μετρούμενης σε  $120 \pm 24$  nGy/h. Όλες οι μετρήσεις με το φορητό ανιχνευτή δείχνουν μία αυξημένη δόση σε σχέση με τις μετρήσεις που προέρχονται από το γερμάνιο. Ο ανιχνευτής υπολογίστηκε πως υπερεκτιμά την τιμή της δόσης κατά 40% κατά μέσο όρο.

**Πίνακας 9:** Για κάθε σημείο δειγματοληψίας, φαίνονται οι τιμές που μετρήθηκαν με τον φορητό και αυτές που υπολογίστηκαν από τα εδαφικά δείγματα καθώς και ο υπολογισμός της ετήσιας δόσης σε κάθε περίπτωση. Οι μετρούμενες και εκτιμώμενες δόσεις αντιστοιχούν σε ώρα έκθεσης στην ύπαιθρο, ενώ οι ετήσιες μετρούμενες και εκτιμώμενες δόσεις αντιστοιχούν σε έκθεση στην ύπαιθρο μόνο στο 20% του χρόνου.

A/A	Περιοχή δειγματοληψίας	Μετρούμενη δόση (nGy/h)	Εκτιμώμενη δόση (nGy/h)	Ετήσια Μετρούμενη δόση (mSv/y)	Ετήσια Εκτιμώμενη δόση (mSv/y)
1	Σίγρι	82	$56 \pm 1$	0.101	$0.069 \pm 0.001$
2	Απολιθωμένο Δάσος	102	$64 \pm 1$	0.125	$0.078 \pm 0.001$
3	Ερεσός	83	$57 \pm 1$	0.101	$0.070 \pm 0.001$
4	Άντισσα	132	$56 \pm 1$	0.161	$0.069 \pm 0.001$
5	Άγρα	131	$88 \pm 1$	0.160	$0.108 \pm 0.001$
6	Βατούσσα	113	$77 \pm 1$	0.139	$0.095 \pm 0.002$
7	Γαββαθάς	91	$64 \pm 1$	0.112	$0.079 \pm 0.001$
8	Ποδαράς	100	$62 \pm 1$	0.122	$0.076 \pm 0.001$
9	Απολιθωμένο Δάσος (Νότια)	103	$67 \pm 1$	0.126	$0.082 \pm 0.001$
10	Λάψαρνα	92	$75 \pm 1$	0.113	$0.092 \pm 0.001$
11	Νυφίδα	134	$74 \pm 1$	0.164	$0.090 \pm 0.002$
12	Λισβόρι	114	$82 \pm 1$	0.140	$0.100 \pm 0.002$
13	Μέσα	128	$113 \pm 1$	0.157	$0.139 \pm 0.002$
14	Αλυκές	126	$108 \pm 1$	0.154	$0.132 \pm 0.002$
15	Ανεμότια	148	$90 \pm 1$	0.181	$0.111 \pm 0.001$
16	Παράκοιλα	142	$103 \pm 1$	0.174	$0.126 \pm 0.002$
17	Μόλυβος	145	$111 \pm 1$	0.178	$0.136 \pm 0.002$
18	Πέτρα	172	$144 \pm 1$	0.211	$0.177 \pm 0.002$
19	Φίλια	143	$136 \pm 1$	0.176	$0.167 \pm 0.002$
20	Ιερά Μονή Λειμώνος	126	$117 \pm 1$	0.155	$0.144 \pm 0.002$

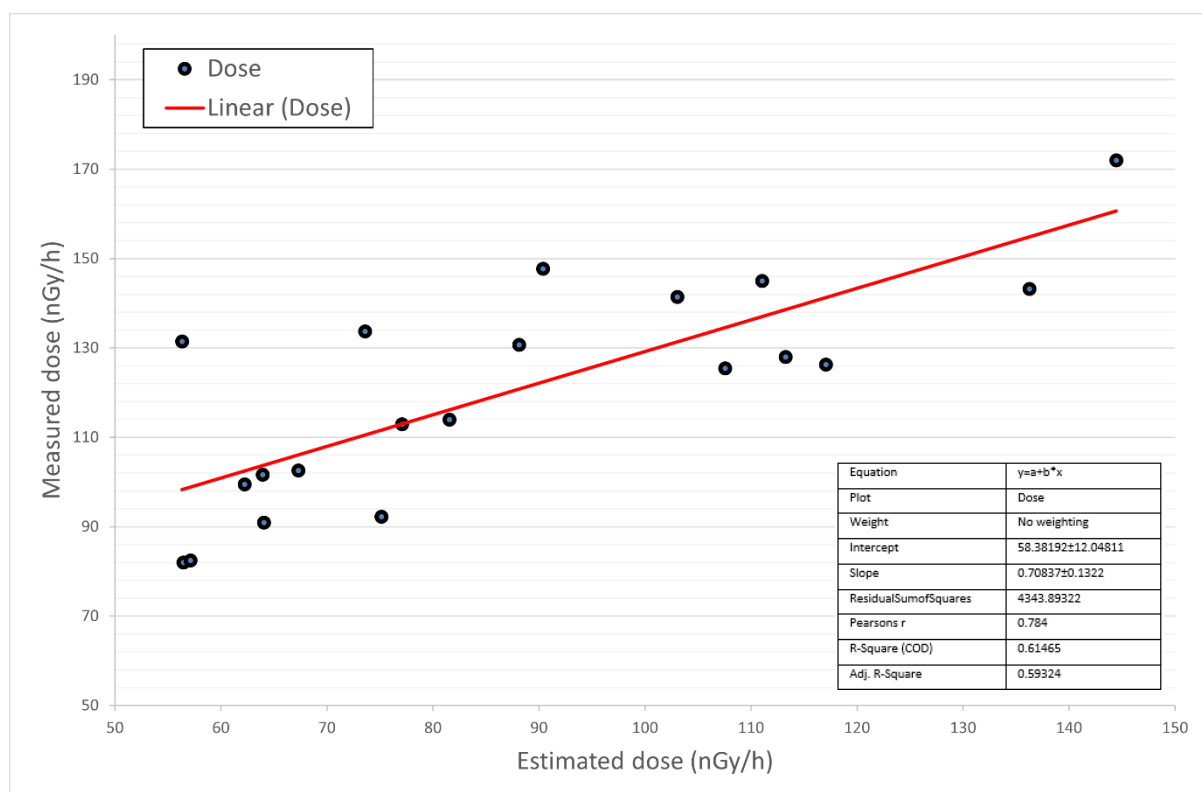


**Διάγραμμα 3:** Σύγκριση τιμών μεταξύ της δόσης που μετρήθηκε από τον ανιχνευτή NaI και αυτής που υπολογίστηκε από τη γάμμα φασματοσκοπία των εδαφικών δειγμάτων.

Οι μέσοι όροι  $87 \pm 27$  nGy/h και  $120 \pm 24$  nGy/h που αντιστοιχούν σε εκτιμώμενη και μετρούμενη δόση αντίστοιχα εμφανίζονται υψηλότεροι σε σχέση με τις αναμενόμενες τιμές για την Ελλάδα που ανέρχονται σε 39 nGy/h και 56 nGy/h για εκτιμώμενη και μετρούμενη δόση αντίστοιχα, όπως αυτές αναφέρονται στο (UNSCEAR, 2000). Η Δυτική Λέσβος δίνει περίπου υπερδιπλάσια έκθεση από την υπόλοιπη Ελλάδα ενώ εμφανίζεται υψηλότερη και από τον παγκόσμιο μέσο όρο που ανέρχεται σε 51 nGy/h. Η αναλογία μεταξύ των δύο ωστόσο είναι ίδια με αυτήν του (UNSCEAR, 2000) και ίση με 0.7.

#### 4.4 Συσχέτιση μεταξύ μετρούμενης και εκτιμώμενης δόσης

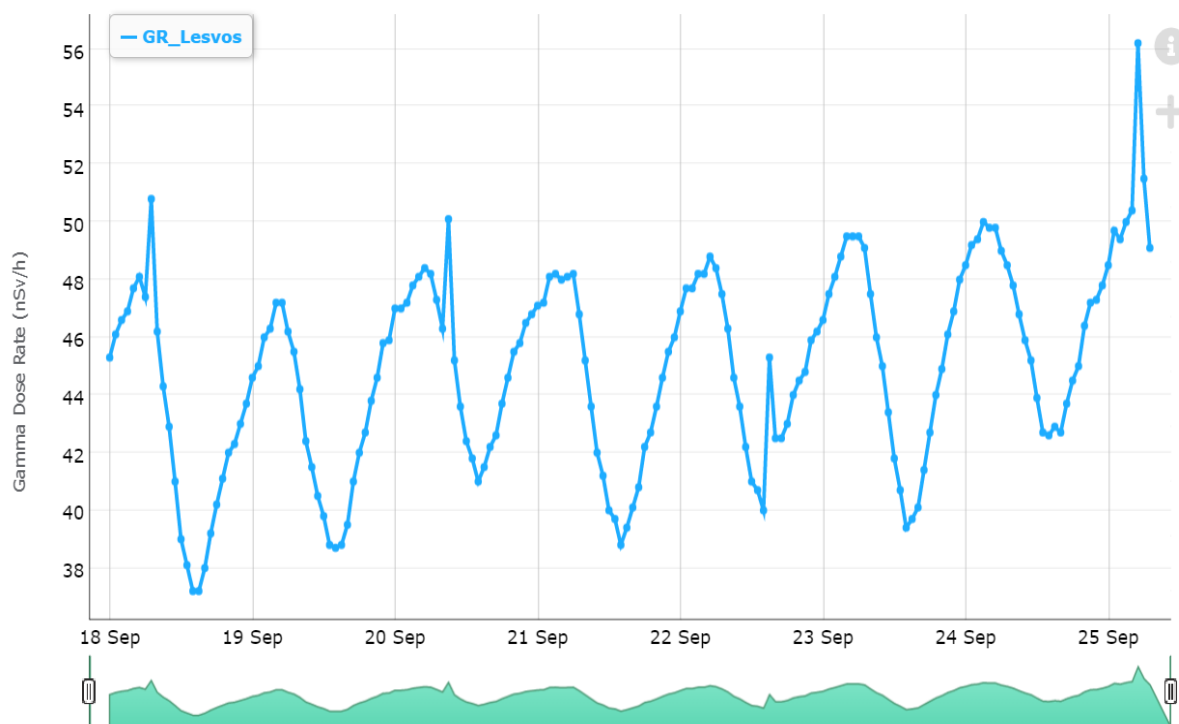
Πραγματοποιήθηκε μελέτη συσχέτισης μεταξύ του ρυθμού της μετρούμενης δόσης από τον φορητό ανιχνευτή και του ρυθμού της εκτιμώμενης δόσης από την ενεργότητα των φυσικών ραδιοϊσοτόπων, η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 15. Θετική συσχέτιση παρατηρήθηκε μεταξύ της μετρούμενης και της εκτιμώμενης δόσης με  $r=0.78$ . Η κλίση της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων είναι  $0.7 \pm 0.1$  και δείχνει ότι υπάρχει μία συστηματική απόκλιση. Αξίζει να σημειωθεί πως η εκτιμώμενη δόση προέρχεται μόνο από την ραδιενέργεια του εδάφους και δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον παράγοντα της κοσμικής ακτινοβολίας λόγω της θωράκισης του ανιχνευτή γερμανίου. Αντίθετα η μετρούμενη στο πεδίο δόση επηρεάζεται από την κοσμική ακτινοβολία, όπως και από τα επιφανειακά πετρώματα.



**Εικόνα 15:** Συσχέτιση μεταξύ εκτιμώμενης και μετρούμενης γάμμα δόσης.

Για την εύρεση της αιτίας ύπαρξης διαφοράς μεταξύ μετρούμενης και εκτιμώμενης δόσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τον φορητό ανιχνευτή NaI στην περιοχή του αεροδρομίου Μυτιλήνης, όπου είναι εγκατεστημένος ένας από τους 24 σταθμούς της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας που περιλαμβάνει ανιχνευτή μέτρησης του ρυθμού δόσης της ολικής-γ στον αέρα<sup>2</sup> (ΕΕΑΕ Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, 2020). Πραγματοποιήθηκαν συνολικά, τρεις μετρήσεις με το φορητό ανιχνευτή στις 20-09-20 στις 20:00 και στις 23:45 και στις 21/09/20 στις 20:00 με τιμές 44, 42 και 48 nSv/h αντίστοιχα. Οι ακριβείς μετρήσεις του σταθμού της ΕΕΑΕ στις ίδιες ώρες (όπως αυτές αποστέλλονται στο Joint Research Centre της Ευρωπαϊκής Ένωσης, Εικόνα 13) είναι 43, 46 και 42 nSv/h, σε γενική συμφωνία με τις μετρήσεις του φορητού ανιχνευτή. Από τις μετρήσεις αυτές προκύπτει ότι ο φορητός ανιχνευτής υπερεκτιμά τη δόση κατά περίπου 10%, ποσοστό που είναι μέσα στα όρια της εκτιμώμενης αβεβαιότητας του φορητού (10-15%).

<sup>2</sup>Πρόκειται για θαλάμους ιονισμού υψηλής πίεσης (High Pressure Ionization Chambers - HPIC) με όγκο 8.5 lt, που περιέχουν αέριο αργόν σε πίεση 25 atm. Είναι ευαίσθητοι στην ενεργειακή περιοχή από 50 keV έως 10 MeV, έχουν ακρίβεια μέτρησης ±4% για μετρούμενο ρυθμό δόσης από 10 nSv/h έως 1 mSv/h (ΕΕΑΕ Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, 2020).



**Εικόνα 16:** Η εικόνα αποτελεί στιγμιότυπο οθόνης από την ηλεκτρονική διεύθυνση του Joint Research Centre της Ευρωπαϊκής Ένωσης και απεικονίζει τις μετρήσεις του σταθμού του αεροδρομίου Μυτιλήνης για τις ημερομηνίες που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις με τον φορητό ανιχνευτή.

**Πίνακας 10:** Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

	Radionuclide concentration (Bq kg <sup>-1</sup> )			Gamma absorbed dose measured from NaI detector		Gamma absorbed dose estimated from radionuclide activity concentrations	
	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K	Absorbed dose rate (nGy h <sup>-1</sup> )	Annual effective dose (mSv y <sup>-1</sup> )	Absorbed dose rate (nGy h <sup>-1</sup> )	Annual effective dose (mSv y <sup>-1</sup> )
<b>Range</b>	20-90	40-128	341-772	82-172	0.101-0.211	56-144	0.069-0.177
<b>Mean</b>	41	73	578	120	0.147	87	0.107
<b>Median</b>	37	65	594	126	0.154	79	0.097
<b>Geometric Mean</b>	37.8	69.5	563.4	118	0.144	84	0.102
<b>SD</b>	17.4	25.4	128.4	24	0.030	27	0.033

## 5. Συζήτηση – Συμπεράσματα

Συνολικά, πραγματοποιήθηκε λήψη δειγμάτων χώματος και μετρήσεις έκθεσης, από 20 θέσεις της Δυτικής Λέσβου και στη συνέχεια έγινε ο προσδιορισμός των συγκεντρώσεων των φυσικών ραδιονουκλιδίων με χρήση γερμανίου καθώς και εκτιμήσεις της δόσης από τις ενεργότητες των στοιχείων.

Η δόση που μετρήθηκε από τον φορητό ανιχνευτή NaI κυμαίνεται από 82 έως 172 nGy/h ενώ ο μέσος όρος ανέρχεται σε  $120 \pm 24$  nGy/h. Η ελάχιστη τιμή εντοπίζεται στο Σίγρι ενώ η μέγιστη στην περιοχή της Πέτρας. Αξίζει να σημειωθεί πως στις μετρήσεις αυτές συνυπολογίζεται και η κοσμική ραδιενέργεια που θεωρείται σχεδόν παντού η ίδια, καθώς η περιοχή μελέτης δεν παρουσιάζει μεγάλες υψομετρικές διαφορές. Οι τιμές της μετρούμενης δόσης εμφανίζονται υψηλότερες σε σχέση με την αναμενόμενη τιμή για την Ελλάδα, όπου ο μέσος όρος ανέρχεται σε 56 nGy/h με εύρος 30-109 nGy/h. Επιπλέον, είναι υψηλότερος και από την παγκόσμια αναμενόμενη μέση τιμή που ισούται με 51 nGy/h. Το εύρος της δόσης είναι επίσης μέσα στα όρια που έχουν αναφέρει οι Petalas et al. (2005) και κυμαίνονται από 13 έως 280 nGy/h, προερχόμενο ωστόσο από μετρήσεις με ανιχνευτή Geiger-Müller που αφορούν ολόκληρο το νησί της Λέσβου. Σύμφωνα με τον χάρτη τους που απεικονίζει τη διαβάθμιση της ραδιενέργειας στη Λέσβο από τις μετρήσεις με τον ανιχνευτή, οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές που μετρήθηκαν στην παρούσα εργασία συμφωνούν με την διαβάθμιση και κατατάσσονται στις μεγαλύτερες και μικρότερες κλάσεις του χάρτη αντίστοιχα. Όσον αφορά την ετήσια δόση που υπολογίσαμε, παρουσιάζει εύρος από 0.101 έως 0.211 mSv/y με μέσο όρο 0.147 mSv/y που είναι αρκετά χαμηλότερος από το όριο της ενεργού δόσης για την έκθεση του κοινού, 1 mSv/y (Π.Δ 101/2018).

Τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις των εδαφικών δειγμάτων με γάμμα φασματοσκοπία οδήγησαν στον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων των φυσικών ραδιενεργών ισοτόπων  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  καθώς και του  $^{137}\text{Cs}$ . Οι τιμές συγκεντρώσεων φυσικών ισοτόπων είναι αυξημένες σε σχέση με τον μέσο όρο στην Ελλάδα όπως αναφέρεται στο UNSCEAR (2000) αλλά πάλι είναι εντός των φυσιολογικών ορίων. Όσον αφορά το  $^{137}\text{Cs}$ , οι τιμές κυμαίνονται από  $4.0 \pm 0.6$  έως  $46.1 \pm 1.0$  Bq/kg, με τις μέγιστες να εμφανίζονται σε Πέτρα και Ιερά Μονή Λειμώνος, αρκετά υψηλότερες από τις υπόλοιπες περιοχές, χωρίς όμως να εμπνέουν ανησυχία.

Όσον αφορά την εκτίμηση της δόσης ακτινοβολίας από τις ενεργότητες των  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  και  $^{232}\text{Th}$ , αυτή κυμαίνεται από 56 nGy/h στις περιοχές Σίγρι και Άντισσα έως 144 nGy/h στην περιοχή της Πέτρας. Ο μέσος όρος των μετρήσεων ανέρχεται στα  $87 \pm 27$  nGy/h και είναι υψηλότερος από το μέσο όρο της Ελλάδος που ανέρχεται στα 39 nGy/h, γεγονός ωστόσο που δεν μπορεί να θεωρηθεί επικίνδυνο. Οι τιμές βρίσκονται σε συμφωνία με την έρευνα των Petalas et al. (2005) όπου αναφέρουν εύρος εκτιμώμενης δόσης από in situ μετρήσεις φασματομετρίας από  $1.7 \pm 0.8$  έως  $154 \pm 7$  nGy/h και μέσο όρο ίσο με  $86 \pm 6$  nGy/h. Η ετήσια εκτιμώμενη δόση που προκύπτει από τις μετρήσεις μας κυμαίνεται από  $0.069 \pm 0.001$  έως  $0.177 \pm 0.002$  mSv/y και ο μέσος όρος ισούται με 0.107 mSv/y, τιμή επίσης μικρότερη από το επιτρεπτό όριο (Π.Δ 101/2018).

Οι τιμές της μετρούμενης και της εκτιμώμενης δόσης ( $87 \pm 27$  nGy/h και  $120 \pm 24$  nGy/h αντίστοιχα) εμφανίζουν απόκλιση και υπερβαίνουν τις αναμενόμενες τιμές για την Ελλάδα που ανέρχονται σε 39 nGy/h και 56 nGy/h για τις δύο περιπτώσεις υπολογισμού δόσης. Η Δυτική Λέσβος δηλαδή δίνει περίπου υπερδιπλάσια έκθεση από την υπόλοιπη Ελλάδα, γεγονός που θα μπορούσε να αποδοθεί στο γεωλογικό της υπόβαθρο. Ο λόγος 87/120 όμως είναι ίσος με 0.725 κάτι που είναι απολύτως συμβατό με την αντίστοιχη τιμή 0.7 που δίνεται από το UNSCEAR (2000) για την Ελλάδα. Όλες οι μετρήσεις με το φορητό ανιχνευτή δείχνουν μία αυξημένη δόση σε σχέση με τις μετρήσεις που προέρχονται από το γερμάνιο. Ο μέσος όρος του ποσοστού της υπερεκτίμησης αυτής είναι της τάξεως του 40%. Μια αρχική εικασία που εξηγεί την απόκλιση μεταξύ των δύο δόσεων είναι η ύπαρξη επιπλέον ακτινοβολίας που ίσως προέρχεται από τα πετρώματα των περιοχών στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις με τον φορητό ανιχνευτή. Η συνεισφορά του καισίου στην εξωτερική δόση είναι αμελητέα σε σχέση με τα φυσικά ισότοπα. Απάντηση θα μπορούσαν ίσως να δώσουν μελλοντικές μετρήσεις που θα πραγματοποιηθούν σε περιοχές όπου δεν θα υφίσταται επίδραση από πετρώματα.

Μια δεύτερη εξήγηση αφορά τον παράγοντα της κοσμικής ακτινοβολίας. Στη δόση που μετρήθηκε από τον φορητό ανιχνευτή συνυπολογίζεται και η κοσμική ακτινοβολία. Αντίθετα, η δόση που προέρχεται από την ραδιενέργεια του εδάφους, δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον παράγοντα της κοσμικής ακτινοβολίας λόγω της θωράκισης του ανιχνευτή γερμανίου. Σύμφωνα με το UNSCEAR (2000) η μέση δόση που οφείλεται στην κοσμική ακτινοβολία στο γεωγραφικό πλάτος 30 έως 40 μοιρών είναι 32 nSv/h. Η περιοχή μελέτης δεν παρουσιάζει μεγάλες υψομετρικές διαφορές και συνεπώς θεωρείται ότι η συνεισφορά της κοσμικής ακτινοβολίας είναι παντού ίδια. Αν στη μέση δόση λοιπόν που προέρχεται από το γερμάνιο προστεθεί ο παράγοντας της κοσμικής ακτινοβολίας, δηλαδή τα 32 nSv/h, η τιμή που θα προκύψει θα είναι σχεδόν ίση με την τιμή που προέρχεται από τον φορητό ανιχνευτή.

Ελπίζω τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας να συνεισφέρουν έστω και στο ελάχιστο όσον αφορά την γνώση και την κατανόηση του ραδιενεργού υποβάθρου της νήσου Λέσβου.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anagnostakis, M., Hinis, E., Simopoulos, S., & Angelopoulos, M. (1996). Natural radioactivity mapping of Greek surface soils. *Environ. Int.* 22 (Suppl. 1), S3–S8.
- Bermúdez-Reyes, B. (2014). Design Proposal to Develop a System to Monitor Temperature and Cosmic Radiation in CubeSat Life Cycles. *3er Congreso Nacional y Primer Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología Aeroespacial*. Mexico: Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Aeroespacial, A. C.
- Eisenbud, M., & Gesell, T. (1997). *Environmental Radioactivity From Natural, Industrial and Military Sources*. USA: Academic Press.
- Faul, H. (1954). *Nuclear Geology*. New York: Cornell University.
- Flanagan, S. (2020, 09 01). Ανάκτηση από ResearchGate: [https://www.researchgate.net/figure/Uranium-238-radioactive-decay-series\\_fig1\\_320504937](https://www.researchgate.net/figure/Uranium-238-radioactive-decay-series_fig1_320504937)
- International Atomic Energy Agency. (1995). *Effects of Ionizing Radiation*. Vienna.
- Karanukara, N., Yashodhara, I., Sudeep Kumara, K., Tripathi, R., Menon, S., Kadam, S., & Chougaoonkar, M. (2014, March 1). Assesment of ambient gamma dose rate around a prospective uranium mining area of South India - A comparative study of dose by direct methods and soil radioactivity measurements. *Results in Physics*, σσ. 20-27.
- Khan, N. T. (2017). Radioactivity: Detection and Measurement. *Journal of Molecular Imaging & Dynamics*, Mini Review.
- Knoll, G. (1999). *Radiation Detectibn and Measurement*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Petalas, A., Vogianis, E., Nikolopoulos, D., & Halvadakis, C. (2005). PRELIMINARY SURVEY OF OUTDOOR GAMMA DOSE RATES IN LESVOS ISLAND (GREECE). *Radiation Protection Dosimetry, Volume 113, No 3*, 336-341.
- Probonas, M., & Kritidis, P. (1993). The exposure of the Greek population to gamma radiation of terrestrial origin. *Radiat. Prot. Dosim.* 46(2), 123–126.
- Reilly, D., Ensslh, N., & Hastings Smith, J. (1991). *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials*. Washington: U.S. Government Printing Office.
- Stanford University. (2020, 09 05). Ανάκτηση από Scintillator Materials Group: <https://web.stanford.edu/group/scintillators/scintillators.html>
- UNSCEAR. (2000). *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. New York: United Nations Publication.
- UNSCEAR. (2008). *Report to the General Assembly Vol.1 Annex B*. New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
- wikipedia. (2020, 10 04). Ανάκτηση από wikipedia2: [https://en.wikipedia.org/wiki/Decay\\_chain](https://en.wikipedia.org/wiki/Decay_chain)
- (2020, 09 05). Ανάκτηση από wikipedia: [https://en.wikipedia.org/wiki/Geiger\\_counter](https://en.wikipedia.org/wiki/Geiger_counter)
- (2020, 09 01). Ανάκτηση από United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/>

- Zapata, F. (2003). Radionuclide Measurement Using HPGe Gamma Spectrometry. Στο F. Zapata, *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides* (σσ. 67-95). Netherlands: Springer Netherlands.
- Ανδρουλακάκη, Ε. (2013). ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ ΑΚΤΙΝΩΝ-γ ΓΙΑ IN-SITU ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΙΖΗΜΑ. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών.
- Ανεσιάδου, Α. (2013-2014). ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: Συγκεντρώσεις  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{235}\text{U}$  σε δείγματα χώματος από την Αλγερία. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Φυσικής.
- Αντωνόπουλος - Ντόμης, Μ. (2004). *Ραδιενέργεια σε απλά ελληνικά*. Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ε.ΚΕ.ΦΕ. "Δημόκριτος".
- Βεργανελάκης, Α., Κρητίδης, Π., Οικονόμου, Λ., Παπάζογλου, Γ., Παπανικολάου, Ε., Σιδέρης, Λ., & Σιμόπουλος, Θ. (1989). *Εμείς και η ραδιενέργεια*. Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- ΕΕΑΕ Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας. (2020, 09 06). Ανάκτηση από Μέθοδοι μετρήσεων, γ-φασματοσκοπία σε διατάξεις χαμηλού υποβάθρου: <https://eeae.gr/>
- Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, Ι. (2011). *Μαθήματα Ακτινοπροστασίας για Χειριστές Ιατρικών Μηχανημάτων Ιοντίζουσων Ακτινοβολιών*. Αθήνα: Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας.
- Θωμαΐδου, Ε. (2009). Η ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΛΕΣΒΟΥ. Θεσσαλονίκη: ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ.
- Παπαστεφάνου, Κ. (2010). *Ραδιενέργεια Περιβάλλοντος*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη.
- Φυτιανός, Κ., & Σαμαρά-Κωνσταντίνου, Κ. (2009). *Χημεία Περιβάλλοντος*. Θεσσαλονίκη: University Studio Press.
- Εφημερίδα Της Κυβερνήσεως Της Ελληνικής Δημοκρατίας, Προεδρικό Διάταγμα 101, Άρθρο 12, 2018,