



«Ραδιενέργεια σε Δομικά Υλικά»



Μυρτώ-Κλαίρη Μαζιώτη

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπων Καθηγητής: Ματσούκας Χρήστος

Μυτιλήνη, Ιούνιος 2023

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2022-2023 στο Τμήμα Ακτινοβολιών του Εργαστηρίου Ποιότητας Υδάτων και Αέρα του Τμήματος Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Ευχαριστώ θερμά για την επίβλεψη της εργασίας τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Χρήστο Ματσούκα, καθώς και για την καθοδήγηση που μου προσέφερε.

Δε θα ήταν δυνατή η πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας χωρίς τη συμβολή της Διεύθυνσης Τεχνικών Έργων της Περιφέρειας Βορείου Αιγαίου. Θέλω να ευχαριστήσω ειδικά τον κ. Ακριώτη που μου επέτρεψε την πρόσβαση στις εγκαταστάσεις των εργαστηρίων του τμήματος, καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγησή του.

Καταλυτική ήταν η συνεισφορά της επιστημονικής συνεργάτιδας του πανεπιστημίου, κας. Φιλοθέης Παππά, την οποία και ευχαριστώ θερμά για την καθοδήγηση τόσο στο θεωρητικό όσο και στο πειραματικό κομμάτι της μελέτης. Οι γνώσεις, η εμπειρία και η άριστη επικοινωνία συνέβαλαν στην ομαλή πραγματοποίηση και ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω το σύζυγό μου, Κώστα, για τη στήριξη και υπομονή του, προκειμένου να επιτύχω τους προσωπικούς μου στόχους.

Abstract

Since the Industrial Revolution, the rates of material production have increased, and so has the production of building materials. Due to their extensive use in the construction of buildings and infrastructure, it is important that conditions are met to ensure the health and well-being of their users. The main factor of interest here is the natural radioactivity they emit. In the present study, samples of construction materials originating from the island of Lesbos were taken, as well as construction materials of global origin that are used extensively in the local community of Lesbos. The activity concentrations of the radioisotopes in the series of ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{40}K were studied by the γ spectroscopy method, specifically by using a high-purity germanium (HPGe) detector. Radioactive dose rates calculated from activity concentrations ranged from 6 nGy h^{-1} to 220 nGy h^{-1} . The stone samples -of local origin- showed up to five times higher values than expected for the Greek area (39 nGy h^{-1}), and one to four times higher than the World Average (51 nGy h^{-1}). The values for the other construction materials studied were much lower, around 12 nGy h^{-1} for marbles and 25 nGy h^{-1} for cements. In both cases the prices are lower than expected for Greece. The final conclusion of this paper is that the annual dose obtained for five of the eight local stone samples is higher than the limit of 1 mSv suggested by the IAEA, and further study is recommended. For the rest of the construction materials studied in this study, the dose is much lower than the defined safety limits, which makes them suitable for the construction of buildings.

Περίληψη

Από τη Βιομηχανική Επανάσταση κι έπειτα, οι ρυθμοί παραγωγής υλικών έχουν εκτοξευθεί, το ίδιο συμβαίνει και με την παραγωγή δομικών υλικών. Λόγω της εκτενούς χρήσης τους για την κατασκευή κτηρίων και υποδομών, είναι σημαντικό να πληρούν τις προϋποθέσεις για τη διασφάλιση της υγείας και της ευημερίας των χρηστών τους. Βασικός παράγοντας είναι και η φυσική ραδιενέργεια που εκπέμπουν. Στην παρούσα μελέτη λήφθηκαν δείγματα δομικών υλικών με προέλευση τη νήσο Λέσβο, αλλά και δομικά υλικά παγκόσμιας προέλευσης, που χρησιμοποιούνται εκτενώς στην τοπική κοινωνία της Λέσβου. Μελετήθηκαν οι συγκεντρώσεις ενεργότητας των ραδιοϊσοτόπων της σειράς του ^{232}Th , το ^{226}Ra και το ^{40}K με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας γ και συγκεκριμένα με τη χρήση ανιχνευτή Υπερκαθαρού Γερμανίου (HPGe). Οι ρυθμοί ραδιενεργών δόσεων, που υπολογίστηκαν από τις συγκεντρώσεις ενεργότητας, κυμάνθηκαν από 6 nGy h^{-1} έως 220 nGy h^{-1} . Τα δείγματα πέτρας -τοπικής προέλευσης- εμφάνισαν έως και πέντε φορές υψηλότερες τιμές από τις αναμενόμενες στον Ελλαδικό χώρο (39 nGy h^{-1}), και μία έως τέσσερις φορές υψηλότερες από τον Παγκόσμιο Μέσο Όρο (51 nGy h^{-1}). Οι τιμές για τα υπόλοιπα δομικά υλικά που μελετήθηκαν ήταν αρκετά χαμηλότερες, γύρω στα 12 nGy h^{-1} για τα μάρμαρα και στα 25 nGy h^{-1} για τα τσιμέντα. Και στις δυο περιπτώσεις, οι τιμές είναι χαμηλότερες από τις αναμενόμενες για την Ελλάδα. Το τελικό συμπέρασμα της παρούσας εργασίας είναι πως η ετήσια δόση που προκύπτει σε πέντε από τα οκτώ τοπικά δείγματα πέτρας είναι υψηλότερη από το όριο του 1 mSv που προτείνει η ΙΑΕΑ και συστήνεται περαιτέρω μελέτη. Για τα υπόλοιπα δομικά υλικά, που μελετήθηκαν στην παρούσα μελέτη, η δόση είναι αρκετά χαμηλότερη των καθορισμένων ορίων ασφαλείας, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για την οικοδόμηση κτηρίων.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	i
Abstract	iii
Περίληψη	iv
Κεφάλαιο Πρώτο	8
1.1 Δομικά Υλικά	8
1.2 Φυσική ραδιενέργεια	9
1.3 Κίνητρα και στόχος της μελέτης	11
Κεφάλαιο Δεύτερο	13
2.1 Ραδιενέργεια	13
2.2 Μηχανισμοί Εκπομπής Ακτινοβολίας	17
2.2.1 Μεταστοιχείωση με εκπομπή σωματιδίων α (Εκπομπή α).....	18
2.2.2 Μεταστοιχείωση με εκπομπή σωματιδίων β (εκπομπή β ⁻)	19
2.2.3 Μεταστοιχείωση ποζιτρονίου (εκπομπή β ⁺)	20
2.2.4 Σύλληψη ηλεκτρονίου (εν συντομία EC)	20
2.2.5 Αποδιέγερση με εκπομπή ακτινοβολίας γ	21
2.2.6 Αυθόρμητη σχάση	21
2.3 Ανίχνευση Ακτινοβολίας γ.....	22
2.4 Ενεργότητα και Χρόνος Ημιζωής	25
2.5 Ραδιενεργές Δόσεις	26
2.6 Ραδιενέργεια σε Δομικά Υλικά	28
Κεφάλαιο Τρίτο	32
3.1 Επιλογή Δειγμάτων	32
3.1.1 Περιοχή μελέτης.....	32
3.1.2 Δειγματοληψία.....	35
3.2 Προετοιμασία Δειγμάτων	36
3.3 Φασματική Ανάλυση Δειγμάτων	40
3.3.1 Ανιχνευτής Κρυστάλλου Υπερκαθαρού Γερμανίου (HPGe)	40
3.3.2 Φασματική Ανάλυση	42
3.4 Μετρήσεις φασματοσκοπίας γ	43
Κεφάλαιο Τέταρτο	46
4.1 Έλεγχος Ισορροπίας	46

4.2	Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	47
4.2.1	Συγκέντρωση Ενεργότητας.....	47
4.2.2	Ρυθμός Απορροφούμενης Δόσης.....	51
4.2.3	Δείκτης Συγκέντρωσης Ενεργότητας I	54
4.3	Σύγκριση με άλλες μελέτες.....	56
4.3.1	Σύγκριση ανά δομικό υλικό.....	56
4.3.2	Σύγκριση με άλλα τοπικά δείγματα	62
Κεφάλαιο Πέμπτο		66
5.1	Ερμηνεία Αποτελεσμάτων – Συζήτηση.....	66
5.2	Μελλοντικές Ενέργειες	68
Βιβλιογραφία.....		69

Κεφάλαιο Πρώτο

Εισαγωγή

1.1 Δομικά Υλικά

Τα δομικά υλικά έχουν κρίσιμο ρόλο στη ζωή των ανθρώπων, καθώς χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κατοικιών, κτηρίων, γεφυρών, δρόμων, αεροσκαφών και πολλών άλλων κατασκευών, που αποτελούν αναγκαίο κομμάτι της υποδομής των κοινωνιών μας. Τα δομικά υλικά επηρεάζουν την ασφάλεια και την ανθεκτικότητα των κατασκευών σε διάφορες συνθήκες, όπως σε σεισμούς, άνεμους, πλημμύρες, πυρκαγιές και άλλες μορφές καταστροφών. Η επιλογή των κατάλληλων δομικών υλικών και η σωστή κατασκευή είναι καθοριστικής σημασίας για την προστασία της ανθρώπινης ζωής και την πρόληψη καταστροφών. Επιπλέον, τα δομικά υλικά επηρεάζουν την ποιότητα ζωής των ανθρώπων, καθώς επηρεάζουν τη θερμομόνωση, την ηχομόνωση και την αισθητική των κατασκευών. Η επιλογή περιβαλλοντικά βιώσιμων δομικών υλικών και η χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας για την κατασκευή κτηρίων μπορούν να έχουν θετικό αντίκτυπο στο περιβάλλον και στην υγεία των ανθρώπων. Η χρήση δομικών υλικών που είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον και έχουν μικρότερο αντίκτυπο στο κλίμα και τη βιοποικιλότητα μπορεί να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και τη ρύπανση. Επιπλέον, η χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας για τη λειτουργία των κτηρίων μπορεί να μειώσει την εξάρτηση από τις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, καθώς και να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και τη ρύπανση του αέρα. Συνολικά, η επιλογή περιβαλλοντικά βιώσιμων δομικών υλικών και η χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας μπορούν να συμβάλλουν στη βιωσιμότητα των κατασκευών και στη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον και την υγεία.

Ο κλάδος των δομικών υλικών αποτελεί ιστορικά έναν αξιόλογο τομέα της Ελληνικής οικονομίας, που επηρεάζει σημαντικό ποσοστό της παραγωγής της χώρας μας. Η κατασκευαστική βιομηχανία απασχολεί ένα μεγάλο αριθμό εργαζομένων στην Ελλάδα. Η χρήση τοπικών δομικών υλικών στην κατασκευή μπορεί να μειώσει το κόστος και την εξάρτηση από εισαγωγές, ενισχύοντας έτσι την τοπική οικονομία. Επιπλέον, η εξαγωγή δομικών υλικών στο εξωτερικό αποτελεί σημαντική πηγή εσόδων για την ελληνική οικονομία. Επιπλέον, ο τομέας των δομικών υλικών αποτελείται από τη βιομηχανία και τις εταιρείες παραγωγής δομικών υλικών, από κατασκευαστικές εταιρείες, αλλά και από τους τελικούς χρήστες/καταναλωτές. Τα τελευταία δύο χρόνια, ο τομέας έχει παρουσιάσει ραγδαία ανάπτυξη, αλλά

και μεγάλες αυξήσεις στις τιμές των πρώτων υλών. Ο κλάδος χαρακτηρίζεται από ισχυρή αναπτυξιακή προοπτική και τεράστιες εξαγωγικές δυνατότητες.

Στην Ελλάδα παράγονται διάφορα δομικά υλικά από διαφορετικές περιοχές της χώρας. Κάποια από αυτά τα υλικά περιλαμβάνουν:

1. Το τσιμέντο: Παράγεται σε διάφορες εγκαταστάσεις στην Ελλάδα και χρησιμοποιείται ευρέως για την κατασκευή δομικών κατασκευών.
2. Την τσιμεντοκονία: Παράγεται από πολλές εταιρείες σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας και χρησιμοποιείται ως δομικό υλικό για την κατασκευή σκυροδέματος.
3. Τις πέτρες: Στην Ελλάδα υπάρχουν πολλοί φυσικοί λίθοι και από αυτούς μπορούν να παραχθούν δομικά υλικά, όπως η πέτρα του Βούρκου και η πέτρα της Σύρου.
4. Το αλουμίνιο: Στην Ελλάδα υπάρχουν πολλές εταιρείες που παράγουν αλουμίνιο και χρησιμοποιείται σε δομικές κατασκευές ως μέρος του μεταλλικού σκυροδέματος.
5. Το ξύλο: Στην Ελλάδα υπάρχουν πολλά δάση και χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή ξυλόσπιτων, παραδοσιακών κατοικιών και σύγχρονων κατασκευών.
6. Το μάρμαρο: Η Ελλάδα φημίζεται για τα ποιοτικά μάρμαρά της και διαθέτει πάνω από είκοσι ποικιλίες μαρμάρου. Πιο γνωστά είναι το χοντρό μάρμαρο της Πάρου (θεωρείται από τα καλύτερα παγκοσμίως για γλυπτική) έως τις πολύ λευκές ποικιλίες της Βόρειας Ελλάδας, που φημίζονται για την ποιότητά τους και τη μεγάλη απόδοση τους σε ανάκλαση της θερμότητας (γι' αυτό και προτιμάται στη Μέση Ανατολή). Σύμφωνα με την εταιρεία Enterprise Greece, τα τελευταία χρόνια οι ελληνικές εξαγωγές μαρμάρου διπλασιάστηκαν (Enterprise Greece, 2022).

1.2 Φυσική ραδιενέργεια

Η φυσική ραδιενέργεια προέρχεται από την ορυκτολογία της Γης και την κοσμική ακτινοβολία. Η φυσική ραδιενέργεια που λαμβάνει ο άνθρωπος προέρχεται από τρεις πηγές, την κοσμική ακτινοβολία, τα ραδιενεργά κοιτάσματα της Γης (περιβάλλοντος) και την εσωτερική ραδιενέργεια του ανθρώπου (European Atlas of Natural Radiation, 2019). Η παρούσα μελέτη ασχολείται με τη ραδιενέργεια του περιβάλλοντος, μιας και τα δομικά υλικά προέρχονται από τα κοιτάσματα της Γης. Οι κύριες πηγές φυσικής ραδιενέργειας περιβάλλοντος, σύμφωνα με τον European Atlas of Natural Radiation (2019), είναι οι εξής:

1. Η ραδιενεργός σειρά του Ουρανίου (^{238}U) και τα προϊόντα της: Ράδιο (^{226}Ra), το φυσικό αέριο Ραδόνιο (^{222}Rn), κ.ά.
2. Η ραδιενεργός σειρά του Θορίου (^{232}Th) και τα προϊόντα της: Ράδιο (^{226}Ra) το αέριο Ραδόνιο (^{220}Rn), ο Μόλυβδος (^{212}Pb), κ.ά.
3. Το ισότοπο του Καλίου (^{40}K)

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ορισμένες από αυτές τις πηγές, όπως το Ραδόνιο, μπορεί να είναι επικίνδυνες για την υγεία.

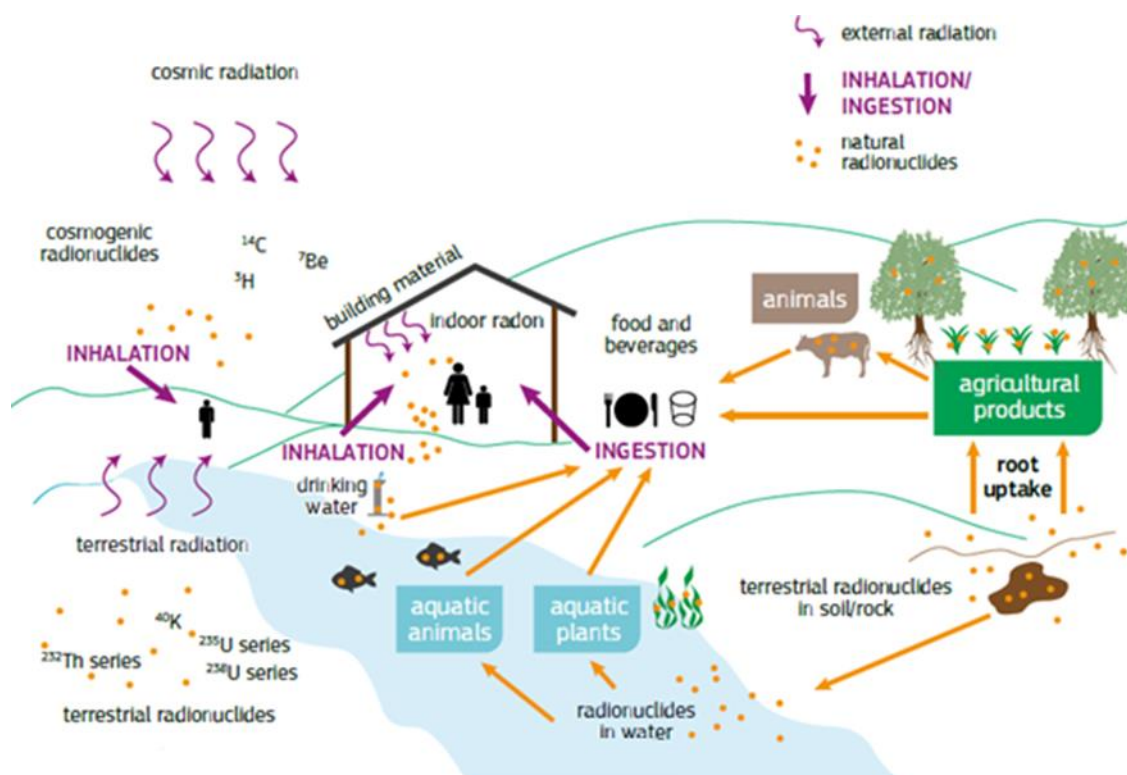
Η κοσμική ακτινοβολία, μία από τις τρεις βασικές κατηγορίες φυσικής ραδιενέργειας, πριν εισέλθει στην ατμόσφαιρα της Γης, αποτελείται από 90% πρωτόνια, 9% σωματίδια άλφα και 1% από βαρύτερους πυρήνες. Λόγω της σύγκρουσής τους με τα άτομα οξυγόνου και αζώτου που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα, στο φλοιό της Γης καταλήγουν σωματίδια και ακτινοβολία γ. Λόγω του μαγνητικού πεδίου της γης, οι περιοχές γύρω από τους πόλους δέχονται την τετραπλάσια ακτινοβολία απ' ό,τι οι περιοχές που βρίσκονται κοντά στον Ισημερινό.

Η επόμενη βασική κατηγορία φυσικής ραδιενέργειας είναι αυτή του γήινου περιβάλλοντος. Ο πλανήτης εκπέμπει ραδιενέργεια λόγω των κοιτασμάτων που υπάρχουν στο υπέδαφός του, με αποτέλεσμα συνεχώς να παράγονται νέα ραδιοϊσότοπα, τα οποία προκύπτουν από διαδοχικές διασπάσεις ραδιοϊσοτόπων. Λόγω φυσικών διεργασιών, όπως οι ηφαιστειακές, η διάβρωση των πετρωμάτων, οι σεισμικές δονήσεις, κ.ά., που συνεχώς επιτελούνται στον πλανήτη μας, τα ραδιενεργά ισότοπα μετακινούνται από τη λιθόσφαιρα στη βιόσφαιρα. Έπειτα, χάρη στις μετεωρολογικές και υδρολογικές διεργασίες, τα στοιχεία κινούνται στη βιόσφαιρα, ενώ συγχρόνως αφομοιώνονται από τους οργανισμούς του πλανήτη. Κάποια από τα ραδιενεργά στοιχεία που διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα, συνήθως επιστρέφουν στο φλοιό της Γης μέσω των κατακρημνισμάτων. Λόγω των παραπάνω, τα ραδιοϊσότοπα βρίσκονται σε ισορροπία στην επιφάνεια της Γης. Ο κύκλος της φυσικής ραδιενέργειας απεικονίζεται στην εικόνα 1. Οι δύο σημαντικότερες ραδιενεργές σειρές είναι του ^{238}U και του ^{232}Th και τις οποίες θα αναλύσουμε στο κεφάλαιο 2.1. Η φυσική ραδιενέργεια που εκπέμπεται είναι διαφορετική ανάλογα με την περιοχή μελέτης και εξαρτάται κυρίως από τη γεωμορφολογία της περιοχής. Για παράδειγμα, στη Βραζιλία, οι δόσεις ραδιενέργειας, που οφείλονται σε φυσική ραδιενέργεια, κυμαίνονται μεταξύ 10-250 mSv, ενώ στην Ινδική επαρχία, οι δόσεις σπάνια ξεπερνούν τα 15-30 mSv το χρόνο (Βεργανελάκης et al., 1987).

Τέλος, η εσωτερική ραδιενέργεια, η οποία στην ουσία είναι το αποτέλεσμα του συνδυασμού της κοσμικής και περιβαλλοντικής ραδιενέργειας. Ο άνθρωπος, ως μέλος του συστήματος της βιόσφαιρας

του πλανήτη, βρίσκεται και ο ίδιος σε ισορροπία στον κύκλο των ραδιοϊσοτόπων. Τα ραδιοϊσότοπα εισέρχονται στους οργανισμούς κυρίως μέσω της αναπνοής και της σίτισης. Η βλάβη που μπορεί να προκαλέσουν, εξαρτάται από το είδος του ραδιοϊσοτόπου και από τη δόση του, καθώς και από το όργανο το οποίο μπορεί να πληγεί. Τα συνηθέστερα φυσικά ραδιοϊσότοπα που εντοπίζονται στον άνθρωπο, είναι το ^{40}K , τα ισότοπα του ραδονίου και ο ραδιενεργός άνθρακας ^{14}C (Βεργανελάκης et al., 1987), ενώ τα τρόφιμα τα οποία είναι τα πιο επιβαρυμένα σε ραδιοϊσότοπα (^{210}Pb , ^{210}Po , ^{234}U , σειρά ^{238}U , ^{230}Th και σειρά ^{232}Th) είναι τα ψάρια, οι τάρανδοι και τα μανιτάρια.

Εκτιμάται πως ο άνθρωπος εκτίθεται κατά 85% σε φυσική ραδιενέργεια και κατά 15% σε τεχνητές πηγές (Kilic et al., 2007).



Εικόνα 1: Ροή της φυσικής ραδιενέργειας στη Βιόσφαιρα (European Atlas of Natural Radiation, 2019)

1.3 Κίνητρα και στόχος της μελέτης

Τα τελευταία χρόνια έχει μελετηθεί εκτενώς και σε παγκόσμιο επίπεδο η συνεισφορά της φυσικής ραδιενέργειας που υπάρχει στα οικοδομικά υλικά στην ετήσια δόση, καθώς και η επίδραση που μπορεί να έχει αυτή στους πολίτες. Λόγω της δομής της κοινωνίας μας, οι άνθρωποι περνάνε πολύ μεγάλο μέρος της ζωής τους εντός των κτηρίων για την εργασία και τη διαβίωσή τους. Αυτό καθιστά απαραίτητο τα κτήρια να ακολουθούν βασικές προδιαγραφές και να είναι ασφαλή για τη σωματική και

την ψυχική υγεία των ανθρώπων. Κάθε είδος δομικού υλικού έχει τη δική του θέση σε ένα κτήριο. Για παράδειγμα οι πέτρες, τα τούβλα και το σκυρόδεμα χρησιμοποιούνται κατά κόρον για τη δόμηση του σκελετού του κτηρίου ή για τη διακόσμηση των εξωτερικών χώρων (εξωτερικοί τοίχοι, πλακόστρωτα σε αυλές, κ.ά.), ενώ τα μάρμαρα και οι γρανίτες χρησιμοποιούνται κυρίως για επιφάνειες της κουζίνας, των μπάνιων ή ως πλακάκια στους εσωτερικούς χώρους. Συνυπολογίζοντας πως οι εσωτερικοί χώροι αερίζονται λιγότερο από τους εξωτερικούς, στους οποίους υπάρχει ελεύθερη και συνεχής ροή του αέρα, καθίσταται αναγκαίο να μελετηθούν δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στους εσωτερικούς χώρους. Στον Ελλαδικό χώρο, ωστόσο, τα περισσότερα παραδοσιακά σπίτια έχουν τουλάχιστον σε ένα δωμάτιο (αν όχι σε όλα) κάποιον εμφανή πέτρινο τοίχο για να δώσει τη χαρακτηριστική νότα της Ελληνικής πέτρινης παραδοσιακής οικίας. Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκαν τοπικά δομικά υλικά, αλλά και εισαγόμενα δομικά υλικά, που χρησιμοποιούνται πολύ στην τοπική κοινωνία. Στόχος της μελέτης είναι να προσδιοριστούν οι τιμές εκπεμπόμενης φυσικής ραδιενέργειας και να υπολογιστεί η συνολική δόση, να γίνει σύγκριση αυτών των τιμών για τα τοπικά δομικά υλικά με αντίστοιχα δομικά υλικά άλλων περιοχών με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία και τέλος, να συζητηθεί κατά πόσο η επιλογή των δομικών υλικών που θα χρησιμοποιηθούν, μπορούν να επηρεάσουν την υγεία των ανθρώπων που θα αξιοποιούν το κτήριο.

Υπάρχει πλήθος εργασιών στην παγκόσμια βιβλιογραφία που έχουν μελετήσει την εκπεμπόμενη ραδιενέργεια σε δομικά υλικά τις τελευταίες δεκαετίες (Kumar et al., 2003; Ravisankar et al., 2012; Turhan et al., 202; Stoulos et al., 2003; Yong Lee et al., 2019; κ.α.), γι' αυτό και έγινε προσπάθεια τα περισσότερα δείγματα να προέρχονται από το νησί της Λέσβου, ώστε να γίνει σύγκριση μεταξύ των τοπικών δομικών υλικών και αυτών που χρησιμοποιούνται σε άλλες περιοχές του πλανήτη.

Κεφάλαιο Δεύτερο

Θεωρητικό Μέρος

2.1 Ραδιενέργεια

Το φαινόμενο της ραδιενέργειας ανακαλύφθηκε το 1896 από τον Antoine Henri Bequerel, ο οποίος παρατήρησε ότι οι φωτογραφικές πλάκες εμφανίζουν φωτεινές κηλίδες όταν εκτίθενται σε ορυκτά του ουρανίου. Εντατική έρευνα από τη Marie Sklodowska-Curie, τον Pierre Curie, τον Ernest Rutherford και πολλούς άλλους επιστήμονες κατά τις επόμενες δυο δεκαετίες, αποκάλυψε ότι οι εκπεμπόμενες ακτινοβολίες αποτελούνται από θετικά φορτισμένα ή ουδέτερα σωματίδια (οι ακτινοβολίες αυτές απέκτησαν τις ονομασίες α , β και γ πριν εξακριβωθεί οριστικά η φύση τους) (Young, 1994). Πιο συγκεκριμένα, η ραδιενέργεια είναι το φαινόμενο κατά το οποίο οι πυρήνες των ατόμων απελευθερώνουν ενέργεια σε μορφή ακτινοβολίας στο περιβάλλον τους. Αυτή η ακτινοβολία μπορεί να είναι σε μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ή σωματιδίων, όπως τα σωματίδια άλφα, βήτα και ακτινοβολία γ . Η ραδιενέργεια είναι ένα φυσικό φαινόμενο που συμβαίνει σε ορισμένα μόνο ισότοπα χημικών στοιχείων, όπως από τις σειρές του Ουράνιου (^{238}U) και του Θορίου (^{232}Th). Εκπομπή ραδιενέργειας μπορεί να προκληθεί και από ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η πυρηνική ενέργεια και οι ιατρικές ακτινοθεραπείες. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τη ραδιενέργεια, μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων και του περιβάλλοντος, εάν ανέρχεται σε υψηλά επίπεδα. Επιπροσθέτως, η ακτινοβολία χρησιμοποιείται σε ιατρικές διαδικασίες, όπως η ακτινογραφία και η ακτινοθεραπεία, καθώς και σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως η παραγωγή ενέργειας από την πυρηνική διάσπαση.

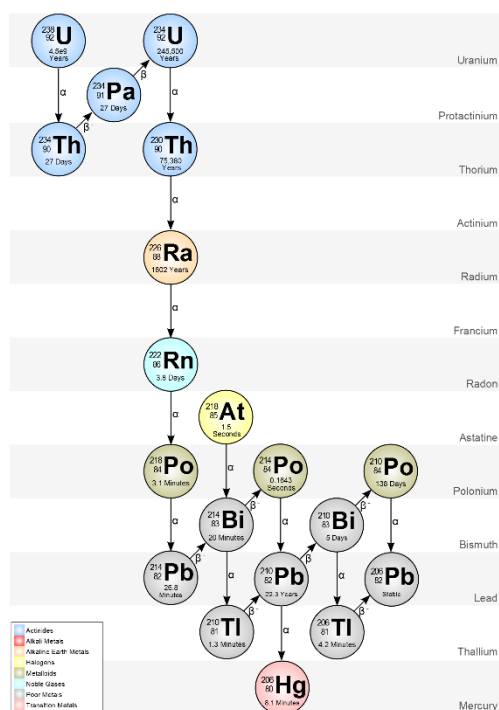
Οι πυρήνες των ατόμων, αποτελούνται από τα υποατομικά σωματίδια, πρωτόνια και νετρόνια. Τα πρωτόνια είναι θετικά φορτισμένα σωματίδια με μάζα περίπου 1.836 φορές τη μάζα του ηλεκτρονίου. Τα νετρόνια είναι ουδέτερα φορτισμένα σωματίδια, με μάζα σχεδόν ίση με το πρωτόνιο. Τα δυο αυτά νουκλεόνια αποτελούν τους βασικούς δομικούς λίθους των πυρήνων των ατόμων και συγκροτούν την κύρια μάζα του ατόμου. Κάποια άτομα χαρακτηρίζονται ως ασταθή, επειδή οι πυρήνες τους υφίστανται αυθόρμητη διάσπαση, χωρίς διέγερση από το περιβάλλον τους. Οι ασταθείς πυρήνες έχουν την τάση να μετατρέπονται αυθόρμητα σε κάποιο άλλο είδος πυρήνα, ο οποίος συνήθως είναι πιο σταθερός από τον αρχικό (μητρικό πυρήνα), ταυτόχρονα εκπέμποντας σωματίδια ή /και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μέσω της αποδιέγερσης του πυρήνα σε χαμηλότερες ενεργειακές στάθμες (ραδιενεργός ακτινοβολία). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ραδιενεργός διάσπαση, όπου από ένα μητρικό πυρήνα

προκύπτει αυθόρμητα ένας άλλος θυγατρικός πυρήνας με ταυτόχρονη εκπομπή ακτινοβολίας. Τα σωματίδια και η ακτινοβολία που εκλύονται κατά τη διάσπαση, είναι τα ονομαζόμενα σωματίδια άλφα, σωματίδια βήτα και η ακτινοβολία γ.

Πολλές φορές παρατηρείται πως και ο θυγατρικός πυρήνας είναι ραδιενεργός, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια σειρά διασπάσεων/αποδιεγέρσεων των πυρήνων, μέχρι να επιτευχθεί μια σταθερή κατάσταση στον πυρήνα. Αυτές οι σειρές ονομάζονται ραδιενεργές και αυτές που συναντάμε πιο συχνά στο περιβάλλον, είναι του Θορίου (^{232}Th), του Ακτινίου (^{235}U) και του Ουρανίου (^{238}U).

Το **Ουράνιο** είναι ένα χημικό στοιχείο στη σειρά των ακτινιδών με ατομικό αριθμό 92. Τα δύο κύρια ισότοπά του είναι αυτά του ^{238}U σε μεγαλύτερη αφθονία και το ^{235}U σε μικρότερη. Τα δύο ισότοπα διασπώνται μέσω των σειρών του Ουρανίου και του Ακτινίου, που καταλήγουν σε σταθερά ισότοπα Μόλυβδου, ^{206}Pb και ^{207}Pb αντίστοιχα. Η αναλογία $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ έχει αυξηθεί με την πάροδο του χρόνου λόγω της ταχύτερης διάσπασης του ^{235}U (European Atlas of Natural Radiation, 2019).

Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται η ραδιενεργός σειρά διάσπασης/αποδιέγερσης του ^{238}U . Συγκεκριμένα, ο μητρικός πυρήνας του ισότοπου Ουρανίου ^{238}U καταλήγει στο σταθερό θυγατρικό πυρήνα του ισότοπου του Μολύβδου ^{206}Pb , μέσω συνολικά 14 διασπάσεων, 8 εκπομπών α και 6 εκπομπών β⁻.

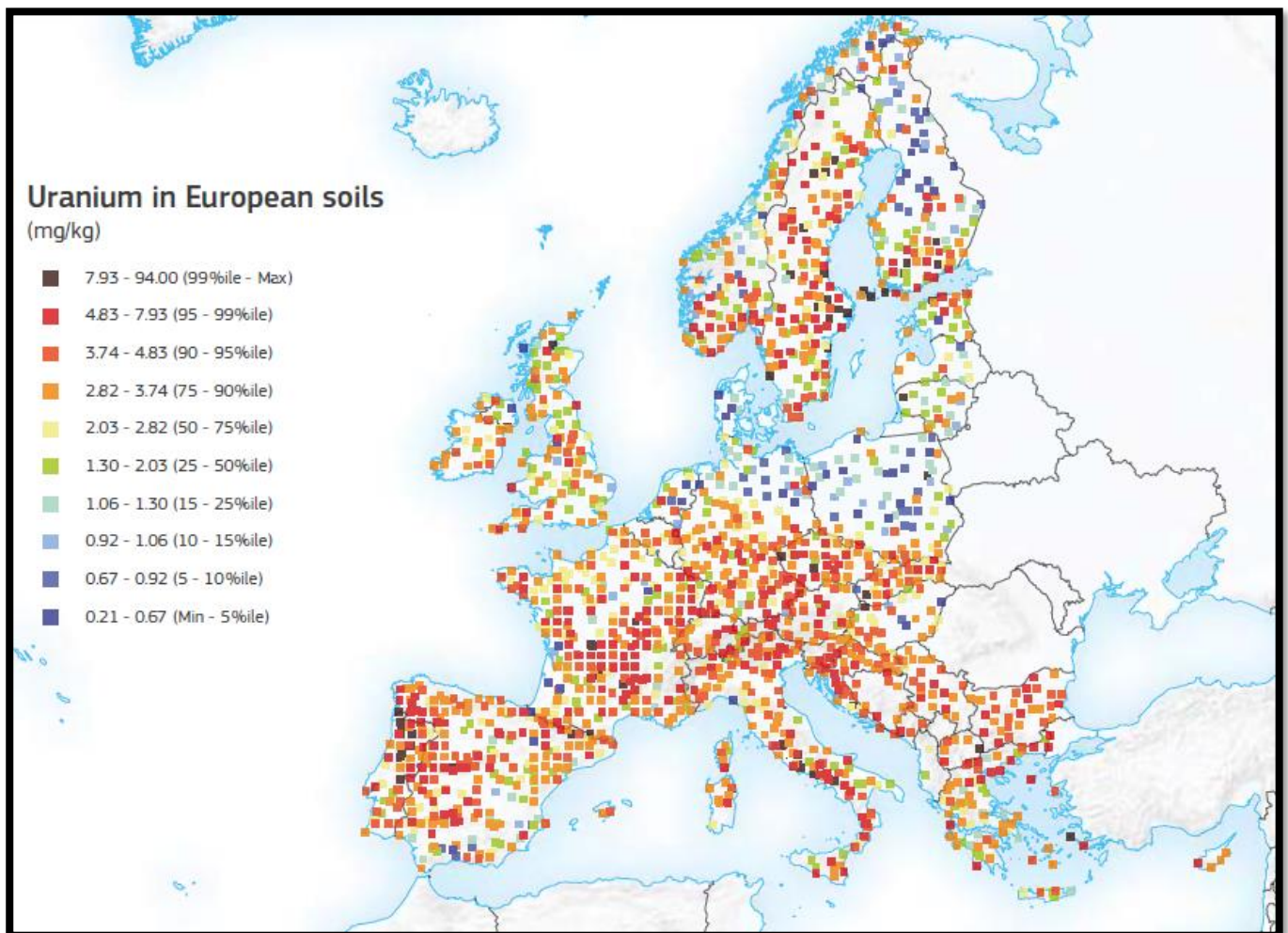


Εικόνα 2: Σειρά διάσπασης ^{238}U (Nuclear Forensic Search Project, n.d.)

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (European Atlas of Natural Radiation, 2019), το Ουράνιο αναμένεται να ανιχνευτεί σε υψηλές συγκεντρώσεις στους παρακάτω τύπους πετρωμάτων:

- Ηφαιστειακά και πολυτονικά φελσικά πετρώματα
- Μεταμορφωσιγενή η/και ιζηματογενή πετρώματα
- Κοιτάσματα Ουρανίου, φλέβες η άλλες τεκτονικές/υδροθερμικές δομές
- Ιζηματογενή πετρώματα πλούσια σε οργανικές ουσίες

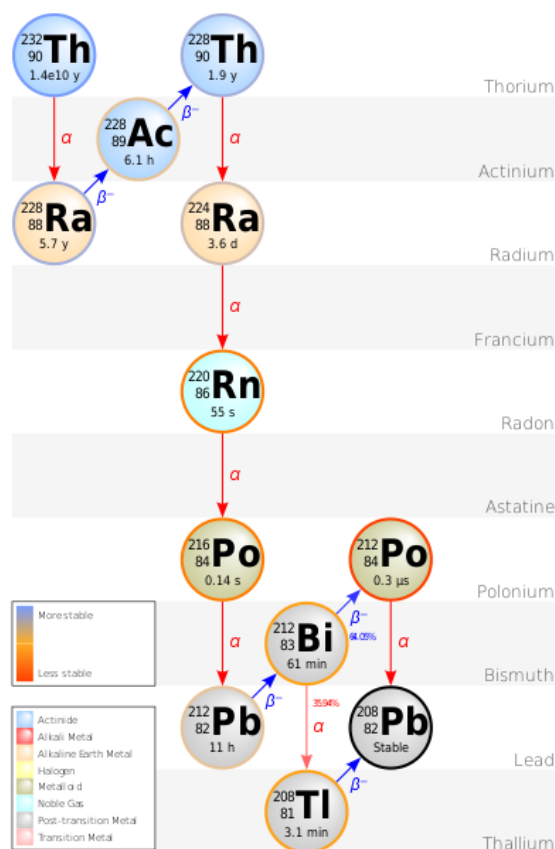
Στην εικόνα 3 απεικονίζονται οι συγκεντρώσεις Ουρανίου στο έδαφος της Ευρώπης.



Εικόνα 3: Χάρτης με διαβάθμιση της ολικής συγκέντρωσης Ουρανίου στο έδαφος, στην Ευρώπη (European Atlas of Natural Radiation, 2019).

Το **Θόριο** είναι ένα χημικό στοιχείο στη σειρά των ακτινιδών με ατομικό αριθμό 90. Έχει ένα κύριο φυσικό ραδιοϊσότοπο το ^{232}Th , το οποίο έχει τον μεγαλύτερο χρόνο ημιζωής ($1,4 \cdot 10^{10}$ έτη) όλων των γνωστών ραδιενεργών ισοτόπων του Θορίου, και γι' αυτό αποτελεί το 99,98% της συνολικής μάζας Th.

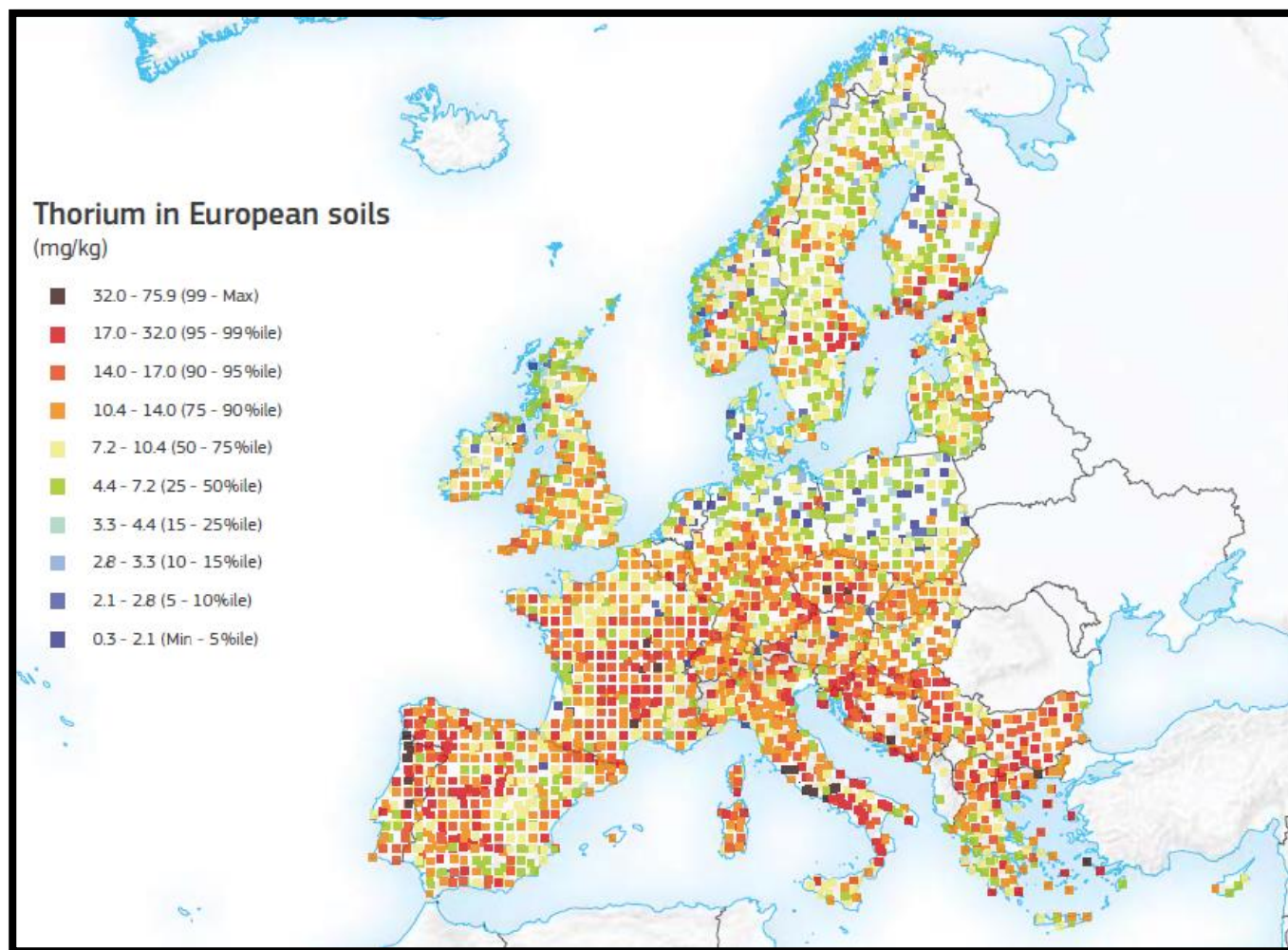
Στην εικόνα 4 παρουσιάζεται η ραδιενεργός σειρά του ^{232}Th . Συγκεκριμένα, ο μητρικός πυρήνας του ισοτόπου Θορίου ^{232}Th καταλήγει στο σταθερό θυγατρικό πυρήνα του ισοτόπου του Μολύβδου ^{208}Pb , μέσω συνολικά 10 διασπάσεων (6 εκπομπών α και 4 εκπομπών β^-).



Εικόνα 4: Σειρά διάσπασης ^{232}Th (Wikimedia Commons, 2020)

Το Θόριο συνήθως απαντάται σε ελάχιστα επίπεδα συγκέντρωσης (<1 g/100 g) σε μέταλλα όπως το Ζιρκόνιο και ο Αλλανίτης, ενώ αποτελεί κύριο συστατικό του Μονζανίτη (>1g/100g). Επειδή το Θόριο είναι ευαίσθητο στη μαγματική διαφοροποίηση, συνήθως απαντάται σε υψηλότερες συγκεντρώσεις στα πυριγενή πετρώματα φελισιτόλιθων, ενώ σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις στα πετρώματα φτωχά σε πυρίτιο (European Atlas of Natural Radiation, 2019).

Στην εικόνα 5 απεικονίζονται οι συγκεντρώσεις του Θορίου στο έδαφος της Ευρώπης.

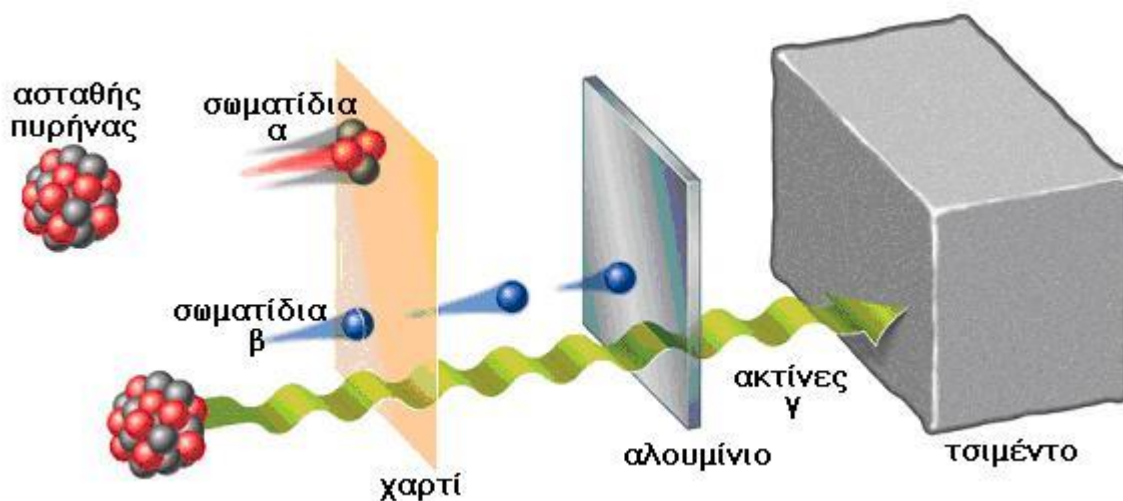


Εικόνα 5: Χάρτης διαβάθμισης της ολικής συγκέντρωσης Θορίου στο έδαφος, στην Ευρώπη (European Atlas of Natural Radiation, 2019).

Το **Κάλιο** (^{40}K) είναι ένα ισότοπο του χημικού στοιχείου με ατομικό αριθμό 19. Δεν ανήκει σε κάποια ραδιενεργή σειρά, δηλαδή δεν επηρεάζεται από ισορροπίες, αλλά εξαρτάται αποκλειστικά από τον δικό του χρόνο ημιζωής, ο οποίος είναι 1.3 δισεκατομμύρια χρόνια. Πιστεύεται ότι το περισσότερο αργό της ατμόσφαιρας έχει προέλθει από τη ραδιενεργό διάσπαση του ^{40}K , η οποία χρησιμοποιείται για τη ραδιοχρονολόγηση πετρωμάτων (Ebbing & Gammon, 1999).

2.2 Μηχανισμοί Εκπομπής Ακτινοβολίας

Ενώ συνήθως οι ραδιενεργές ακτινοβολίες χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, στο παρόν υποκεφάλαιο θα ακολουθήσουμε την κατηγοριοποίηση που περιγράφουν οι Ebbing & Gammon (1999), οι οποίοι περιγράφουν έξι τύπους ραδιενεργής διάσπασης. Η κάθε κατηγορία διάσπασης παρουσιάζει διαφορετική διεισδυτικότητα στα υλικά (εικόνα 6).

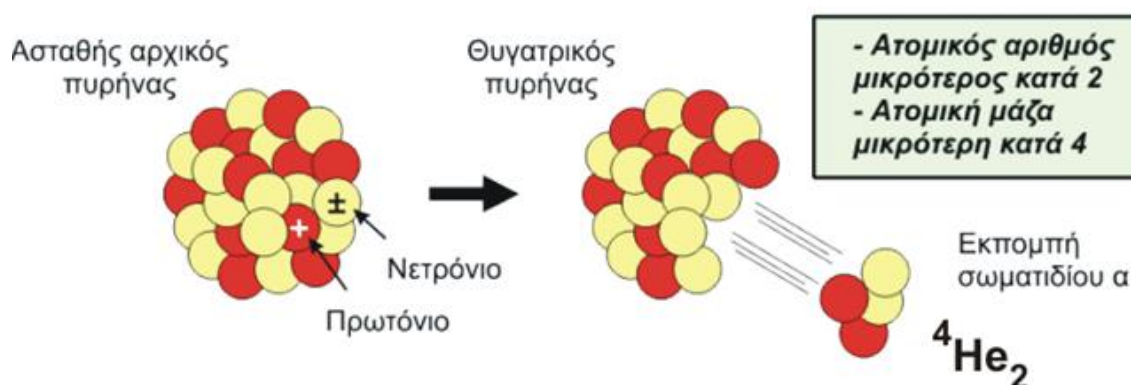


Εικόνα 6: Διεσδυτικότητα ραδιενεργού ακτινοβολίας σε υλικά ανάλογα με τον τύπο της ακτινοβολίας (Πέλλης, χ.χ.)

2.2.1 Μεταστοιχείωση με εκπομπή σωματιδίων α (Εκπομπή α)

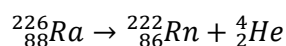
Ο ατομικός πυρήνας διασπάται σε δύο μικρότερους πυρήνες με την εκπομπή ενός σωματιδίου α (άλφα). Η διαδικασία αυτή απελευθερώνει μεγάλη ποσότητα ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας στις πυρηνικές εγκαταστάσεις ή για άλλες εφαρμογές. Πιο αναλυτικά, ένα σωματίδιο α αποτελείται από δύο νετρόνια και δύο πρωτόνια, ισχυρά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Τα α σωματίδια, που στην ουσία είναι ένας πυρήνας ${}^4_2\text{He}$, εκπέμπονται από τους ασταθείς πυρήνες κατά την α-διάσπαση. Σ' αυτό το είδος της διάσπασης, ο ατομικός αριθμός (Z) του ατόμου ελαττώνεται κατά δύο εξαιτίας της απομάκρυνσης δύο πρωτονίων, ενώ ο μαζικός αριθμός (A) ελαττώνεται κατά τέσσερα (Ebbing & Gammon, 1999).

Παράδειγμα μιας τέτοιας διάσπασης είναι:



Εικόνα 7: Διάσπαση μητρικού πυρήνα σε εκπομπή σωματιδίου άλφα (Τσάμης, χ.χ.)

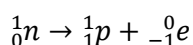
Παράδειγμα αποτελεί η ραδιενεργός διάσπαση του ^{226}Ra :



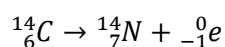
Τα σωματίδια άλφα είναι βαριά σωματίδια και έχουν περιορισμένη διείσδυση στα στερεά υλικά, οπότε η ακτινοβολία αυτή δεν είναι τόσο επικίνδυνη για την υγεία όσο άλλα είδη ακτινοβολίας, όπως οι βήτα και οι γ ακτινοβολίες. Ωστόσο, η έκθεση σε υψηλά επίπεδα άλφα σωματιδίων μπορεί να προκαλέσει βλάβες στα κύτταρα του ανθρώπινου σώματος.

2.2.2 Μεταστοιχείωση με εκπομπή σωματιδίων β (εκπομπή β⁻)

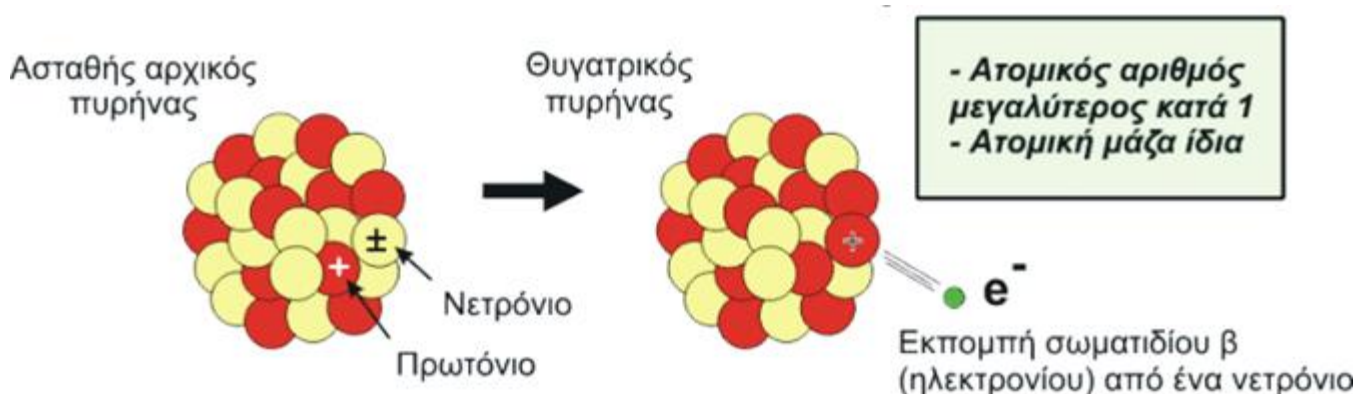
Εν συντομία αναφέρεται ως εκπομπή β ή β⁻. Είναι η εκπομπή ενός ηλεκτρονίου υψηλής ταχύτητας από έναν ασταθή πυρήνα. Η εκπομπή βήτα ισοδυναμεί με τη μετατροπή ενός νετρονίου σε πρωτόνιο.



Παράδειγμα εκπομπής βήτα είναι η ραδιενεργός διάσπαση του ^{14}C :



Ο παραγόμενος πυρήνας έχει ατομικό αριθμό κατά μια μονάδα μεγαλύτερο από αυτόν του αρχικού πυρήνα. Ο μαζικός αριθμός παραμένει ίδιος.



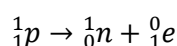
Εικόνα 8: Διάσπαση μητρικού πυρήνα με εκπομπή σωματιδίου βήτα (β⁻) (Τσάμης, χ.χ.).

Η εκπομπή σωματιδίων β συνοδεύεται από την εκπομπή ενέργειας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας στις πυρηνικές εγκαταστάσεις ή για άλλες εφαρμογές. Τα σωματίδια βήτα

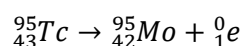
έχουν μικρότερο μέγεθος από τα σωματίδια άλφα με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μεγαλύτερη διεισδυτική ικανότητα στα στερεά υλικά, αλλά είναι εύκολο να προστατευθεί κανείς, π.χ. πίσω από πλαστικό φύλλο πάχους 1 cm. Εάν όμως καταπιούμε ή εισπνεύσουμε ραδιενεργές ουσίες που μεταστοιχειώνονται εκπέμποντας ακτίνες β, οι συνέπειες πιθανά να είναι σοβαρές. Το αποτέλεσμα είναι η έκθεση σε υψηλά επίπεδα σωματιδίων βήτα να μπορεί να προκαλέσει βλάβες στα κύτταρα του ανθρώπινου σώματος και να επηρεάσει την υγεία του.

2.2.3 Μεταστοιχείωση ποζιτρονίου (εκπομπή β⁺)

Είναι η εκπομπή ενός ποζιτρονίου από έναν ασταθή πυρήνα. Στις πυρηνικές εξισώσεις το ποζιτρόνιο συμβολίζεται ως 0_1e και είναι ένα σωματίδιο που έχει μάζα ίση με το ηλεκτρόνιο, φέρει όμως αντίθετο φορτίο (θετικό). Η εκπομπή ποζιτρονίου ισοδυναμεί με την μετατροπή ενός πρωτονίου σε νετρόνιο:



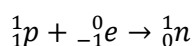
Η ραδιενεργός διάσπαση του Τεχνητίου ${}^{95}_{43}\text{Tc}$ αποτελεί παράδειγμα εκπομπής ποζιτρονίου:



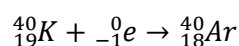
Ο παραγόμενος πυρήνας έχει ατομικό αριθμό κατά μια μονάδα μικρότερο από αυτόν του αρχικού πυρήνα. Ο μαζικός αριθμός παραμένει ίδιος.

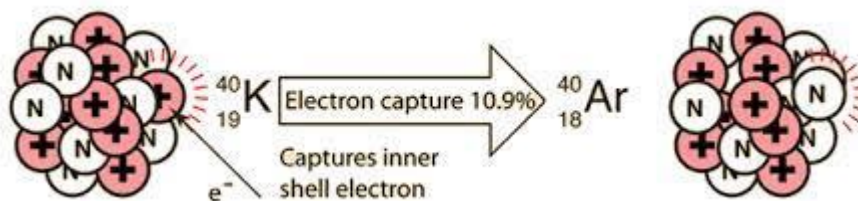
2.2.4 Σύλληψη ηλεκτρονίου (εν συντομία EC)

Είναι η μεταστοιχείωση ενός ασταθούς πυρήνα ατόμου με σύλληψη ενός ηλεκτρονίου από κάποιο εσωτερικό τροχιακό του ατόμου. Στην πραγματικότητα, ένα πρωτόνιο μετατρέπεται σε νετρόνιο, όπως και στην εκπομπή ποζιτρονίου.



Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το ${}^{40}_{19}\text{K}$, το οποίο μπορεί να μεταστοιχειωθεί με σύλληψη ηλεκτρονίου, αλλά και με εκπομπή βήτα ή ποζιτρονίου. Η εξίσωση για τη σύλληψη ηλεκτρονίου είναι:



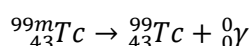


Εικόνα 9: Σύλληψη ηλεκτρονίου από πυρήνα ^{40}K (Hyperphysics, n.d.)

Ο παραγόμενος πυρήνας έχει ατομικό αριθμό κατά μια μονάδα μικρότερο από αυτόν του μητρικού πυρήνα, ενώ ο μαζικός αριθμός παραμένει ο ίδιος. Όταν ένα ηλεκτρόνιο από άλλο τροχιακό συμπληρώνει το κενό που δημιουργήθηκε σε τροχιακό εσωτερικού φλοιού λόγω σύλληψης ηλεκτρονίου, τότε εκπέμπεται ένα φωτόνιο ακτίνων Χ.

2.2.5 Αποδιέγερση με εκπομπή ακτινοβολίας γ

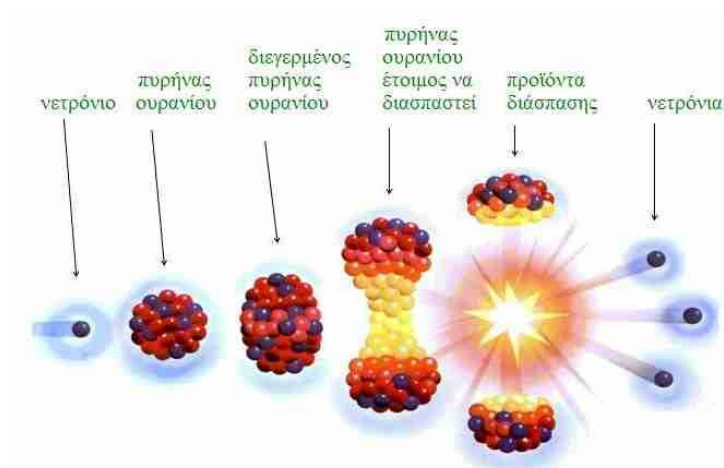
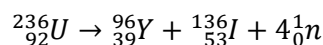
Είναι η εκπομπή από ένα διεγερμένο πυρήνα ενός φωτονίου γ , το οποίο αντιστοιχεί σε ακτινοβολία με μήκος κύματος περίπου 10^{-12} m. Συχνά, η ραδιενεργός διάσπαση καταλήγει σε έναν παράγωγο πυρήνα, ο οποίος είναι σε διεγερμένη κατάσταση. Όπως στην περίπτωση ατόμων, η διεγερμένη κατάσταση είναι ασταθής και μεταπίπτει σε κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Για πυρήνες, η ακτινοβολία που εκπέμπεται είναι στην περιοχή των ακτίνων γ του φάσματος. Συνήθως η εκπομπή γ ξεκινά πολύ γρήγορα μετά από τη ραδιενεργό διάσπαση. Ο θυγατρικός πυρήνας είναι απλώς μία ενεργειακά χαμηλότερη κατάσταση του μητρικού πυρήνα και έτσι δεν υπάρχει καμία μεταβολή του ατομικού ή μαζικού αριθμού. Για παράδειγμα το τεχνητό-99:



Η ακτινοβολία γ μπορεί να προκαλέσει βλάβες στα κύτταρα του ανθρώπινου σώματος και να επηρεάσει την υγεία. Η διάσπαση με ακτινοβολία γ χρησιμοποιείται ευρέως στην ιατρική, κυρίως για τη θεραπεία του καρκίνου μέσω της ακτινοθεραπείας, καθώς και στη βιομηχανία, για την αποστείρωση των τροφίμων και τη διατήρηση των τροφίμων και των φαρμάκων.

2.2.6 Αυθόρμητη σχάση

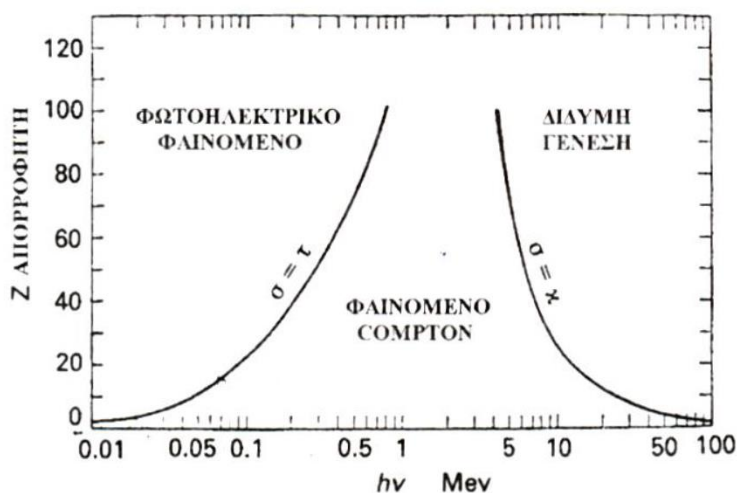
Είναι η αυθόρμητη διάσπαση ενός ασταθούς πυρήνα, κατά την οποία ένας βαρύς πυρήνας μαζικού αριθμού μεγαλύτερου του 232 διαιρείται σε ελαφρύτερους πυρήνες και απελευθερώνει ενέργεια. Για παράδειγμα, το ^{236}U μπορεί να υποστεί αυθόρμητα τη διάσπαση:



Εικόνα 10: Απεικόνιση αυθόρμητης σχάσης πυρήνα Ουρανίου (Γαρυφαλλίδου, χ.χ.).

2.3 Ανίχνευση Ακτινοβολίας γ

Ο ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός των ραδιενεργών ισοτόπων γίνεται μέσω της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας γ με την ύλη. Γενικά η αλληλεπίδραση της ύλης με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία γ είναι μικρή. Τα φωτόνια δε διαθέτουν φορτίο, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν διαφορετικούς τρόπους αλληλεπίδρασης με την ύλη, συγκριτικά με τα φωτισμένα σωματίδια. Η ενέργεια της ακτινοβολίας γ κυμαίνεται από 10 keV έως 10^4 MeV. Η απορρόφηση των φωτονίων από την ύλη ακολουθεί τρεις μηχανισμούς αλληλεπίδρασης: το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, τη σκέδαση Compton και τη δίδυμη γένεση (Μισαηλίδης & Νόλη, 2020).



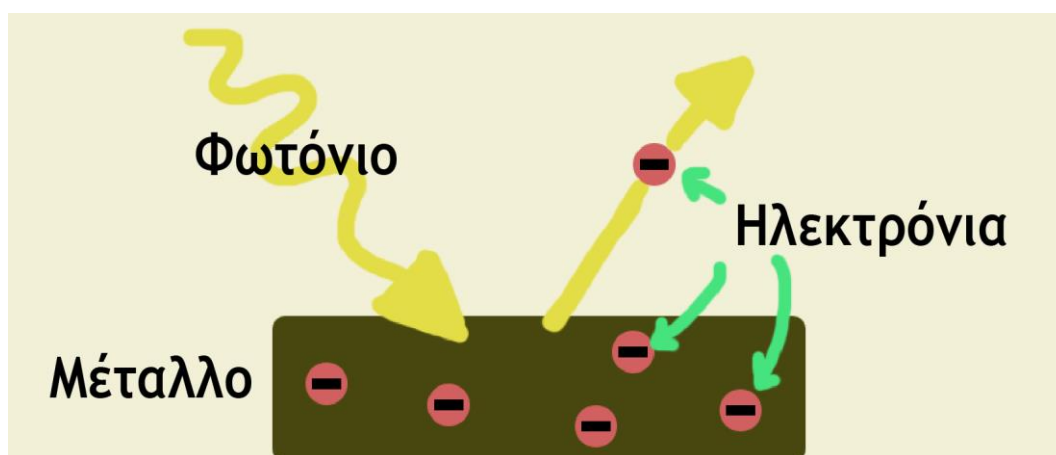
Διάγραμμα 1: Σχετική συνεισφορά της φωτοηλεκτρικής απορρόφησης, της σκέδασης Compton και της δίδυμης γένεσης ως συνάρτηση της ενέργειας των φωτονίων (Γαζής, 2002).

Στο Διάγραμμα 1 παρουσιάζεται το φαινόμενο που επικρατεί, ανάλογα με την ενέργεια των φωτονίων.

2.3.1 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Σύμφωνα με τους Μισαηλίδη & Νόλη (2020), κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, το φωτόνιο αποδίδει με μια κρούση όλη την ενέργειά του σε ένα τροχιακό ηλεκτρόνιο του υλικού με το οποίο αλληλοεπιδρά. Λόγω της κρούσης, το ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει το άτομο και αποκτά κινητική ενέργεια ίση με την ενέργεια του φωτονίου, μειωμένη κατά την ενέργεια συνδέσεώς του. Η ενέργεια συνδέσεως εξαρτάται από τη στιβάδα στην οποία βρισκόταν το ηλεκτρόνιο.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο εξηγεί, επίσης, την αντίσταση της επιφάνειας σε διάφορες μορφές φωτός. Αν τα φωτόνια που πέφτουν σε μια επιφάνεια δεν έχουν αρκετή ενέργεια για να αφαιρέσουν ηλεκτρόνια από την επιφάνεια, τότε αυτά τα φωτόνια απλώς απορροφώνται από το υλικό και μετατρέπονται σε θερμότητα. Η πιθανότητα να συμβεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο εξαρτάται από την ενεργό διατομή, καθώς όσο αυξάνεται η ενέργεια του φωτονίου, η πιθανότητα του συμβάντος ελαττώνεται.

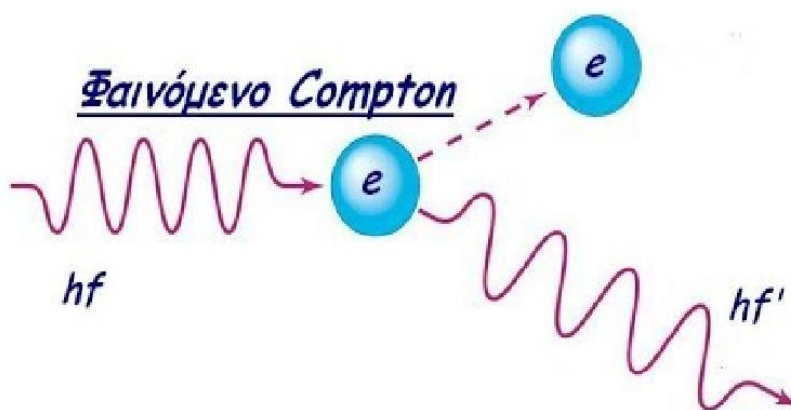


Εικόνα 11: Σχηματική απεικόνιση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου (My school Lab, n.d.).

Αυτό το φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον Albert Einstein το 1905 και έχει σημαντικές εφαρμογές στη φωτοηλεκτρική αντίσταση, τους φωτοηλεκτρικούς αισθητήρες και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα. Συνολικά, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι ένα σημαντικό φυσικό φαινόμενο που εξηγεί τον τρόπο με τον οποίο η φωτεινή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια.

2.3.2 Σκέδαση Compton

Σύμφωνα με τη σκέδαση Compton, το φωτόνιο αποδίδει μόνο τμήμα της ενέργειάς του σε ένα από τα τροχιακά ηλεκτρόνια και συνεχίζει την πορεία του με μειωμένη ενέργεια και διαφορετική κατεύθυνση, αλληλοεπιδρώντας περαιτέρω με τον απορροφητή. Το ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει το άτομο με ενέργεια ίση με την ενέργεια που του απέδωσε το φωτόνιο, μειωμένη κατά την ενέργεια σύνδεσής του (Μισαηλίδης & Νόλη, 2020).

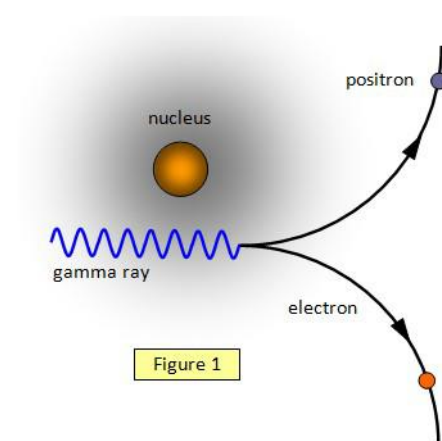


Εικόνα 12: : Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου Compton (Παπούλας, 2018)

Το φαινόμενο αυτό είναι ο σημαντικότερος τρόπος αλληλεπίδρασης φωτονίων μέσης ενεργειακής ενέργειας με την ύλη. Το φαινόμενο Compton χρησιμοποιείται ευρέως στη μαγνητική τομογραφία και στη μελέτη της δομής των υλικών, καθώς και στην έρευνα στον τομέα της φυσικής και της αστροφυσικής.

2.3.3 Δίδυμη Γένεση

Όταν τα φωτόνια έχουν κινητική ενέργεια μεγαλύτερη από το ισοδύναμο σε ενέργεια της μάζας ηρεμίας δυο ηλεκτρονίων ($2 \times 511 \text{ keV}$), τότε προκύπτει στο ηλεκτρικό πεδίο ενός πυρήνα ένα ζεύγος ποζιτρόνιο/ηλεκτρόνιο. Το ποζιτρόνιο που παράγεται επιβραδύνεται στο απορροφητικό υλικό και τελικά αφυλοποιείται παράγοντας δυο φωτόνια ενέργειας 511 keV το καθένα (Μισαηλίδης & Νόλα, 2020)



Εικόνα 13: : Σχηματική Απεικόνιση της δίδυμης γένεσης (<https://qph.cf2.quoracdn.net/main-qimg-d45ce1b75df4b27c307c63843d9b8119>).

Η δίδυμη γένεση είναι σημαντική στο πεδίο της πυρηνικής ενέργειας, καθώς αποτελεί μέρος των διαδικασιών που συμβαίνουν στα πυρηνικά εργοστάσια και στα πυρηνικά όπλα. Ο έλεγχος της δίδυμης γένεσης είναι σημαντικός για την ασφάλεια των εγκαταστάσεων και την αποτροπή των πυρηνικών ατυχημάτων.

2.4 Ενεργότητα και Χρόνος Ημιζωής

Σε ένα δείγμα ραδιενεργού στοιχείου, ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων ελαττώνεται καθώς οι πυρήνες διασπώνται. Αυτό είναι μια στατιστική διαδικασία, δηλαδή δεν μπορεί να υπάρξει ακριβής πρόβλεψη του χρόνου διάσπασης ενός πυρήνα. Μεταβολές στο εξωτερικό περιβάλλον, όπως θέρμανση/ψύξη, δεν επηρεάζουν σημαντικά το ρυθμό διάσπασης (Young et al., 1994).

Ως ενεργότητα (ή ρυθμός ραδιενεργού διάσπασης) ορίζεται ο αριθμός των πυρήνων που διασπώνται, ανά μονάδα χρόνου, σε μια δεδομένη ποσότητα ύλης. Η μονάδα μέτρησης της ενεργότητας είναι το Becquerel [$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$]. Όσο περισσότεροι πυρήνες υπάρχουν, τόσο περισσότεροι πυρήνες διασπώνται, επομένως η ενεργότητα είναι ανάλογη με το πλήθος των πυρήνων και δίνεται από τη σχέση:

$$A = \lambda \cdot N$$

Όπου:

A: οι διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο (ενεργότητα)

λ : η σταθερά διάσπασης

N: το πλήθος των πυρήνων του εκάστοτε ραδιοϊσοτόπου

Η σταθερά λ εξαρτάται από το ραδιοϊσότοπο, όπου μεγάλο λ ισοδυναμεί με υψηλό ρυθμό διάσπασης (Young et al., 2004).

Ως χρόνος ημιζωής ενός ραδιενεργού πυρήνα ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για να διασπαστούν οι μισοί από τους αρχικούς πυρήνες (Ebbing & Gammon, 1999). Δηλαδή:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Όπου:

$T_{1/2}$: ο χρόνος ημιζωής

$\ln 2$: ο φυσικός λογάριθμος του 2

λ: η σταθερά διάσπασης του εκάστοτε ραδιοϊσοτόπου

Για παράδειγμα, ο χρόνος ημιζωής του ^{232}Th είναι περίπου 14 δισεκατομμύρια χρόνια, ενώ του ^{238}U είναι περίπου 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια.

2.5 Ραδιενεργές Δόσεις

Η έννοια της ραδιενεργού δόσης επινοήθηκε για τη διασφάλιση της προστασίας μας από την ραδιενέργεια, ώστε να καθοριστούν τα ανώτερα επιτρεπτά όρια έκθεσης και να μπορούν να πραγματοποιούνται έλεγχοι συμμόρφωσης με τους κανονισμούς. Τα όρια αυτά καθορίζονται από τη νομοθεσία. Η ποσοτική περιγραφή των επιδράσεων της ιονίζουσας ακτινοβολίας στους ιστούς των ζωντανών οργανισμών ονομάζεται δοσιμετρία ακτινοβολίας και επικεντρώνεται στον υπολογισμό των δόσεων της ραδιενέργειας (Young et al., 2004). Με αυτόν τον τρόπο καθορίζονται και τα επιτρεπτά επίπεδα των δόσεων ακτινοβολίας, ώστε να διασφαλίζεται ότι δε θα υπάρξει βιολογική επίδραση στους οργανισμούς λόγω της ακτινοβολίας (Αντωνόπουλος –Ντόμης, 2004). Λόγω της κοσμικής ακτινοβολίας η δόση αυξάνεται με το υψόμετρο στο οποίο γίνεται η μέτρηση. Επίσης, η δόση εξαρτάται από τη συγκέντρωση των ραδιοϊσοτόπων στα οποία εκτίθεται κάποιος, ο χρόνος κατά τον οποίο θα μείνει εκτεθειμένος, καθώς και από τον τύπο της ακτινοβολίας στον οποίο θα εκτεθεί. Η μέση συνεισφορά που δέχεται ο άνθρωπος είναι 0,3 mSv ετησίως (Βεργανελάκης et al., 1987).

Κάθε φορά που ένας ζωντανός οργανισμός εκτίθεται σε ακτινοβολία γ, ένα μέρος της ακτινοβολίας θα τον διαπεράσει δίχως να αλληλοεπιδράσει με τους ιστούς του οργανισμού, ενώ ένα άλλο μέρος της θα απορροφηθεί και θα εναποθέσει ενέργεια στα κύτταρα του οργανισμού. Η απορροφώμενη δόση είναι το ποσό της ενέργειας που απορροφά ο οργανισμός ανά μονάδα μάζας του. Όσο μεγαλύτερη

είναι η απορροφώμενη δόση, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα επιπτώσεων στον οργανισμό λόγω της ακτινοβολίας (Αντωνόπουλος –Ντόμης, 2004).

Η **απορροφούμενη δόση D** δίνεται από την σχέση:

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

Όπου:

D: η απορροφούμενη δόση

E: Η απορροφούμενη ενέργεια

m: η μάζα του οργανισμού/υλικού

Η μονάδα μέτρησης της απορροφούμενης δόσης D είναι το 1 Grey (Gy), όπου το 1 Gy=1 J kg⁻¹ ή 1 Gy=100 rad. Λόγω της τάξης μεγέθους των απορροφούμενων δόσεων, χρησιμοποιούνται κυρίως υποπολλαπλάσια του Gy.

Εκτός από την απορροφώμενη δόση D, πολύ σημαντικός παράγοντας είναι και ο τύπος της ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα τα σωματίδια άλφα, είναι πολύ πιο επιβλαβή από την ακτινοβολία γ στην ίδια δόση. Συγκεκριμένα χρειάζεται περίπου 20 φορές μεγαλύτερη δόση ακτινοβολίας γ, από την δόση της ακτινοβολίας άλφα, για να προκληθεί η ίδια βιολογική επίπτωση. Για το λόγο αυτό, καθιερώθηκε ο συντελεστής στάθμισης W_R, ο οποίος είναι ένας καθαρός αριθμός που υποδεικνύει πόσες φορές μεγαλύτερη από την απορροφούμενη δόση της εκάστοτε ακτινοβολίας πρέπει να είναι η δόση ακτινοβολίας γ ή X, προκειμένου να υπάρξει η ίδια βιολογική επίπτωση.

Πίνακας 1: Συντελεστές στάθμισης W_R της ακτινοβολίας (ΕΕΑΕ, 2011)

Είδος Ακτινοβολίας	Συντελεστής στάθμισης ακτινοβολίας W _R
Φωτόνια (γ & X) όλων των ενεργειών	1
Ηλεκτρόνια	1
Πρωτόνια	2-5
Σωματίδια α, θραύσματα σχάσης, βαρέα ιόντα	20
Νετρόνια	5-20 (ανάλογα την ενέργεια)

Η **ισοδύναμη δόση** προκύπτει από το γινόμενο της απορροφώμενης δόσης (D) επί του συντελεστή στάθμισης (W_R). Δηλαδή:

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

Η μονάδα μέτρησης της ισοδύναμης δόσης είναι το Sievert (Sv) και αποτελεί το μέτρο διακινδύνευσης από την εναπόθεση της ενέργειας.

Τέλος, για τον υπολογισμό της συνολικής επιβάρυνσης της υγείας ενός ατόμου από την ακτινοβολία, χρησιμοποιείται η **ενεργός δόση**, η οποία προσδιορίζει την επιβάρυνση που προκαλείται σε κάθε όργανο του ζωντανού οργανισμού. Η ενεργός δόση δίνεται από τον τύπο:

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

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται ο συντελεστής W_T για κάθε όργανο. Για τον υπολογισμό της ολόσωσης δόσης είναι $W_T=1$.

Πίνακας 2: Συντελεστές στάθμισης W_T της ακτινοβολίας (ΕΕΑΕ, 2011)

Ιστός/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

2.6 Ραδιενέργεια σε Δομικά Υλικά

Σύμφωνα με τη μελέτη των Imani et al. (2021), οι περισσότεροι άνθρωποι περνούν περίπου το 80% της ζωής τους μέσα σε κτήρια, στο σπίτι, τη δουλειά, το σχολείο, κτλ. Είναι σημαντικό τα κτήρια να είναι φιλικά προς το περιβάλλον, αλλά και προς τον άνθρωπο. Οι παράγοντες για να θεωρηθεί ένα σπίτι ασφαλές είναι πολλοί, οι σημαντικότεροι είναι ο σωστός στατικός σχεδιασμός, η ποιότητα των κατασκευαστικών υλικών, ο σωστός εξαερισμός και φωτισμός του κτηρίου, ο προσανατολισμός του και ο σωστός σχεδιασμός των ανοιγμάτων του κτηρίου. Η γνώση της συγκέντρωσης ενεργότητας των ραδιοϊσοτόπων σε κάθε δομικό υλικό, επιτρέπει να εκτιμηθούν οι πιθανοί κίνδυνοι λόγω ραδιενέργειας στους χρήστες των κτηρίων. Το κάθε δομικό υλικό εκπέμπει διαφορετικά ποσά φυσικής ραδιενέργειας, αλλά όλα εκπέμπουν κυρίως ακτινοβολία από ραδιοϊσότοπα των σειρών ^{238}U και ^{232}Th αλλά και από το ^{40}K .

Η ανθρώπινη έκθεση σε ραδιενέργεια λόγω των δομικών υλικών μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες: την εσωτερική και την εξωτερική έκθεση. Η εξωτερική έκθεση είναι αποτέλεσμα κυρίως της γ ακτινοβολίας, ενώ η εσωτερική έκθεση είναι αποτέλεσμα της εισπνοής ραδιοϊσοτόπων ή της κατανάλωσής τους μέσω των τροφίμων και του νερού. Η εσωτερική έκθεση οφείλεται σε σημαντικό βαθμό στην κατάποση ή εισπνοή του ισοτόπου του Ραδονίου ^{222}Rn ή/και του Θορονίου ^{220}Rn . Επειδή το Ραδόνιο και το Θορόνιο είναι αδρανή αέρια, κινούνται ελεύθερα στα πορώδη υλικά, όπως στην πλειοψηφία των δομικών υλικών και συνήθως μόνο με τη θραύση του υλικού καταφέρνουν να φτάσουν στην επιφάνεια. Η κύρια πηγή εσωτερικής ραδιενέργειας είναι το υπέδαφος, αν και κάποιοι ερευνητές υποστηρίζουν πως η συνεισφορά εσωτερικής ραδιενέργειας από τα δομικά υλικά δεν είναι αμελητέα (European Commission, 1999). Τα δομικά υλικά εκπέμπουν ακτινοβολία για μεγάλο χρονικό διάστημα και μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα υγείας αν καταναλωθούν ή εισπνευστούν σε μεγάλες ποσότητες. Ωστόσο, οι εκπομπές από δομικά υλικά συνήθως είναι πολύ χαμηλές και δεν αποτελούν σημαντικό κίνδυνο για την υγεία του ανθρώπου. Επιπλέον, η εκπομπή ακτινοβολίας μπορεί να μειωθεί με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών κατασκευής και επιλογής δομικών υλικών. Επομένως, η ακτινοβολία που εκπέμπουν τα δομικά υλικά είναι, επίσης, ένας σημαντικός παράγοντας για την ποιότητα ενός κτηρίου. Αν συνδυαστούν υψηλές εκπομπές των υλικών με άλλους παράγοντες, όπως ο κακός αερισμός, η ανιχνευόμενη ραδιενέργεια ενός κτηρίου πιθανόν να είναι υψηλή. Γι' αυτό και συνήθως παρατηρείται υψηλή ραδιενέργεια σε υπόγεια παλιών κτηρίων. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τις οδηγίες (Radiation Protection 112, 1999) της Ευρωπαϊκής κοινότητας, οι κάτοικοι ενός διαμερίσματος κατασκευασμένου από οπλισμένο σκυρόδεμα με μέση συγκέντρωση ενεργότητας για τα ραδιοϊσότοπα ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K να είναι 40 Bq kg^{-1} , 30 Bq kg^{-1} και 400 Bq kg^{-1} αντίστοιχα, δέχονται ετήσια δόση περίπου $0,25 \text{ mSv}$. Λόγω των παραπάνω έχουν προταθεί από πολλούς οργανισμούς κάποια πρότυπα ραδιοπροστασίας. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή οδηγία 2013/59/EURATOM, το συνιστώμενο όριο έκθεσης σε ακτινοβολία γ που εκπέμπεται από δομικά υλικά είναι το 1 mSv ανά έτος. Επειδή η δόση εξαρτάται από τη συγκέντρωση ενεργότητας διαφόρων ραδιονουκλιδίων, έχει προταθεί από την ΙΑΕΑ (2019) και ένας εναλλακτικός τρόπος ελέγχου ως προς τη συμμόρφωση με το όριο της δόσης, που λαμβάνει μόνο την εκπομπή ακτινοβολίας γ μέσω των συγκεντρώσεων ενεργότητας των τριών βασικών ραδιοϊσοτόπων. Συγκεκριμένα, αυτός είναι ο δείκτης I συγκέντρωσης ενεργότητας (αδιάστατο μέγεθος) και δίνεται από τη σχέση:

$$I = \frac{C_{\text{Ra-226}}}{300 \text{ Bq kg}^{-1}} + \frac{C_{\text{Th-232}}}{200 \text{ Bq kg}^{-1}} + \frac{C_{\text{K-40}}}{3000 \text{ Bq kg}^{-1}}$$

Όπου:

Cx: η συγκέντρωση ενεργότητας των ραδιοισοτόπων ^{226}Ra , ^{232}Th και ^{40}K .

Στον Πίνακα 3 δίνονται τα όρια του I ανάλογα με το δομικό υλικό που εξετάζεται. Τα υλικά χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα δομοστατικά δομικά υλικά, που χρησιμοποιούνται στη δόμηση του σκελετού και του κελύφους του κτηρίου (τσιμέντο, τούβλα, οικοδομική άμμος κ.α.), και στα επιφανειακά δομικά υλικά, που χρησιμοποιούνται σε μικρότερη έκταση για τη διακόσμηση και διαμόρφωση των χώρων (πλακάκια κ.α.)

Πίνακας 3: Αξιολόγηση δομικών υλικών ανά κατηγορία χρήσης τους, σύμφωνα με το δείκτη I (Travisi et al., n.d.)

Δόση	1 mSv γ^{-1}
Δομοστατικά υλικά	$I \leq 1$
Επιφανειακά και άλλα υλικά με περιορισμένη χρήση	$I \leq 6$

Στόχος των κυβερνήσεων για την προστασία των πολιτών είναι να ελαχιστοποιηθεί η συγκέντρωση ενεργότητας των ραδιοϊσοτόπων στα δομικά υλικά, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η δόση που λαμβάνουν οι χρήστες των κτηρίων από αυτά. Όπως προαναφέρθηκε, η γνώση της δόσης που εκπέμπει το κάθε δομικό υλικό, επιτρέπει να υπολογιστεί σε τι βαθμό επηρεάζεται η συνολική δόση φυσικής ραδιενέργειας που λαμβάνει ένας χρήστης μέσω και των υπολοίπων πηγών (νερό, τροφή, έδαφος κτλ.). Ο ορισμός των ορίων δόσης καθιστά δυνατή τη λήψη προληπτικών μέτρων για τη διασφάλιση ότι η συνολική δόση δε θα υπερβαίνει τα καθορισμένα όρια.

Είναι πρόκληση για τις αρχές ο έλεγχος αυτού του ορίου, λόγω της μεγάλης παραγωγής δομικών υλικών, αλλά και λόγω της δυσκολίας στην αντιπροσωπευτική μέτρηση της ακτινοβολίας στα δομικά υλικά. Ενδεικτικά, η παραγωγή μπετόν στην Ευρώπη το 2015 ήταν 2.510.000.000 τόνοι (ΙΑΕΑ, 2019). Οι αρχές πρέπει να διασφαλίσουν ότι τηρείται το ανώτατο όριο των 1 mSv ανά έτος από τα δομικά υλικά, διενεργώντας τακτικούς ελέγχους κατά την παραγωγή τους, ενώ οι μέθοδοι ανάλυσης που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις, πρέπει να είναι διαπιστευμένες (ISO/IEC 17025) και τα εργαστήρια να συμμορφώνονται με τον κανονισμό (EC) No 765/2008. Φυσικά είναι προαπαιτούμενο να πραγματοποιούνται έλεγχοι από ειδικευμένο προσωπικό σε όλα τα εργοστάσια παραγωγής, για τον επιτόπιο έλεγχο των παραγόμενων παρτίδων. Η δημιουργία τεστ χαμηλού κόστους και άμεσης μέτρησης, θα συνέβαλλε σε μεγάλο βαθμό στο συστηματικό έλεγχο των δομικών υλικών. Στη βιομηχανία είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται ο έλεγχος στο κατά δυνατόν μικρότερο χρόνο και με το μικρότερο κόστος, επειδή οι κατασκευαστικές εταιρείες έχουν τεράστιο όγκο παραγόμενων προϊόντων να ελέγξουν.

Για τον έλεγχο της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από δομικά υλικά, υπάρχουν τέσσερις διαδεδομένοι τρόποι σύμφωνα με τον Lofqvist (2019). Ο πρώτος τρόπος είναι ο επιτόπιος (in situ) έλεγχος MMK A2 610, όπου για τη μέτρηση χρησιμοποιείται κάποιος φορητός ανιχνευτής. Ο δεύτερος τρόπος είναι ο MMK A2 605, ο οποίος γίνεται στα εργοστάσια παραγωγής. Με τον τρίτο τρόπο MMK 608 μετρείται η εκπεμπόμενη δόση εντός των κτηρίων. Τέλος, στον τέταρτο τρόπο MMK A2 606 προσδιορίζεται συγκεκριμένα ποιο δομικό υλικό ενός δωματίου/κτηρίου αποτελεί την κύρια πηγή εκπομπής (πάτωμα, τοίχος, ταβάνι). Στην περίπτωση όπου ανιχνευθεί υψηλή δόση σε ήδη υφιστάμενο κτήριο υπάρχουν λύσεις, οι οποίες όμως έχουν υψηλό κόστος. Συνήθως τα δομικά υλικά με υψηλή εκπομπή ακτινοβολίας καλύπτονται από φύλλα μολύβδου ή τούβλα (IAEA, 2019). Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πως ο έλεγχος των δομικών υλικών κατά την κατασκευή τους είναι πιο αποτελεσματικός, παρά η αντιμετώπιση της υψηλής ακτινοβολίας σε περίπτωση που αυτή ανιχνευτεί.

Σύμφωνα με τους Stoulos et al. 2003, η έκθεση σε ακτινοβολία γ από τα δομικά υλικά, στην Ελλάδα αποτελεί την κύρια πηγή ακτινοβολίας εντός των κτηρίων, μιας και η δόση εντός οικιών αποτελεί το 13-30% της συνολικής δόσης.

Κεφάλαιο Τρίτο

Δειγματοληψία και Μέθοδος

Τα φυσικά ραδιοϊσότοπα και οι συγκεντρώσεις τους εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωγραφία και το γεωλογικό υπόβαθρο της κάθε περιοχής. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η επιλογή των δειγμάτων, η δειγματοληψία τους και η προετοιμασία των δειγμάτων για τη μέτρησή τους από το φασματοσκόπιο γ, καθώς και η ανάλυση των φασμάτων που προέκυψαν.

3.1 Επιλογή Δειγμάτων

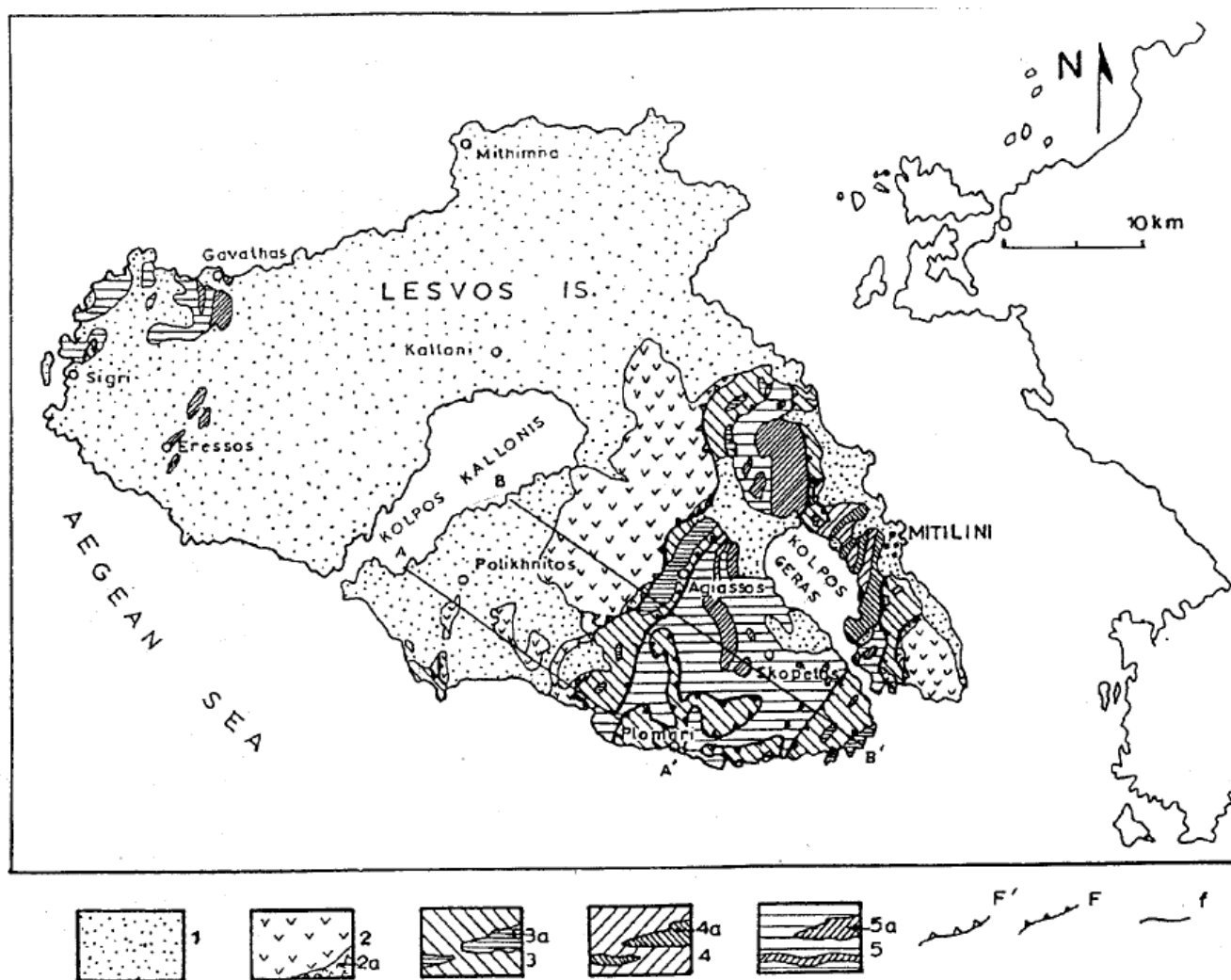
3.1.1 Περιοχή μελέτης

Το νησί της Λέσβου βρίσκεται στο Βορειοανατολικό Αιγαίο και είναι σε έκταση το τρίτο της Ελλάδος, μετά την Κρήτη και την Εύβοια. Διαθέτει άφθονα γεωλογικά μνημεία και τοπία φυσικού κάλλους, οικοτόπους και πολιτιστικά μνημεία, τα οποία έχουν αναγνωριστεί και ενταχθεί στο Παγκόσμιο Δίκτυο Γεωπάρκων της UNESCO. Το Απολιθωμένο Δάσος, ο υγρότοπος της Καλλονής, τα ηφαίστεια, οι θερμές πηγές, οι καταρράκτες και τα μεγάλα γεωλογικά ρήγματα, αποτελούν μερικά από τα τεκμήρια της γεωλογικής ιστορίας της λεκάνης του Αιγαίου. Πιο συγκεκριμένα, το δυτικό τμήμα του νησιού αποτελείται κυρίως από ηφαιστειακά πετρώματα Νεογενούς περιόδου, μεταλλικά ιζήματα και τοπία χωρίς βλάστηση. Αντιθέτως, η ανατολική Λέσβος παρουσιάζει αυξημένη φυτοκάλυψη και είναι πλούσια σε αλπικά και προαλπικά πετρώματα (Katsikatsos et al., 1986). Η Λέσβος χωρίζεται σε τρεις ενότητες βάσει του γεωλογικού της υποβάθρου (Θωμαΐδου, 2009):

- Αυτόχθονη σειρά, πρόκειται για το υπόστρωμα του νησιού χωρίς τα μεταγενέστερα προϊόντα της Ηφαιστειακής δράσης. Αποτελείται κυρίως από σχιστολιθικά και μεταψαμμικά πετρώματα, ανάμεσά τους παρεμβάλλονται και στρώσεις ανθρακικών πετρωμάτων.
- Αλλόχθονη σειρά, πρόκειται για τα πετρώματα που βρίσκονται πάνω από την αυτόχθονη σειρά. Χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, το τεκτονικό κάλυμμα (ηφαιστειοιζηματογενή πετρώματα) και τεκτονικό κάλυμμα (οφιολιθικά πετρώματα).
- Μετα-Αλπικοί σχηματισμοί, είναι οι νεότεροι σχηματισμοί και αποτελούνται κυρίως από ηφαιστειακά πετρώματα που ακολουθούνται από θαλάσσιες αποθέσεις.

Στην εικόνα 14 παρουσιάζεται η γεωμορφολογία του νησιού. Συγκεκριμένα το Βόρειο, το Δυτικό και το κεντρικό τμήμα της Λέσβου καταλαμβάνονται από τους νεογενείς ηφαιστειακούς σχηματισμούς και

άλλα μεταλλικά ιζήματα που καλύπτουν καθολικά τα προαλπικά και αλπικά πετρώματα. Εξαιρέση αποτελούν οι μικρές εμφανίσεις αλπικών και προαλπικών πετρωμάτων στο Βορειοδυτικό άκρο της νήσου, συγκεκριμένα στην περιοχή του Σιγρίου και του Γαβαθά, καθώς και σε κάποιες απομονωμένες μικρές περιοχές στην περιοχή της Ερεσού (Θωμαΐδου, 2009).

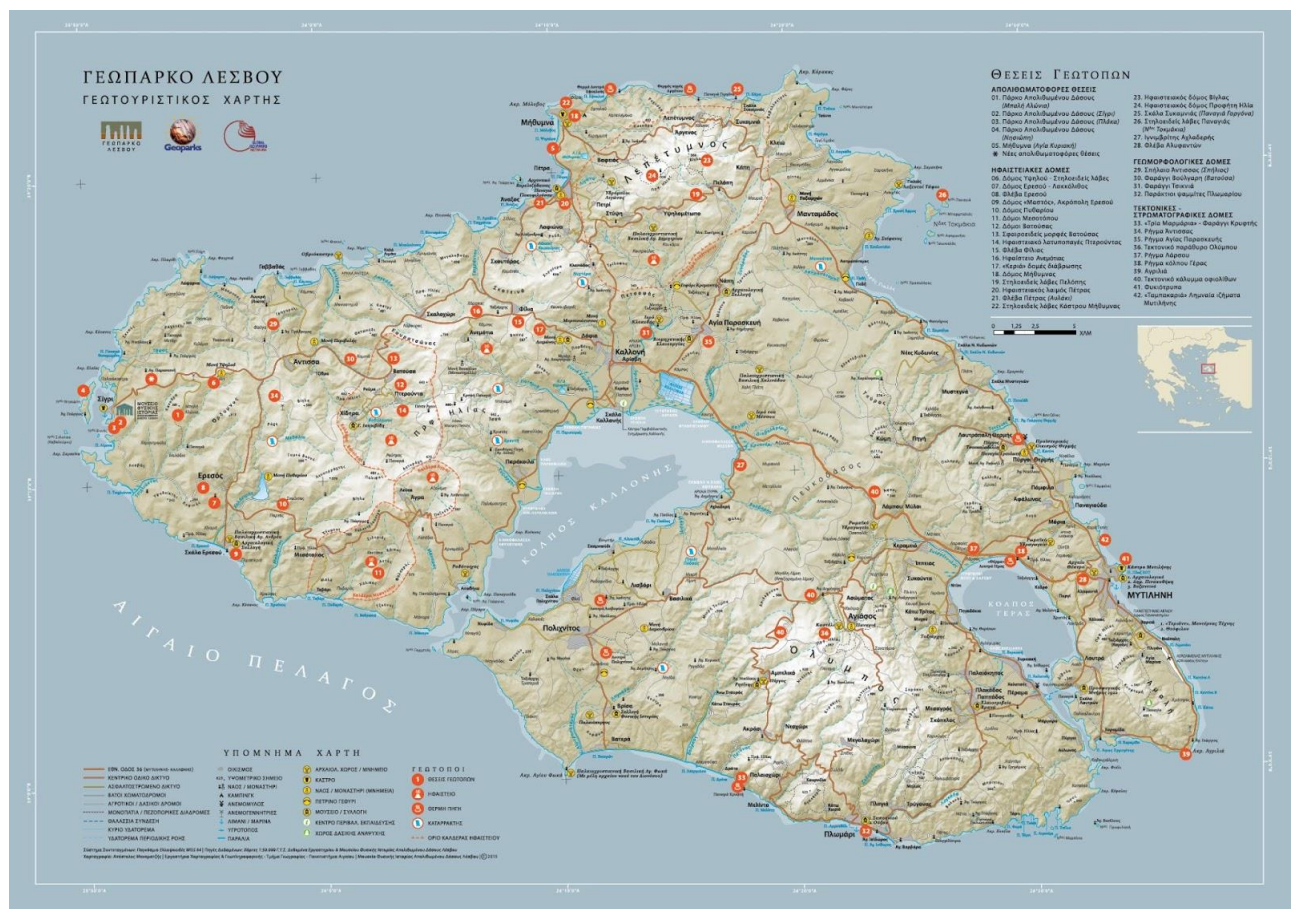


Εικόνα 14: Γεωλογικός χάρτης της Λέσβου που απεικονίζει κυρίως τις ενότητες υποβάθρου και γεωλογικές τομές του ΝΑ τμήματος του νησιού. (1) Τεταρογενείς και νεογενείς σχηματισμοί. (2) Περιδοτίτες και σερπεντίνιτες. (2α) Αμφιβολίτες, αμφιβολιτικοί αχιστόλιθοι. (3) Τριαδικοί μεταβασίτες και μετακλαστικοί σχηματισμοί. (3α) Ενδιαστρώσεις κρυσταλλικών ανθρακικών πετρωμάτων. (4) Τριαδικοί σχιστολιθικοί και μεταψαμμίτες. (4α) Ενδιαστρώσεις κρυσταλλικών ανθρακικών πετρωμάτων. (5) Νεοπαλαιοζωικοί σχιστόλιθοι και μετα-ψαμμίτες. (5α) Ενδιαστρώσεις κρυσταλλικών ανθρακικών πετρωμάτων. F, F' : Επώθηση f: Τεκτονική Επαφή (Katsikatsos et al., 1986)

Οι Ηφαιστειακοί γεώτοποι της Λέσβου είναι:

- Ηφαιστειακός Δόμος Υψηλού – Στηλοειδείς Λάβες
- Λακκόλιθος Ερεσού

- Ηφαιστειακή Φλέβα Ερεσού
- Ηφαιστειακός Δόμος Μαστού – ακρόπολη Ερεσού
- Ηφαιστειακός Δόμος Πυθαρίου
- Δόμοι – Ηφαιστειακή καλδέρα Βατούσας
- Ηφαιστειακή Φλέβα Φίλιας
- Ηφαίστειο Ανεμώτιας
- Ηφαιστειακός Δόμος Μήθυμνας
- Ηφαιστειακός Λαιμός Πέτρας
- Ηφαιστειακή Φλέβα Αυλάκι Πέτρας
- Ηφαίστειο Λεπέτυμνου – Δόμοι Προφήτη Ηλία και Βίγλας
- Ηφαιστειακή Φλέβα Αλυφαντών
- Ηφαιστειακή Φλέβα Μήθυμνας
- Καλδέρα Άγρας



Εικόνα 15: Χωρική απεικόνιση των Γεωτόπων της Λέσβου (Μουσείο Φυσικής Ιστορίας, χ.χ.).

Θερμές Πηγές Λέσβου:

- Θερμές Πηγές Πολιχνίτου
- Θερμές Πηγές Κόλπου Γέρας
- Θερμές Πηγές Λισβορίου
- Θερμές Πηγές Αργένου
- Θερμές Πηγές Λουτρόπολης Θερμής
- Θερμές Πηγές Εφταλούς
- Θερμές Πηγές Κρυφτής στο Πλωμάρι

Λατομεία Λέσβου:

- Ερεσού (λειτουργεί)
- Στύψης (λειτουργεί)
- Πετρίου (εκτός λειτουργίας)
- Μιστεγνών (λειτουργεί)
- Μολύβου (εκτός λειτουργίας)

3.1.2 Δειγματοληψία

Στόχος στην παρούσα εργασία ήταν τα περισσότερα δείγματα (7/14) δομικών υλικών να έχουν προέλευση από τη Λέσβο. Τα υπόλοιπα είναι δομικά υλικά από άλλες περιοχές της Ελλάδας ή και άλλων χωρών, λόγω περιορισμένων τοπικών επιλογών. Τα μόνα δομικά υλικά που παράγονται στη Λέσβο είναι πέτρες για την οικοδόμηση κτηρίων. Το τσιμέντο είναι της εταιρείας Lafarge, το δείγμα 1 παράχθηκε στο εργοστάσιο της Εύβοιας, ενώ το δείγμα 2 είναι αγνώστου προελεύσεως. Στον Πίνακα 4 δίνονται οι συντεταγμένες από όπου λήφθηκαν τα δείγματα.

Πίνακας 4: Συντεταγμένες λήψης δειγμάτων που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία.

Δείγμα	Ονομασία	N	E
1	Πέτρα Καλλονής	39°14'59.5"	26°13'34.4"
2	Πέτρα Μιστεγνών	39°13'45.7"	26°25'56.1"
3	Πέτρα Καρύστου	-	-
4	Πέτρα Κλειούς	39°21'07.8"	26°19'17.4"
5	Τεχνητό Μάρμαρο	-	-
6	Γρανίτης Ινδίας	-	-
7	Μάρμαρο Άγιαξ Δράμας	-	-
8	Μάρμαρο Τουρκίας	-	-
9	Τσιμέντο 1	38°22'28.6"	24°03'42.8"
10	Πέτρα Στύψης	39°18'26.3"	26°11'58.4"
11	Πέτρα Πετρίου	39°20'14.4"	26°11'57.7"
12	Πέτρα Μολύβου	39°22'13.8"	26°10'50.9"
13	Τούβλο Παλαιού Τύπου	-	-
14	Πέτρα Ερεσού	39°10'50.1"	25°57'03.3"
15	Άμμος Οικοδομής	-	-
16	Τσιμέντο 2	-	-

3.2 Προετοιμασία Δειγμάτων

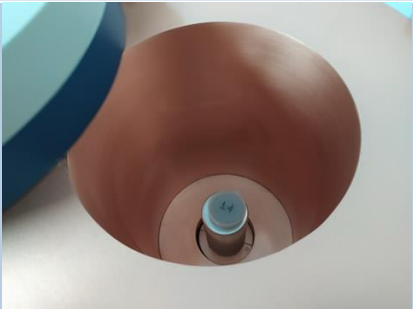
Η συλλογή των τοπικών δειγμάτων έγινε επιτόπια (σύμφωνα με τις συντεταγμένες που δόθηκαν παραπάνω), όλα τα μάρμαρα και ο γρανίτης λήφθηκαν από τοπική εταιρεία επεξεργασίας τους (Παύλου Μιχαήλ Ο.Ε.) και αποτελούν τα προϊόντα με τη μεγαλύτερη κατανάλωση το τελευταίο έτος, ενώ η πέτρα Καρύστου, το τσιμέντο και η οικοδομική άμμος προμηθεύτηκαν από φυσικό κατάστημα. Η οικοδομική άμμος χρησιμοποιείται στη δημιουργία μπετόν με την ανάμειξή της με τσιμέντο, νερό και χαλίκι. Είναι δομικό στοιχείο που υπάρχει σε όλα τα κτήρια, γι' αυτό και επιλέχθηκε να μελετηθεί. Μετά τη συλλογή τους, τα δείγματα μεταφέρθηκαν στο Τμήμα Εργαστηρίων της Διεύθυνσης Τεχνικών Έργων της Περιφέρειας του Βορείου Αιγαίου για την περαιτέρω επεξεργασία τους.

Η μεθοδολογία που περιγράφεται παρακάτω δεν ανήκει σε κάποιο γνωστό πρωτόκολλο ραδιολογικής μέτρησης, αλλά ακολουθούνται τα βήματα άλλων ερευνητών, όπως οι Yong Lee et al. (2019) και οι Papaefthymiou & Gouseti (2008).

Πίνακας 5: Στάδια επεξεργασίας δειγμάτων

Στά- δια	Επεξήγηση	Απεικόνιση
1	Συλλογή Δειγμάτων	
2	Συγκέντρωση των δειγμάτων και “σπάσιμο” σε μικρότερα κομμάτια, με βαριοπούλα και σφυρί	
3	Καθαρισμός δειγμάτων με νερό και σφουγγάρι για την απομάκρυνση ξένων υλών και πετρωμάτων	
4	Τοποθέτηση δειγμάτων σε ταψιά	

5	Ξήρανση δειγμάτων για την απομάκρυνση υγρασίας (180°C, 24h)	
6	Θρυμματισμός δειγμάτων (500 στροφές με 11 μεταλλικές σφαίρες)	
7	Κοσκίνισμα δειγμάτων. (4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.5 mm 0.25 mm)	

8	Τοποθέτηση πούδρας (<0.25 mm) σε σακουλάκια	
9	Ζύγιση σε ζυγό ακριβείας. Ζύγιση του άδειου περιέκτη (πολυπροπυλενίου 40ml). Πλήρωσή του με δείγμα, και εκ νέου ζύγιση για τον υπολογισμό της καθαρής μάζας δείγματος.	
10	Υπολογισμός Πυκνότητας. Ζύγιση μάζας υλικού τοποθετημένου σε ογκομετρικό κύλινδρο, αναγραφή όγκου δείγματος από τη βαθμονόμηση του ογκομετρικού κυλίνδρου, διαίρεση της μάζας με τον όγκο.	
11	Τοποθέτηση του δείγματος στον ανιχνευτή Υ-περκαθαρού Γερμανίου HPGe. Μέτρηση 24 h (86.400 s)	

3.3 Φασματική Ανάλυση Δειγμάτων

Η μέτρηση των δειγμάτων έγινε μέσω της φασματοσκοπίας γ , η οποία έχει καθιερωθεί ως μέθοδος μέτρησης φυσικής και τεχνητής ραδιενέργειας, λόγω της υψηλής διακριτικής ικανότητας των ανιχνευτών Γερμανίου, αλλά και λόγω των πολυκαναλικών αναλυτών (Smith et al., 2015). Μέσω της φασματοσκοπίας γ , προσδιορίζονται ποσοτικά και ποιοτικά πολλά ραδιοϊσότοπα, μιας και τα περισσότερα εξ αυτών, εκπέμπουν ακτινοβολία γ κατά τη μετάπτωσή τους σε σταθερότερα ισότοπα (Buchtel, 2005).

Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η απλή προετοιμασία των δειγμάτων προς μέτρηση, η εύκολη χρήση του ανιχνευτή, καθώς και το γεγονός ότι τα δεδομένα αναλύονται σε προσιτό πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή, χωρίς να χρειάζεται ιδιαίτερη εξειδίκευση από το χειριστή/αναλυτή.

3.3.1 Ανιχνευτής Κρυστάλλου Υπερκαθαρού Γερμανίου (HPGe)

Τα φασματοφωτόμετρα Υπερκαθαρού Γερμανίου λειτουργούν με βάση την αρχή της απορρόφησης φωτονίων από την ύλη. Η ανίχνευση της ακτινοβολίας πραγματοποιείται στο εσωτερικό του κρυστάλλου από Γερμάνιο. Λόγω των μικρών προσμίξεων που πάντα υπάρχουν στους ημιαγωγούς, επηρεάζονται οι ιδιότητές του και σε πολλές περιοχές του κρυστάλλου δημιουργούνται ελεύθερες θέσεις ηλεκτρονίων (οπές), ενώ σε άλλες υπάρχει πλεόνασμα ηλεκτρονίων. Λόγω αυτού, τα ηλεκτρόνια κινούνται στον ημιαγωγό, προσπαθώντας να καλύψουν τις οπές. Η περιοχή αυτή ονομάζεται περιοχή απεμπλουτισμού και για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη περιοχή απεμπλουτισμού εφαρμόζεται μεγάλη ανάστροφη τάση. Κατά την μέτρηση του δείγματος, ο κρύσταλλος Γερμανίου ανιχνεύει τα ηλεκτρόνια που διαφεύγουν από το δείγμα λόγω της αλληλεπίδρασης του με τα φωτόνια που εκπέμπει η πηγή. Ο κύριος λόγος που χρησιμοποιείται το Υπερκαθαρό Γερμάνιο ως ανιχνευτής, είναι το γεγονός ότι είναι ημιαγωγός με πολύ μικρό ποσοστό προσμίξεων και άρα επιτρέπει στο φασματοφωτόμετρο να μετρήσει τις πολύ μικρές ενεργειακές αποκλίσεις στην απορρόφηση του φωτός με μεγάλη ακρίβεια.

Ο ανιχνευτής κρυστάλλου Υπερκαθαρού Γερμανίου (Canberra, 2000), αποτελείται από τον ανιχνευτή, την πηγή εκπομπής, το θάλαμο τοποθέτησης των δειγμάτων και τη θωράκισή τους. Η θωράκιση επιτυγχάνεται μέσω μολύβδινου περιβλήματος. Για τη μέγιστη απόδοση του ανιχνευτή, πρέπει η θερμοκρασία λειτουργίας του να είναι περίπου -200°C , το οποίο επιτυγχάνεται μέσω μηχανισμού ψύξης. Όταν ο κρύσταλλος βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, τα ηλεκτρόνια εξαιτίας των θερμικών κινήσεων μπορεί να απελευθερώνονται και να δημιουργούν θόρυβο στο μετρούμενο σήμα. Η απόδοση του ανιχνευτή ορίζεται ως ο αριθμός των παλμών που μετρήθηκαν από τον ανιχνευτή προς τον αριθμό των σωματιδίων που εκπέμπονται από την πηγή. Η βαθμονόμηση του κάθε ανιχνευτή γίνεται με τη

χρήση πρότυπων δειγμάτων. Η συλλογή των δεδομένων γίνεται με τη χρήση του λογισμικού Genie 2000 Basic Spectroscopy software και η ανάλυσή τους με το λογισμικό SPECTRW. Η ανίχνευση της ακτινοβολίας γ γίνεται με έμμεσο τρόπο, καθώς αυτή αλληλοεπιδρά με το υλικό του ανιχνευτή. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2.3 η ακτινοβολία γ αλληλοεπιδρά με την ύλη με τρεις τρόπους, την σκέδαση Compton, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και τη δίδυμη γένεση. Στις χαμηλές ενέργειες $E_\gamma < 200 \text{ keV}$ υπερισχύει η απορρόφηση με φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, στις μεσαίες $200 \text{ keV} < E_\gamma < 8 \text{ MeV}$ κυριαρχεί η σκέδαση Compton, ενώ στις υψηλές ενέργειες $E_\gamma > 8 \text{ MeV}$ υπερισχύει η δίδυμη γένεση (Χατζησπυρόγλου, 2011). Κατά τη μέτρηση του δείγματος από τον ανιχνευτή, λαμβάνουν χώρα στον κρύσταλλο οι μηχανισμοί απώλειας ενέργειας που προαναφέρθηκαν, προκαλώντας την απώλεια μέρους ή και ολόκληρης της ενέργειας της προσπίπτουσας ακτίνας γ. Η ενέργεια αυτή διοχετεύεται στα ηλεκτρόνια του κρυστάλλου, τα οποία συλλέγονται λόγω της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται στην εσωτερική και εξωτερική πλευρά του κρυστάλλου. Τα ηλεκτρονικά της διάταξης του ανιχνευτή, μετατρέπουν σε παλμό τη συλλογή αυτών των ηλεκτρονίων. Στα δείγματα που αναλύθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν πηγές ακτινοβολίας γ με ενέργειες από 53-1836 keV. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε ενέργειες $E_\gamma < 200 \text{ keV}$ δε λήφθηκαν υπόψη, επειδή ο συγκεκριμένος ανιχνευτής Υπερκαθαρού Γερμανίου δεν έχει βαθμονομηθεί επαρκώς σε αυτές τις ενέργειες. Λόγω αυτού, σε εκείνο το εύρος τιμών παρατηρήθηκε πολύ μεγάλο ποσοστό σφάλματος της μέτρησης. Στο ενεργειακό εύρος που τελικά μελετήθηκαν τα δείγματα $200 \text{ keV} < E_\gamma < 2 \text{ MeV}$, όπως αναφέραμε και παραπάνω, κυριαρχεί η σκέδαση Compton.

Το βασικό χαρακτηριστικό του ανιχνευτή Γερμανίου είναι η απόδοση φωτοκορυφής (Full Energy Peak Efficiency) (Χατζησπυρόγλου, 2011), η οποία σύμφωνα με τον G.F. Knoll, 2000 δίνεται από τη σχέση:

$$E_{point}(E_\gamma) = \frac{N_{\text{φωτοκορυφή}}}{N_{\text{εκπεμπόμενα}}}$$

Όπου:

$N_{\text{φωτοκορυφής}}$: είναι ο ρυθμός κρούσεων [s^{-1}] για φωτόνια που ανιχνεύονται στην φωτοκορυφή

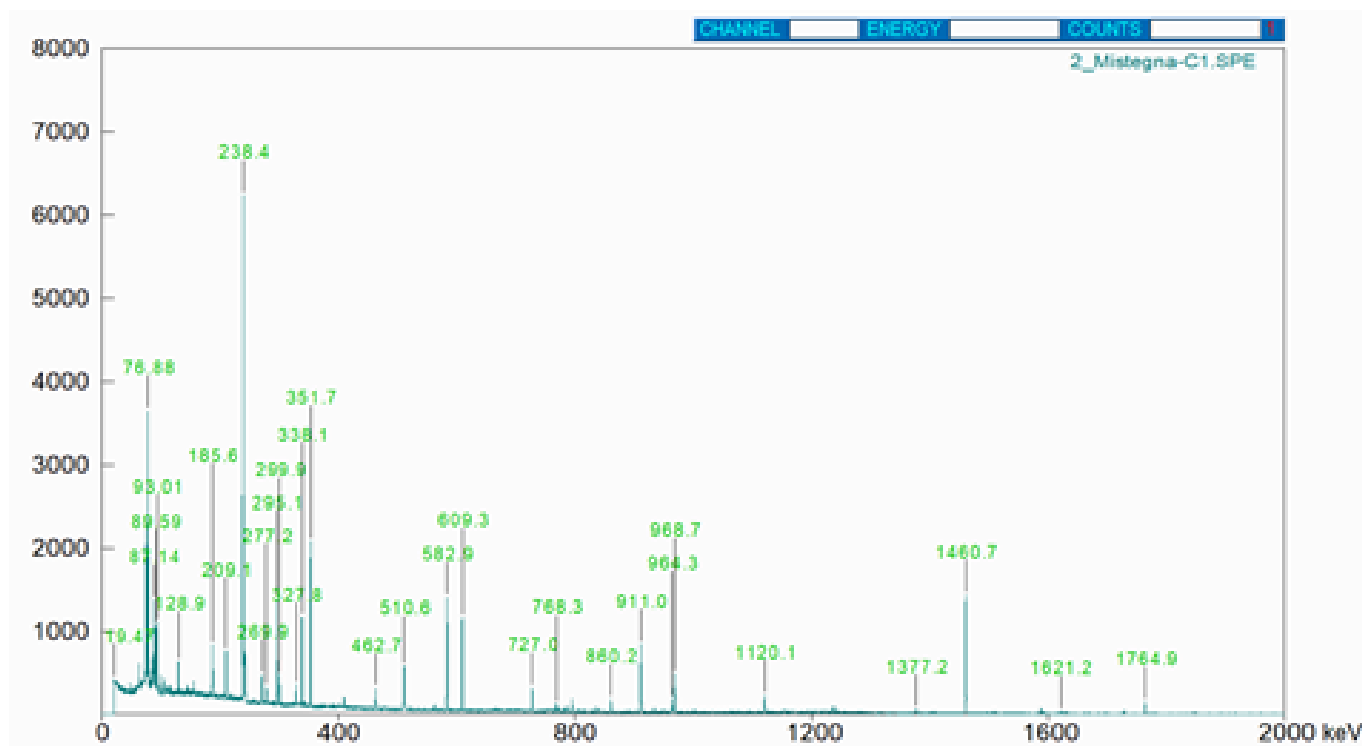
$N_{\text{εκπεμπόμενα}}$: ο ρυθμός εκπομπής φωτονίων [s^{-1}] από σημειακή πηγή σε στερεά γωνία 4π.

Η απόδοση φωτοκορυφής εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή, τη γεωμετρία μέτρησης, τα χαρακτηριστικά του υλικού της πηγής φωτονίων, την κατανομή ενεργότητας στο υλικό και την ενέργεια των εκπεμπόμενων ακτινών γ.

3.3.2 Φασματική Ανάλυση

Τα φάσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις στο φασματοφωτόμετρο υπερκαθαρού Γερμανίου, αναλύθηκαν με τη χρήση του λογισμικού SpectrW Analysis Program, όπως αναφέρθηκε ανωτέρω. Μελετήθηκαν συγκεκριμένα μόνο ραδιοϊσότοπα μέσω των φωτοκορυφών τους με τη βοήθεια του λογισμικού. Οι φωτοκορυφές που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται στον Πίνακα 6 του επόμενου υποκεφαλαίου.

Με τη βοήθεια του λογισμικού υπολογίστηκαν τα γεγονότα (καταγεγραμμένες διασπάσεις) των φωτοκορυφών, από τα οποία εν συνεχεία υπολογίστηκε η συγκέντρωση ενεργότητας του ραδιονουκλιδίου, που αντιστοιχεί στην φωτοκορυφή. Στις περιπτώσεις όπου ένα ραδιοϊσότοπο αποδιεγείροταν σε περισσότερες των μία φωτοκορυφών, η συγκέντρωση ενεργότητας του ραδιοϊσοτόπου υπολογίστηκε ως ο μέσος όρος των συγκεντρώσεων ενεργότητας της εκάστοτε φωτοκορυφής. Για παράδειγμα, ο υπολογισμός της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^{40}K έγινε από την φωτοκορυφή που αντιστοιχεί στα 1.460,8 keV, ενώ η συγκέντρωση ενεργότητας του ^{228}Ac υπολογίστηκε από τη μέση τιμή των συγκεντρώσεων ενεργότητας των φωτοκορυφών στα 338,3 keV και 911,2 keV. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε περιπτώσεις όπου εξασφαλίζεται η ραδιενεργός ισορροπία εντός των ραδιενεργών σειρών, οι συγκεντρώσεις ενεργότητας των διαφόρων ισοτόπων (π.χ. ^{226}Ra) ή της σειράς (π.χ. ^{232}Th) υπολογίστηκε ως η μέση τιμή των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων. Πιο συγκεκριμένα, για τη συγκέντρωση ενεργότητας της σειράς του ^{232}Th χρησιμοποιήθηκαν οι φωτοκορυφές του ^{228}Ac στα 338,3 keV και 911,2 keV, του ^{212}Pb στα 238,6 keV και του ^{208}Tl στα 583,2 keV. Ομοίως ο υπολογισμός της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^{226}Ra έγινε μέσω των φωτοκορυφών του ^{214}Pb στα 295,2 keV και 351,9 keV και του ραδιοϊσοτόπου ^{214}Bi στα 609,3 keV. Στην εικόνα 17 παρουσιάζεται το φάσμα του δείγματος “Πέτρα Μιστεγγών” το οποίο αναλύθηκε και προέκυψαν οι συγκεντρώσεις ενεργότητας των ραδιοϊσοτόπων. Αντίστοιχα είναι τα φάσματα και για τα υπόλοιπα δείγματα.



Εικόνα 16: Φάσμα του δείγματος Πέτρα Μιστεγνών.

3.4 Μετρήσεις φασματοσκοπίας γ

Μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας, τα δείγματα τοποθετήθηκαν στον ανιχνευτή κρυστάλλου Υπερκαθαρού Γερμανίου (HPGe) για 24 ώρες. Από το ενεργειακό φάσμα αναλύθηκαν συγκεκριμένες φωτοκορυφές, που αντιστοιχούν σε ισότοπα φυσικής ραδιενέργειας. Κατά την ανάλυση του φάσματος αφαιρέθηκε το υπόβαθρο (εργαστηρίου και Compton) και λαμβάνοντας υπόψιν την απόδοση του ανιχνευτή, το σχήμα και το μέγεθος του δείγματος, καθώς και το ποσοστό εκπομπής της ακτινοβολίας γ, έγινε αναγωγή από τη μετρούμενη ποσότητα των καταγεγραμμένων φωτονίων στη συγκέντρωση του κάθε ραδιοϊσοτόπου με χρήση του τύπου:

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

Όπου:

A: η συγκέντρωση ενεργότητας (Bq kg⁻¹)

Net area: το ολοκλήρωμα της φωτοκορυφής (αφαιρώντας το ραδιενεργό υπόβαθρο του εργαστηρίου)

I_γ: η πιθανότητα εκπομπής της εκάστοτε ενέργειας

Eff: η απόδοση του ανιχνευτή

Time: η διάρκεια της μέτρησης (s)

Mass: η μάζα του μετρούμενου δείγματος (kg)

Η αβεβαιότητα της συγκέντρωσης της ενεργότητας υπολογίστηκε από τον τύπο:

$$\delta_A = A \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta_{netarea}}{netarea}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{mass}}{mass}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{Eff}}{Eff}\right)^2}$$

Όπου:

δ_A : η αβεβαιότητα της συγκέντρωσης της ενεργότητας (Bq kg⁻¹)

$\delta_{net area}$: η αβεβαιότητα του ολοκληρώματος των γεγονότων

δ_{mass} : η αβεβαιότητα της μάζας του δείγματος (kg)

δ_{Eff} : η αβεβαιότητα της απόδοσης του ανιχνευτικού συστήματος

Όπως περιγράφηκε στο θεωρητικό κομμάτι (παράγραφος 2.1), η παρούσα μελέτη ασχολείται με τις σειρές ²³⁸U και ²³²Th και το ισότοπο ⁴⁰K. Από τις φωτοκορυφές των φασμάτων προκύπτουν οι ενεργότητες των μητρικών ραδιοϊσοτόπων. Στον Πίνακα 6 και 7 παρουσιάζονται οι φωτοκορυφές που μελετήθηκαν και με ποιο ραδιοϊσότοπο συνδέονται, ενώ δίνονται και τα απαραίτητα δεδομένα για την περαιτέρω διεξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 6: Σύνδεση μελετούμενων φωτοκορυφών με τα ραδιοϊσότοπα και επεξήγηση.

Ραδιενεργά ισότοπα	Φωτοκορυφές (keV)	Επεξήγηση
²²⁶ Ra	²¹⁴ Pb : 295,2 351,9 ²¹⁴ Bi : 609,3	Θεωρούμε πως υπάρχει ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ μητρικού (²²⁶ Ra) και θυγατρικών πυρήνων (²¹⁴ Pb, ²¹⁴ Bi)
Σειρά ²³² Th	²²⁸ Ac : 338,3 911,2 ²¹² Pb : 238,6 ²⁰⁸ Tl : 583,2	Θεωρούμε πως υπάρχει ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ μητρικού (²³² Th) και θυγατρικών πυρήνων (²²⁸ Ac, ²¹² Pb, ²⁰⁸ Tl)
⁴⁰ K	⁴⁰ K : 1460,8	
¹³⁷ Cs	¹³⁷ Cs : 661,7	Εκτός ορίου ανίχνευσης του ανιχνευτή Υπερκαθαρού Γερμανίου HPGe λόγω χαμηλών συγκεντρώσεων.

Στην σειρά ²³²Th θεωρούμε πως υπάρχει ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ του μητρικού πυρήνα ²³²Th και των θυγατρικών του ²²⁸Ac, ²¹²Pb και ²⁰⁸Tl, το οποίο επιτυγχάνεται όταν ο μητρικός πυρήνας ²³²Th έχει πολύ μεγάλο χρόνο ημιζωής σε σχέση με αυτούς των θυγατρικών πυρήνων. Στη σειρά του ²³⁸U αντί-

στοιχα, θεωρούμε πως υπάρχει ισορροπία για τα ραδιοϊσότοπα ^{238}U και το ^{234}Th επειδή και πάλι ο χρόνος ημιζωής του μητρικού πυρήνα είναι πολύ μεγαλύτερος (τεσσεράμισι δισεκατομμύρια) από το χρόνο ημιζωής του θυγατρικού (είκοσι τέσσερις ημέρες). Επίσης, στη σειρά του ^{238}U θεωρούμε πως ισχύει ισορροπία μεταξύ των ραδιοϊσοτόπων ^{226}Ra μέχρι και το ^{214}Bi για το λόγο που αναφέρθηκε και πιο πάνω. Για να θεωρήσουμε ισορροπία σε όλη την σειρά του ^{238}U , θα έπρεπε να μπορούμε να μετρήσουμε τη συγκέντρωση ενεργότητας των ραδιοϊσοτόπων ^{234}Th και εάν είναι ίση με τη συγκέντρωση ενεργότητας του ^{214}Bi , τότε να θεωρηθεί η σειρά σε ισορροπία. Λόγω, όμως, της χαμηλής απόδοσης του ανιχνευτή του εργαστηρίου στην ενεργειακή περιοχή του ^{234}Th (63-93 keV), δεν μπορεί να ληφθεί ως ορθή η συγκέντρωση ενεργότητας που προκύπτει για αυτό το ραδιοϊσότοπο, με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να εξαγάγουμε συμπέρασμα ως προς τη συνολική ισορροπία της σειράς ή όχι. Ως εκ τούτου, στο εξής, στην παρούσα εργασία θα αναφέρεται η συγκέντρωση ενεργότητας του ^{226}Ra και όχι όλης της σειράς του ^{238}U , ενώ στην περίπτωση του ^{232}Th αντιπροσωπεύεται όλη η σειρά του ^{232}Th .

Πίνακας 7: Στον πίνακα παρουσιάζονται τα ραδιονουκλίδια (Nuclide) που χρειάστηκαν για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων, οι ενέργειες εκπομπής τους (E), η πιθανότητα διάσπασής τους (I), η απόδοση του ανιχνευτή Γερμανίου στην κάθε ενέργεια (Eff), το υπόβαθρο στην κάθε ενέργεια (BKG) και το σφάλμα υποβάθρου (d BKG).

E (keV)	Nuclide	I	Eff	BKG (cps)	d BKG (cps)
295,2	^{214}Pb	0,1842	0,0656	0,0010	0,0009
351,9	^{214}Pb	0,3560	0,0572	0,0021	0,0008
609,3	^{214}Bi	0,4549	0,0373	0,0016	0,0005
338,3	^{228}Ac	0,1127	0,0590	0,0001	0,0009
911,2	^{228}Ac	0,2580	0,0273	0,0001	0,0004
238,6	^{212}Pb	0,4360	0,0773	0,0041	0,0009
583,2	^{208}Tl	0,3036	0,0386	0,0014	0,0004
661,7	^{137}Cs	0,8510	0,0350	0,0003	0,0004
1460,8	^{40}K	0,1066	0,0191	0,0007	0,0004

Έπειτα γίνεται προσδιορισμός του ρυθμού ραδιενεργού δόσης, σύμφωνα με τον τύπο UNSCEAR (UNSCEAR, 2000) με βάση τη συγκέντρωση ενεργότητας των ραδιοϊσοτόπων που αναλύθηκαν.

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

Όπου:

C_{K-40} , C_{U-238} , C_{Th-232} : οι συγκεντρώσεις ενεργότητας των ραδιοϊσοτόπων [Bq kg^{-1}]

$A=0,0417$, $B=0,462$, $\Gamma=0,604$: οι συντελεστές εξωτερικής δόσης για το κάθε ισότοπο [$\text{nGy} \cdot \text{h}^{-1} \text{ per Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$].

Η αβεβαιότητα υπολογίστηκε από τον τύπο:

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

Επειδή δεν έχουμε γνώση της συγκέντρωσης του ^{238}U για όλους τους λόγους που αναφέρθηκαν ανωτέρω, εισαγάγουμε τη συγκέντρωση ενεργότητας του ^{226}Ra στον ανωτέρω τύπο.

Κεφάλαιο Τέταρτο

Αποτελέσματα και Συζήτηση

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων των δειγμάτων και οι αβεβαιότητες που ακολουθούν την ανάλυση.

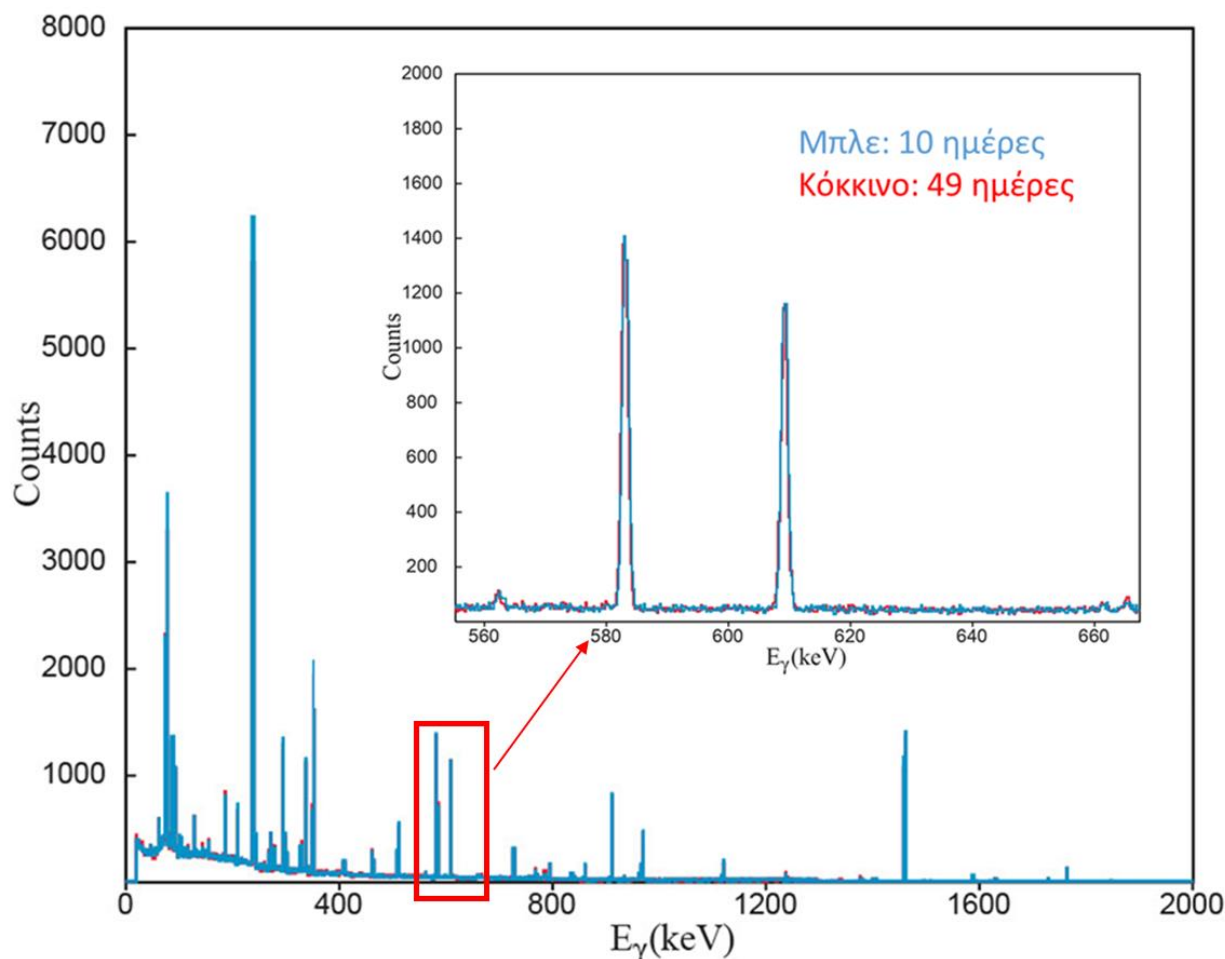
4.1 Έλεγχος Ισορροπίας

Η μέθοδος ανάλυσης των φασμάτων που προέκυψαν από τα δείγματα περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.4.2. Ελέγχθηκε ότι στα δείγματα είχε επέλθει ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ του ^{226}Ra , ^{214}Bi και ^{214}Pb . Αυτό έγινε με τη μέτρηση ενός δείγματος σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, 10 ημέρες και 40 ημέρες από την παρασκευή του δείγματος. Στον Πίνακα 8 εμφανίζονται οι ενεργότητες των ραδιοϊσοτόπων ^{214}Bi και ^{214}Pb , οι οποίες παραμένουν σταθερές με το χρόνο, άρα μπορούμε να υποθέσουμε ότι υπάρχει ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ του ^{222}Rn και ^{214}Bi και ^{214}Pb και κατ' επέκταση μεταξύ ^{226}Ra και των ^{214}Bi και ^{214}Pb . Μεταξύ του ^{226}Ra και των ^{214}Bi και ^{214}Pb παρεμβάλλεται το ραδιοϊσότοπο ^{222}Rn , το οποίο είναι σε αέρια μορφή και μπορεί να διαφύγει εάν το δοχείο που περικλείει το δείγμα δεν είναι αεροστεγώς κλειστό ή η ποσότητα του ^{222}Rn που παράγεται έξω από τους κόκκους του δείγματος είναι μεγάλη και διαφεύγει του δοχείου. Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι δεν έχει διαφύγει το ^{222}Rn και έχουν παραχθεί τα ^{214}Bi και ^{214}Pb , μετρήθηκαν τα δείγματα νωρίς (δύο χρόνοι ημιζωής του ^{222}Rn), όπου ό,τι αέριο Ραδόνιο υπήρχε είχε διαφύγει λόγω της επεξεργασίας (π.χ. κονιορτοποίηση) των δειγμάτων και δεν είχαν προλάβει να παραχθούν τα θυγατρικά ^{214}Bi και ^{214}Pb και πολύ αργότερα (άνω των 5 χρόνων ημιζωής του ^{222}Rn), όπου υποτίθεται έχει επέλθει ραδιενεργός ισορροπία. Το πείραμα αυτό, δηλαδή η μέτρηση των ίδιων συγκεντρώσεων ενεργότητας των ^{214}Bi και ^{214}Pb σε διάφορες χρονικές στιγμές επιβεβαιώνουν κι άλλες μελέτες δομικών υλικών, που συμπεραίνουν πως οι συγκεντρώσεις ενεργότητας των ραδιοϊσοτόπων ^{232}Th και ^{226}Ra μπορούν να προσδιοριστούν έμμεσα μετά από μια εβδομάδα με τη χρήση γ φασματοσκοπίας και δε χρειάζεται να μεσολαβήσει αναμονή 30 ημερών (Yong Lee et al., 2019).

Πίνακας 8: Έλεγχος επίτευξης ισορροπίας των δειγμάτων

Ημ. Παρασκευής	Μέτρησης	Χρονική απόσταση (ημέρες)	Ενεργότητα ^{214}Bi [Bq kg ⁻¹]	Ενεργότητα ^{214}Pb [Bq kg ⁻¹]	Ενεργότητα ^{226}Ra [Bq kg ⁻¹]
1/3/23	13/3/23	10	105 ± 2	110 ± 2	110 ± 2
	18/4/23	49	105 ± 2	110 ± 2	110 ± 2

Στο Διάγραμμα 2 παρουσιάζονται οι δυο μετρήσεις του δείγματος “Πέτρα Μιστεγνών” και είναι εμφανές πως υπάρχει απόλυτη ταύτιση, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι είχε επέλθει ραδιενεργός ισορροπία μεταξύ του ^{226}Ra , ^{214}Bi και ^{214}Pb .



Διάγραμμα 2: Φάσματα των μετρήσεων του δείγματος “Πέτρα Μιστεγνών”. Με μπλε η μέτρηση μετά από 10 ημέρες και με κόκκινο η μέτρηση μετά από 49 ημέρες.

4.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δειγμάτων. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται σε πίνακες, γραφήματα και χάρτη για την ευκολότερη σύγκριση των ευρημάτων, αλλά και τη χωρική παρουσίαση των ευρημάτων.

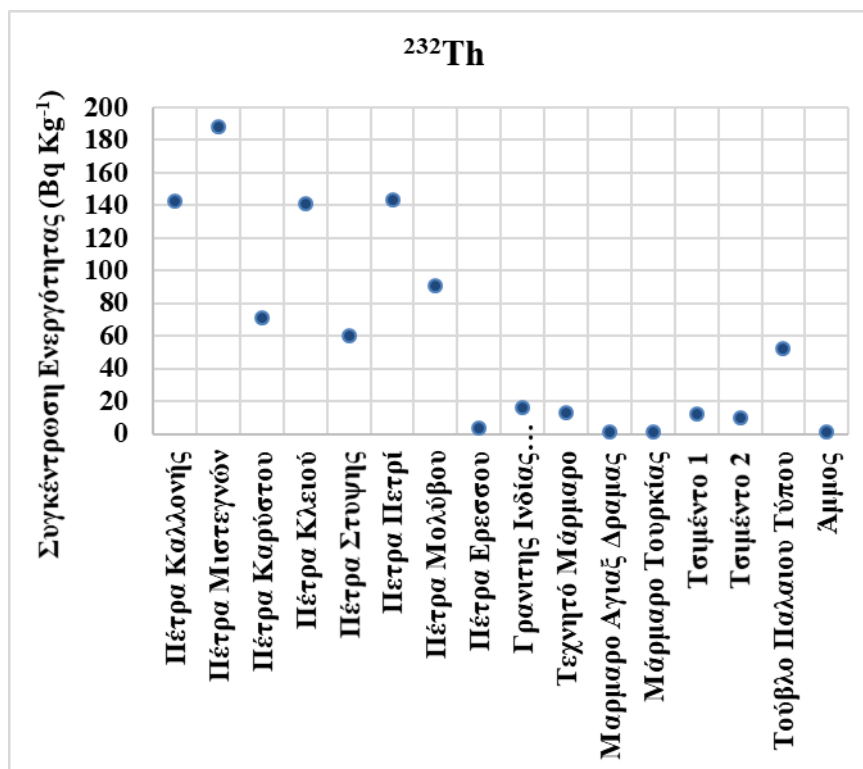
4.2.1 Συγκέντρωση Ενεργότητας

Στον Πίνακα 9 και στα διαγράμματα 2-4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων ενεργότητας για τα θυγατρικά ραδιοϊσότοπα σε κάθε δείγμα, καθώς και η αβεβαιότητα της κάθε μέτρησης. Οι συγκεντρώσεις ενεργότητας που παρουσιάζονται αφορούν στην σειρά του ^{232}Th , το ^{226}Ra και ^{40}K . Για τους λόγους που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3.4 στα αποτελέσματα παρουσιάζονται οι

συγκεντρώσεις ενεργότητας του ^{226}Ra και όχι συνολικά της σειράς ^{238}U . Το ραδιοϊσότοπο ^{137}Cs δεν ανιχνεύτηκε σε κανένα από τα δείγματα, κάτι που ήταν αναμενόμενο μιας και το ισότοπο αυτό είναι τεχνητό και συνήθως υπάρχει σε υλικά όπου έχουν «επιμολυνθεί» με ^{137}Cs λόγω φυσικών διεργασιών που το μετέφεραν σε ατμόσφαιρα, υδρόσφαιρα και στην επιφάνεια της λιθόσφαιρας. Τα πετρώματα προέρχονται από το εσωτερικό του φλοιού της Γης επομένως δεν έχουν δεχθεί τεχνητά ισότοπα λόγω φυσικών διεργασιών. Οι σχετικές αβεβαιότητες της συγκέντρωσης ενεργότητας της σειράς του ^{232}Th , του ^{226}Ra και του ^{40}K ήταν 3%, 2.3% και 2.3%, αντιστοίχως.

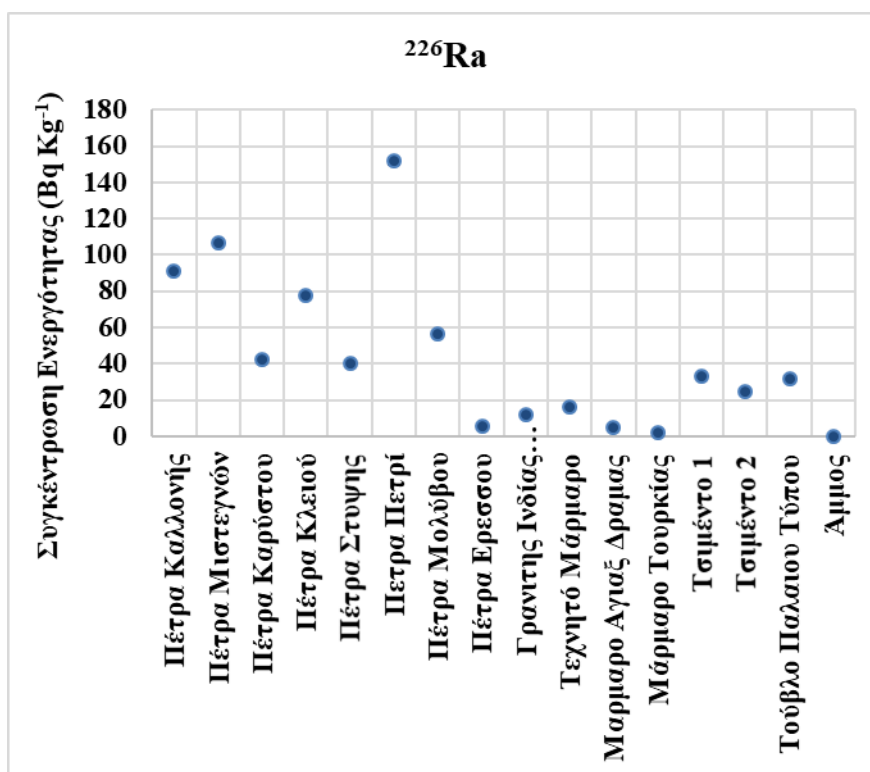
Πίνακας 9: Συγκέντρωση ενεργότητας ραδιοϊσοτόπων ανά δείγμα [Bq kg^{-1}]. MDA: Minimum Detectable Activity, Ελάχιστη Ανιχνεύσιμη Συγκέντρωση Ενεργότητας λόγω της μεθοδολογίας που ακολουθείται.

	Σειρά ^{232}Th			^{226}Ra			^{40}K		
Πέτρα Καλλονής	140	±	2	90	±	1	1050	±	13
Πέτρα Μιστεγνών	190	±	2	105	±	1	1370	±	15
Πέτρα Καρύστου	70	±	1	40	±	1	1120	±	12
Πέτρα Κλειούς	140	±	2	80	±	1	990	±	12
Πέτρα Στύψης	60	±	1	40	±	1	550	±	10
Πέτρα Πετρίου	140	±	2	150	±	2	680	±	11
Πέτρα Μολύβου	90	±	2	55	±	1	1150	±	12
Πέτρα Ερεσού	4	±	1	5	±	1	40	±	5
Γρανίτης Ινδίας	15	±	1	10	±	1	200	±	6
Τεχνητό Μάρμαρο	10	±	1	15	±	1	80	±	6
Μάρμαρο Άγιαξ Δράμας	1,6	±	0,8	5	±	1	10	±	4
Μάρμαρο Τουρκίας	1,1	±	0,7	2.3	±	0.6	< mda	±	<md a
Τσιμέντο 1	10	±	1	30	±	1	130	±	7
Τσιμέντο 2	10	±	1	25	±	1	120	±	7
Τούβλο Παλαιού Τύπου	50	±	2	30	±	1	600	±	11
Άμμος Οικοδομής	1,1	±	0,7	< mda	±	<mda	10	±	4



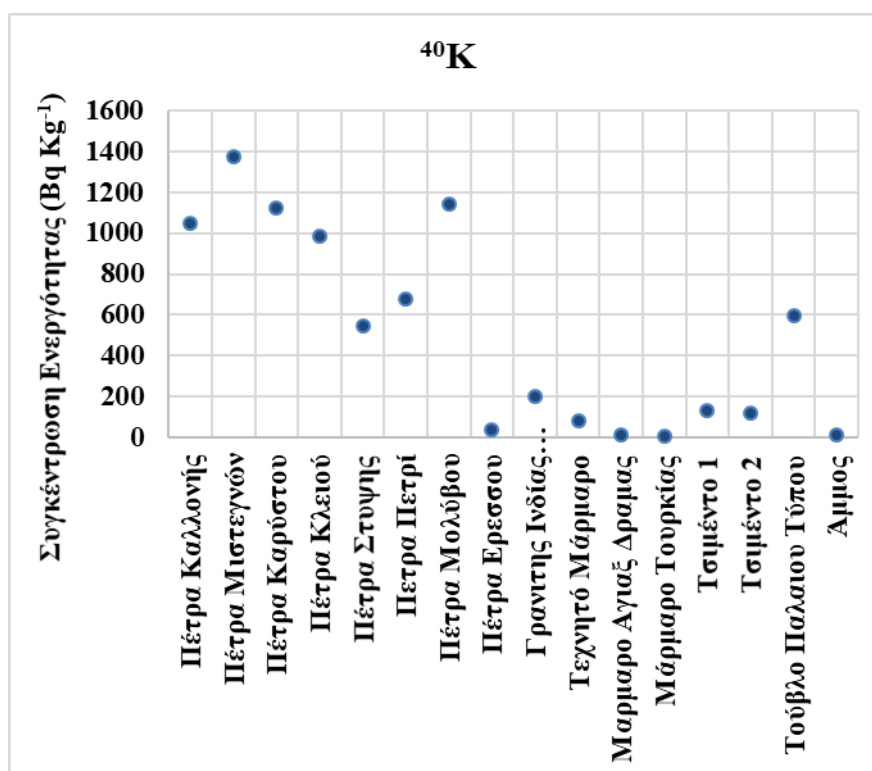
Διάγραμμα 3: Συγκεντρώσεις ενεργότητας της ραδιενεργού σειράς ^{232}Th σε οικοδομικά υλικά.

Στο Διάγραμμα 3 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις ενεργότητας της σειράς του ^{232}Th διαφόρων οικοδομικών υλικών. Οι συγκεντρώσεις ενεργότητας κυμάνθηκαν από 1 Bq kg^{-1} έως 190 Bq kg^{-1} , με τις μέγιστες συγκεντρώσεις να καταγράφονται στα οικοδομικά υλικά που προέρχονται από τα διάφορα πετρώματα (δηλ. πέτρες) που εντοπίζονται στο νησί, πλην της πέτρας Ερεσού. Το μεγαλύτερο τμήμα των περιοχών αυτών, καλύπτεται από μεταλλικούς σχηματισμούς με κυριότερα τα ηφαιστειακά πετρώματα Νοεγενούς ηλικίας. Πιθανώς η χαμηλότερη μέτρηση στην πέτρα της Ερεσού να οφείλεται στις γεωλογικές διαφοροποιήσεις που αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.1.1. Απεναντίας τα υπόλοιπα οικοδομικά υλικά και πιο συγκεκριμένα τα μάρμαρα, τα τσιμέντα, τα τούβλα και η άμμος, εμφανίζουν συγκεντρώσεις ενεργότητας μέχρι και 19 φορές χαμηλότερες από εκείνες των προαναφερθέντων πετρωμάτων, με τις τιμές τους να κυμαίνονται από 1 Bq kg^{-1} έως 55 Bq kg^{-1} .



Διάγραμμα 4: Συγκέντρωση της ενεργότητας του ^{226}Ra σε οικοδομικά υλικά.

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4 οι συγκεντρώσεις ενεργότητας του ^{226}Ra παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτές της σειράς του ^{232}Th , δηλαδή οι πέτρες της Λέσβου χαρακτηρίζονται από αρκετά υψηλότερες τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες δομικών υλικών. Οι συγκεντρώσεις ενεργότητας στα δείγματα κυμάνθηκαν από 5 Bq kg⁻¹ (Ερεσός) έως 150 Bq kg⁻¹ για τις πέτρες και από 2 Bq kg⁻¹ έως 30 Bq kg⁻¹ για τα υπόλοιπα δομικά υλικά. Ανάμεσα στις πέτρες, η πέτρα Ερεσού είναι φτωχή σε ^{226}Ra , κάτι που παρατηρήθηκε και για τη σειρά του ^{232}Th , με τις συγκεντρώσεις ενεργότητας να είναι 8-30 φορές χαμηλότερες από τις υπόλοιπες πέτρες. Από την άλλη, η πέτρα του Πετρίου είναι πλούσια σε ^{226}Ra μιας και εκεί βρέθηκε η υψηλότερη τιμή (150 Bq kg⁻¹) σε σχέση με τις υπόλοιπες πέτρες. Στα υπόλοιπα δομικά υλικά ο μέσος όρος της συγκέντρωσης ενεργότητας του ^{226}Ra βρέθηκε τέσσερις φορές χαμηλότερη συγκριτικά με τον μέσο όρο των δειγμάτων πέτρας.



Διάγραμμα 5: Συγκέντρωση της ενεργότητας του ραδιοϊσοτόπου ^{40}K στα δομικά υλικά.

Τέλος στο Διάγραμμα 5, όπου παρουσιάζονται οι τιμές της συγκέντρωσης της ενεργότητας για το ραδιοϊσότοπο ^{40}K και πάλι επιβεβαιώνεται πως τα δείγματα πέτρας (πλην της Ερεσού) είναι πλούσια σε ^{40}K , μιας και οι συγκεντρώσεις είναι αισθητά υψηλότερες (περίπου έξι φορές) από τα υπόλοιπα δομικά υλικά. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν στην πέτρα Μιστεγγών ($1370\ Bq\ kg^{-1}$). Γενικά, στις πέτρες, οι τιμές κυμάνθηκαν από $40\ Bq\ kg^{-1}$ έως $1370\ Bq\ kg^{-1}$, ενώ για τα υπόλοιπα δομικά υλικά από $5\ Bq\ kg^{-1}$ έως $600\ Bq\ kg^{-1}$. Ενδιαφέρουσα είναι η υψηλότερη τιμή που παρουσιάζει το δείγμα του “Τούβλου Παλαιού Τύπου”, συγκριτικά με τα υπόλοιπα δομικά υλικά όσο αφορά στο ^{40}K καθώς και στη σειρά ^{232}Th . Αξίζει να αναφερθεί ότι η πέτρα Ερεσού χαρακτηρίζεται από τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις ενεργότητας τόσο για το ^{40}K όσο και για τη σειρά του ^{232}Th και το ^{226}Ra σε σχέση με τις υπόλοιπες πέτρες.

4.2.2 Ρυθμός Απορροφούμενης Δόσης

Στον Πίνακα 10 παρουσιάζεται η αναγωγή των αποτελεσμάτων σε απορροφούμενη δόση ραδιενέργειας, σύμφωνα με τον τύπο UNSCEAR (UNSCEAR, 2000) με βάση τις συγκεντρώσεις ενεργότητας των ραδιοϊσοτόπων που αναλύθηκαν, όπως περιεγράφηκε στην παράγραφο 3.3. Στην περίπτωση της

οικοδομικής άμμου, ο υπολογισμός έγινε με χρήση μόνο των συγκεντρώσεων ενεργότητας των ^{40}K και ^{232}Th . Η παραδοχή αυτή έγινε λόγω μη ανίχνευσης συγκέντρωσης ενεργότητας για το ^{226}Ra , μιας και η συγκέντρωση ενεργότητας του ^{226}Ra ήταν κάτω του ορίου ανιχνευσιμότητας της μεθόδου και κρίθηκε πως η συνεισφορά του στη συνολικά απορροφούμενη δόση ραδιενέργειας θα ήταν αμελητέα. Στον Πίνακα 11 χωρίζονται τα δείγματα σε δυο κατηγορίες (πέτρες και μη πέτρες) για την ευκολότερη σύγκρισή τους, στον Πίνακα υπολογίζονται οι Μ.Ο. των δυο κατηγοριών, συγκεκριμένα το «Μ.Ο.Δειγ.Πέτρας» αφορά στο μέσο όρο των δειγμάτων πέτρας δόμησης, ενώ το «Μ.Ο. Λοιπ.Δ.Υ» αφορά στο μέσο όρο των λοιπών δομικών υλικών. Η αβεβαιότητα του υπολογισμού του ρυθμού δόσης είναι 1%.

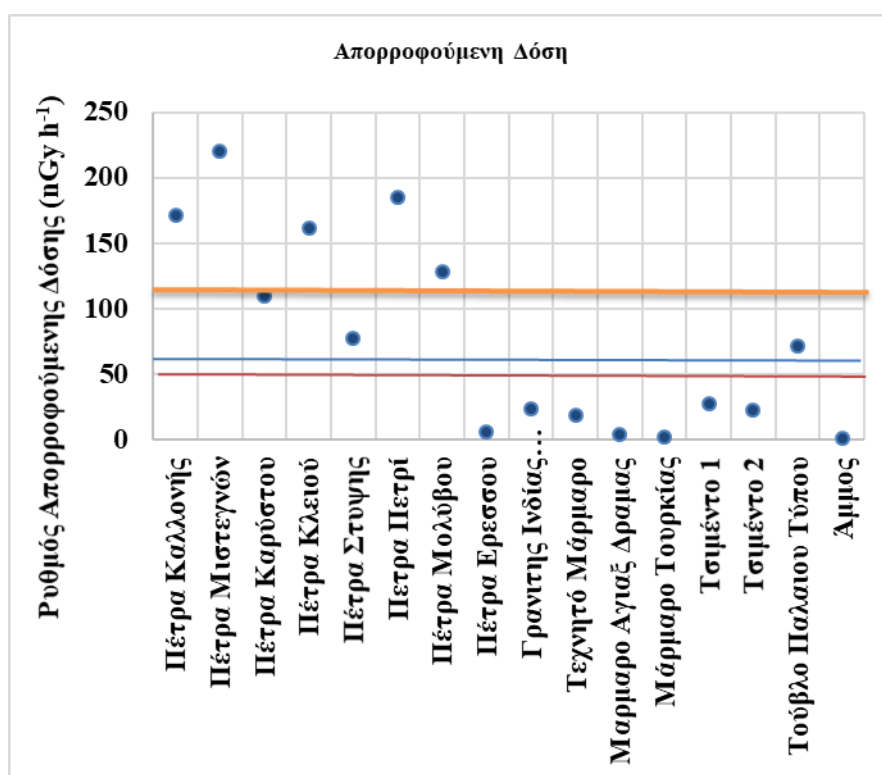
Πίνακας 10: Αναγωγή αποτελεσμάτων σε δόση, τα δείγματα χωρίστηκαν σε δυο κατηγορίες πέτρες δόμησης και μη πέτρες

Δείγμα	Ρυθμός Δόσης [nGy h^{-1}]	Αβεβαιότητα
Πέτρα Καλλονής	170	1
Πέτρα Μιστεγνών	220	1
Πέτρα Καρύστου	110	1
Πέτρα Κλειούς	160	1
Πέτρα Στύψης	80	1
Πέτρα Πετρίου	185	1
Πέτρα Μολύβου	130	1
Πέτρα Ερεσού	6	1
Μ.Ο. Δειγ.Πέτρας	132	1
Γρανίτης Ινδίας	25	1
Τεχνητό Μάρμαρο	20	1
Μάρμαρο Άγιαξ Δράμας	4	1
Μάρμαρο Τουρκίας	2	1
Τσιμέντο 1	30	1
Τσιμέντο 2	20	1
Τούβλο Παλαιού Τύπου	70	1
Άμμος Οικοδομής	1	1
Μ.Ο Λοιπ.Δ.Υ.	21	1

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 10, είναι εμφανές πως ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης στην περίπτωση της πέτρας της Λέσβου είναι αισθητά μεγαλύτερος. Για τα δείγματα πέτρας, ο Μ.Ο. που προκύπτει είναι 132 nGy h^{-1} , με το δείγμα της πέτρας Ερεσού να εμφανίζει και πάλι τη χαμηλότερη τιμή (6 nGy h^{-1}), ενώ τα υπόλοιπα δείγματα να κυμαίνονται από 80 nGy h^{-1} έως 220 nGy h^{-1} .

¹. Στα υπόλοιπα δομικά υλικά, οι τιμές κυμαίνονται από 1 nGy h^{-1} έως 71 nGy h^{-1} και ο μέσος όρος τους διαμορφώνεται στα 21 nGy h^{-1} . Έτσι προκύπτει πως χρησιμοποιώντας ως δομικό υλικό την πέτρα, λαμβάνουμε περίπου 6 φορές μεγαλύτερη δόση συγκριτικά με τα άλλα δομικά υλικά.

Στο Διάγραμμα 6 παρουσιάζεται ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης (σε nGy h^{-1}) για κάθε σημείο δειγματοληψίας. Για την Ελλάδα, η αναμενόμενη τιμή είναι 39 nGy h^{-1} (κόκκινη γραμμή στο διάγραμμα), ο Παγκόσμιος Μέσος Όρος (Μ.Ο.) είναι 51 nGy h^{-1} (πράσινη γραμμή στο διάγραμμα) (UNSCEAR, 2000) ενώ η πορτοκαλί είναι ο συνιστώμενος μέγιστος ρυθμός απορροφούμενης δόσης (114 nGy h^{-1}) στα δομικά υλικά σύμφωνα με τη ΙΑΕΑ (2019), η οποία δίνει τον ρυθμό ισοδύναμης δόσης. Στην περίπτωση της ακτινοβολίας γ ο ρυθμός ισοδύναμης δόσης είναι ίσος με τον ρυθμό απορροφούμενης δόσης αφού ο συντελεστής στάθμισης ακτινοβολίας (W_R) ισούται με ένα, όπως περιεγράφηκε στην παράγραφο 2.5 και στον πίνακα 1. Αξίζει να σχολιαστεί πως όλα τα τοπικά δείγματα πέτρας – πλην της Ερεσού- έχουν υψηλότερο ρυθμό απορροφούμενης δόσης από την αναμενόμενη τιμή στην Ελλάδα, αλλά και από τον παγκόσμιο Μ.Ο. Μάλιστα στην περίπτωση της πέτρας Μιστεγνών (που είναι και από τις πιο διαδεδομένες τοπικές επιλογές) προκύπτει πως η απορροφούμενη δόση είναι 5,5 φορές υψηλότερη από την αναμενόμενη δόση στην Ελλάδα.



Διάγραμμα 6: Σχηματική απεικόνιση ρυθμού απορροφούμενης δόσης ανά σημείο δειγματοληψίας. Η κόκκινη γραμμή είναι η αναμενόμενη τιμή στην Ελλάδα (39 nGy h^{-1}), η μπλε είναι ο παγκόσμιος Μ.Ο. (51 nGy h^{-1}), ενώ η πορτοκαλί είναι ο συνιστώμενος μέγιστος ρυθμός απορροφούμενης δόσης για τα δομικά υλικά σύμφωνα με την ΙΑΕΑ (114 nGy h^{-1}).

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία ένας γρανιτικός όγκος (πετρώματα) αναμένεται να συνεισφέρει στο περιβάλλον τουλάχιστον πενταπλάσια φυσική ραδιενέργεια απ' ότι θα συνεισέφερε ένας αντίστοιχος όγκος μαρμάρου (Μπασιάκος, 2011). Συγκρίσιμα με αυτά του γρανίτη είναι τα επίπεδα φυσικής ραδιενέργειας που εκλύονται και από άλλα αργιλοπυριτικά πετρώματα, π.χ. σχιστόλιθοι, αρκετά ηφαιστειακά, πυριτικοί ψαμμίτες και μερικές άργιλοι (Μπασιάκος, 2011). Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας συμβαδίζουν με τη βιβλιογραφία, μιας και ο Μ.Ο. του ρυθμού απορροφούμενης δόσης στα πετρώματα είναι 132 nGy h^{-1} , ενώ ο Μ.Ο. του ρυθμού απορροφούμενης δόσης των μαρμάρων είναι 9 nGy h^{-1} , δηλαδή τα πετρώματα έχουν 15 φορές μεγαλύτερο ρυθμό απορροφούμενης δόσης ραδιενέργειας απ' ότι τα δείγματα μαρμάρου.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.6, ο συνιστώμενος ρυθμός απορροφούμενης δόσης σύμφωνα με την ΙΑΕΑ είναι 1 mSv yr^{-1} δηλαδή 114 nGy h^{-1} . Επομένως, τα δείγματα πέτρας Καλλονής, Μιστεγνών, Κλειού, Πετρίου και Μολύβου δεν πληρούν τα κριτήρια για την ασφαλή χρήση τους ως δομικά υλικά σύμφωνα με τις υποδείξεις της ΙΑΕΑ (2019) και όταν χρησιμοποιούνται θα πρέπει να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα ανάλογα την περίπτωση.

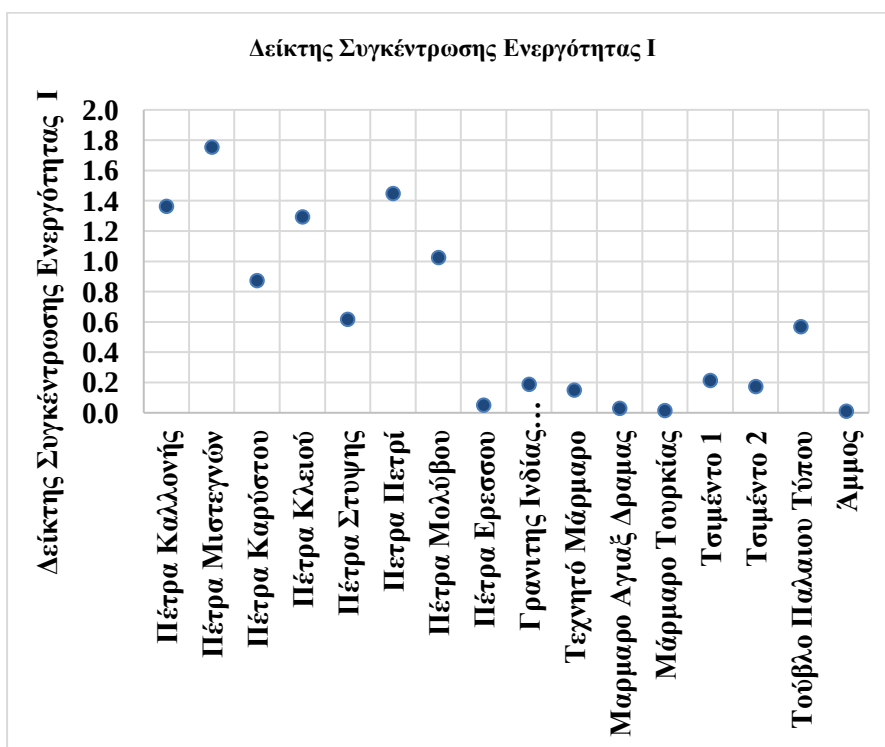
4.2.3 Δείκτης Συγκέντρωσης Ενεργότητας I

Στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δείκτη συγκέντρωσης ενεργότητας (I) για τα δομικά υλικά που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία. Ο υπολογισμός του δείκτη περιγράφηκε στην παράγραφο 2.6. Με σκιαγράφιση παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που είναι άνω των προτεινόμενων ορίων (≤ 1) σύμφωνα με την ΙΑΕΑ. Όπως περιεγράφηκε στον κεφάλαιο 2.6, οι τιμές μικρότερες της μονάδας διασφαλίζουν ότι ο ρυθμός απορροφούμενης δόσης είναι μικρότερος του 1 mSv yr^{-1} .

Πίνακας 11: Δείκτης συγκέντρωσης ενεργότητας (I) των δομικών υλικών της παρούσας μελέτης (αδιάστατο μέγεθος). Τιμή ίση με τη μονάδα αντιστοιχεί σε ρυθμό απορροφούμενης δόσης μικρότερο του 1 mSv yr⁻¹.

Δείγμα	Δείκτης I
Πέτρα Καλλονής	1,4
Πέτρα Μιστεγνών	1,8
Πέτρα Καρύστου	0,9
Πέτρα Κλειούς	1,3
Πέτρα Στύψης	0,6
Πέτρα Πετρίου	1,4
Πέτρα Μολύβου	1,0
Πέτρα Ερεσού	0,1
Γρανίτης Ινδίας	0,2
Τεχνητό Μάρμαρο	0,1
Μάρμαρο Άγιαξ Δράμας	0
Μάρμαρο Τουρκίας	0
Τσιμέντο 1	0,2
Τσιμέντο 2	0,2
Τούβλο Παλαιού Τύπου	0,6
Άμμος Οικοδομής	0

Στον Πίνακα 11 και στο Διάγραμμα 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δείκτη συγκέντρωσης ενεργότητας (I) για τα δομικά υλικά που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη. Είναι εμφανές πως τέσσερα από τα δείγματα είναι άνω του συνιστώμενου ορίου από την ΙΑΕΑ ($I = 1$), ενώ το δείγμα πέτρας Μολύβου βρίσκεται ακριβώς στο όριο. Ο δείκτης συγκέντρωσης ενεργότητας I αποτελεί μια πρώτη ένδειξη για τα επίπεδα ραδιενέργειας στα δομικά υλικά, και η αξιολόγηση πρέπει να γίνεται συνδυαστικά με τον ρυθμό απορροφούμενης ραδιενεργού δόσης. Τα υπόλοιπα δομικά υλικά (πλην των πετρωμάτων) και σε αυτήν την περίπτωση είναι πολύ χαμηλότερα του ορίου και κυμαίνονται από μηδέν έως 0,2 με μοναδική εξαίρεση και πάλι το τούβλο παλαιού τύπου με δείκτη I στα 0,6.



Διάγραμμα 7: Δείκτης συγκέντρωσης ενεργότητας (I) ανά μελετώμενο δομικό υλικό, με πορτοκαλί γραμμή απεικονίζεται το συνιστώμενο όριο από την ΙΑΕΑ.

4.3 Σύγκριση με άλλες μελέτες

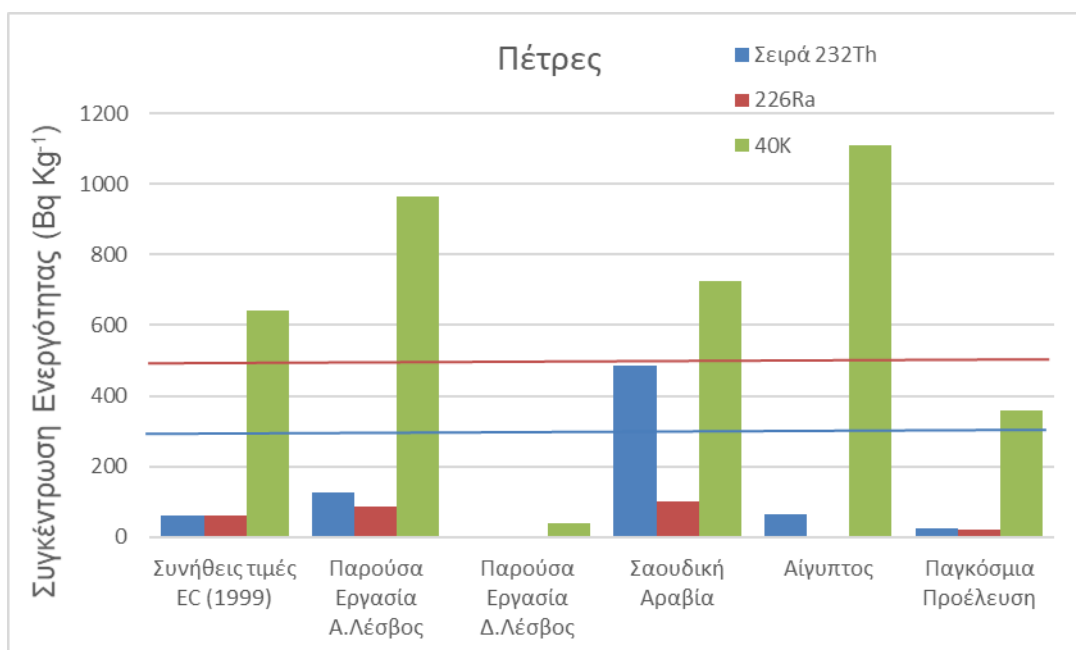
Στο παρόν υποκεφάλαιο γίνεται σύγκριση των συγκεντρώσεων ενεργότητας και του δείκτη συγκέντρωσης ενεργότητας των μελετώμενων ραδιοϊσοτόπων. Αρχικά ανά είδος δομικού υλικού και έπειτα χωρικά, συγκρίνονται τα δείγματα των τοπικών πετρωμάτων με μετρήσεις εδαφικών δειγμάτων (χώματα), ως συγγενή υλικά. Ως δυτική Λέσβος θεωρήθηκε το δείγμα πέτρας Ερεσού, ενώ ως ανατολική Λέσβος θεωρήθηκαν τα δείγματα Καλλονής, Μιστεγών, Κλειούς, Στύψης, Πετρίου και Μολύβου.

4.3.1 Σύγκριση ανά δομικό υλικό

4.3.1.1 Σύγκριση βάσει συγκέντρωσης ενεργότητας

Στο παράρτημα Α παρουσιάζονται στον αναλυτικό πίνακα 16 οι τιμές συγκέντρωσης ενεργότητας, η πηγή απ' όπου αντλήθηκαν τα δεδομένα, καθώς και ο αριθμός των δειγμάτων που μετρήθηκαν για τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων. Τόσο στην μελέτη των δειγμάτων της παρούσας εργασίας, όσο και στις μελέτες απ' όπου αντλήθηκαν δεδομένα, οι μετρήσεις έγιναν με χρήση φασματοφωτόμετρου Υ-περκαθαρού Γερμανίου. Για την ευκολότερη κατανόηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων, στα διαγράμματα 8-12 παρουσιάζεται η απεικόνιση των συγκεντρώσεων ενεργότητας των ραδιοϊσοτόπων ανά κατηγορία που μελετήθηκε. Με κάθετες γραμμές εμφανίζονται τα ανώτατα όρια των συγκεντρώσεων

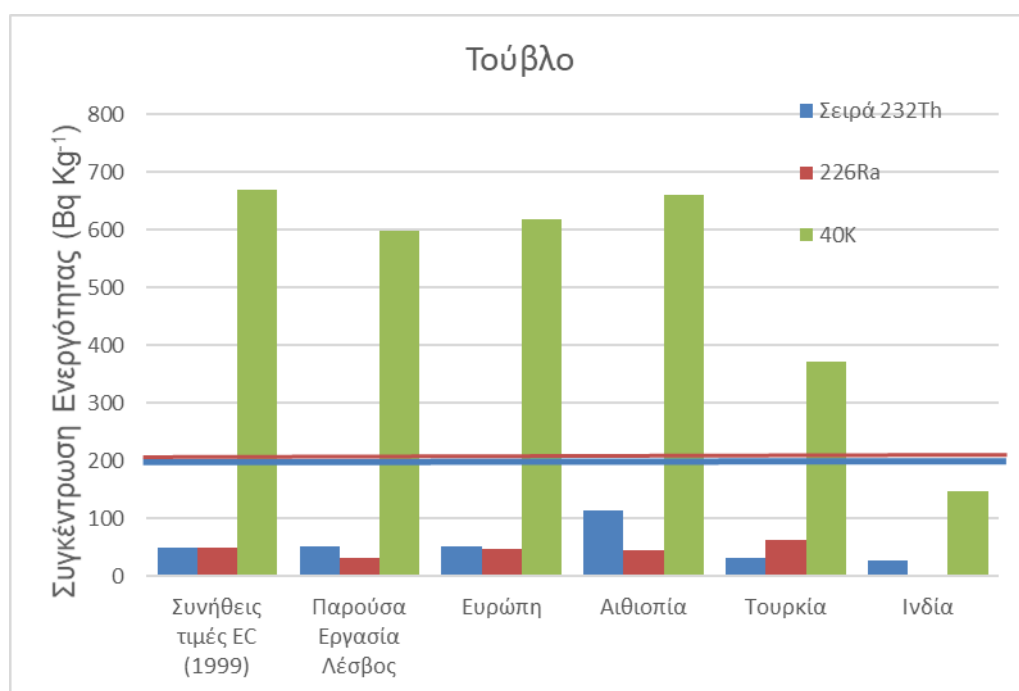
ενεργότητας σύμφωνα με την ΙΑΕΑ, για την ευκολότερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Σε όλες τις περιπτώσεις, η μέγιστη συγκέντρωση ενεργότητας του ^{40}K ήταν εκτός του ορίου των γραφημάτων και δεν απεικονίζεται στα διαγράμματα για να μην αλλοιωθεί η ανάλυσή τους (η τιμή φαίνεται στον πίνακα στο Παράρτημα Α). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν και σε σύγκριση με άλλες μελέτες, στα περισσότερα τοπικά δείγματα που μελετήθηκαν, οι συγκεντρώσεις ενεργότητας των ραδιοϊσοτόπων ήταν αρκετά υψηλότερες από τις μετρήσεις σε άλλες περιοχές του πλανήτη.



Διάγραμμα 8: Σύγκριση της μετρούμενης συγκέντρωσης ενεργότητας (σε Bq kg^{-1}) των ραδιοϊσοτόπων στα πετρώματα ανά βιβλιογραφική πηγή. Η μπλε οριζόντια γραμμή αφορά τη μέγιστη τιμή του ^{232}Th , ενώ η κόκκινη οριζόντια γραμμή αφορά τη μέγιστη τιμή του ^{226}Ra σύμφωνα με την European Commission (1999). Οι παραπομπές που αφορούν στις συγκεντρώσεις ενεργότητας του διαγράμματος βρίσκονται στον πίνακα 16 του παραρτήματος Α.

Στο διάγραμμα 8 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, με άλλες μελέτες καθώς και με τις συνήθεις τιμές αλλά και τις μέγιστες τιμές σύμφωνα με την European Commission (1999). Οι συνήθεις τιμές αφορούν πληθυσμιακά σταθμισμένους μέσους όρους διαφορετικών εθνών, ενώ οι μέγιστες τιμές, είναι οι υψηλότερες τιμές που έχουν ανιχνευθεί σύμφωνα με το European Commission (1999) (υψηλότερες τιμές μπορεί να έχουν ανιχνευθεί σε άλλες μελέτες). Στα τοπικά δείγματα πέτρας, ο Μ.Ο. της Ανατολικής Λέσβου αναφορικά με τη συγκέντρωση ενεργότητας ήταν 120 Bq kg^{-1} , 81 Bq kg^{-1} και 985 Bq kg^{-1} για την σειρά ^{232}Th , και τα ραδιοϊσότοπα ^{226}Ra και ^{40}K , αντιστοίχως. Ενώ, οι συνήθεις τιμές, σύμφωνα με την European Commission (1999), είναι 60 Bq kg^{-1} , 60 Bq kg^{-1} και 640 Bq kg^{-1} , αντιστοίχως, δηλαδή οι μετρήσεις της παρούσας εργασίας είναι 35-50% υψηλότερες από τις συνήθεις τιμές, αλλά μέχρι και 75% χαμηλότερες από τις μέγιστες τιμές που ορίζει η European Commission (1999),

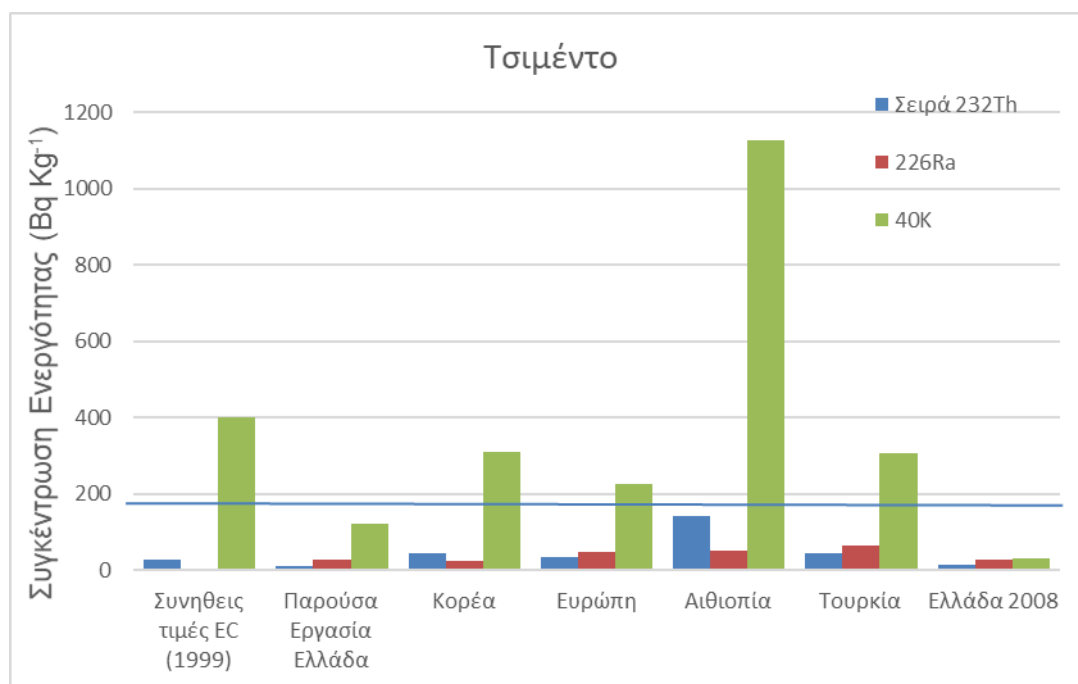
310 Bq kg⁻¹, 500 Bq kg⁻¹ και 4000 Bq kg⁻¹, αντίστοιχα. Από το διάγραμμα προκύπτει πως στην παρούσα μελέτη η συγκέντρωση ενεργότητας της σειράς ²³²Th ήταν σχεδόν τέσσερις φορές χαμηλότερη απ' ό,τι σε αντίστοιχη μελέτη 24 δειγμάτων στην Σαουδική Αραβία (Fallatah & Khattab, 2023), το ⁴⁰K παρουσιάζει 24% υψηλότερη συγκέντρωση ενεργότητας στην παρούσα εργασία, ενώ το ραδιοϊσότοπο ²²⁶Ra δεν παρουσιάζει διαφορά μεταξύ των δυο μελετών. Ενώ από την μελέτη των Siegesmund et al. (2022) που πραγματοποιήθηκε σε 82 δείγματα παγκόσμιας προέλευσης, προκύπτει πως στην παρούσα μελέτη ανιχνεύτηκε 65, 10 και 15 φορές υψηλότερη συγκέντρωση ενεργότητας στην σειρά ²³²Th, στο ²²⁶Ra και στο ⁴⁰K, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 9: Σύγκριση της μετρούμενης συγκέντρωσης ενεργότητας (σε Bq kg⁻¹) των ραδιοϊσοτόπων σε τούβλα ανά βιβλιογραφική πηγή. Η μπλε οριζόντια γραμμή αφορά τη μέγιστη τιμή του ²³²Th, ενώ η κόκκινη οριζόντια γραμμή αφορά τη μέγιστη τιμή του ²²⁶Ra σύμφωνα με την European Commission (1999). Οι παραπομπές που αφορούν στις συγκεντρώσεις ενεργότητας του διαγράμματος βρίσκονται στον πίνακα 16 του παραρτήματος Α.

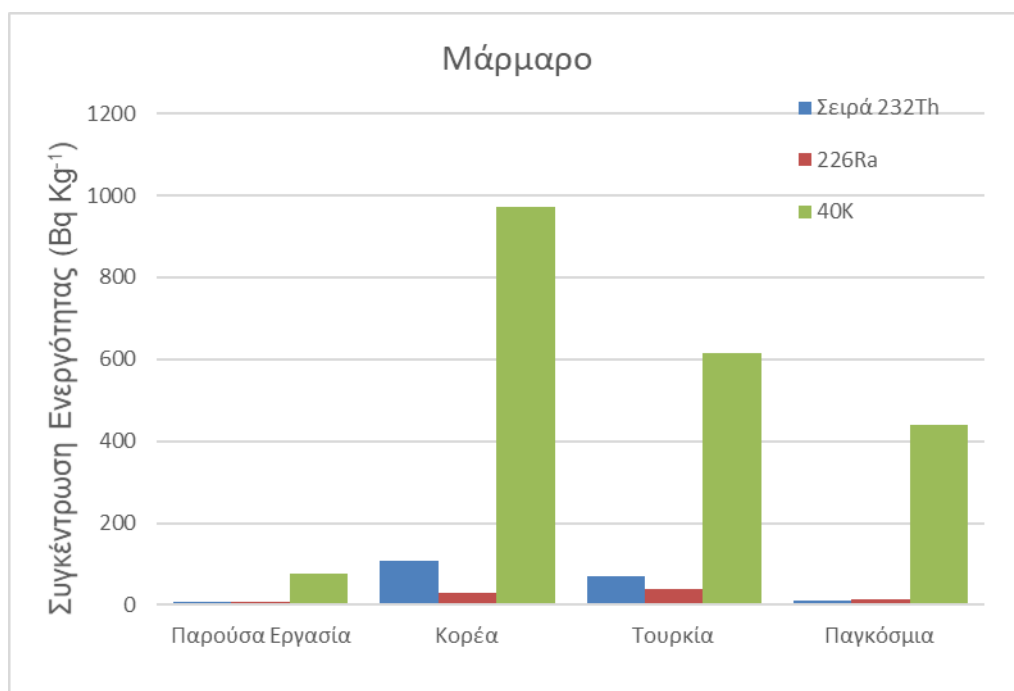
Στην περίπτωση του δείγματος "Τούβλο Παλαιού Τύπου" (Διάγραμμα 9), οι συγκεντρώσεις ενεργότητας που μετρήθηκαν ήταν λίγο χαμηλότερες από τις μετρήσεις άλλων μελετών στην Ευρώπη (συνολικά 1537 δείγματα) από τους Trevisi et al. (2008) και στην Αιθιοπία (ένα δείγμα) από τους Gebremeskel et al. (2022) καθώς και από τις συνήθεις τιμές σύμφωνα με την European Commission (1999). Ενώ σε μελέτη 5 δειγμάτων από τους Premalatha et al. (2021) στην Ινδία, ανιχνεύτηκαν δυο και τέσσερις φορές χαμηλότερες συγκεντρώσεις ενεργότητας στην σειρά ²³²Th και στο ραδιοϊσότοπο ⁴⁰K, αντίστοιχα, απ' ό,τι στην παρούσα μελέτη. Συγκεκριμένα, η συγκέντρωση ενεργότητας της σειράς του ²³²Th στην παρούσα εργασία ήταν 50 Bq Kg⁻¹ με την μέγιστη τιμή που έχει ανιχνευτεί σύμφωνα με την European

Commission (1999) να τίθεται στα 200 Bq kg^{-1} . Αντίστοιχα, η συγκέντρωση ενεργότητας του ^{226}Ra ήταν 30 Bq kg^{-1} με ανώτατη τιμή τα 200 Bq kg^{-1} . Τέλος, η συγκέντρωση ενεργότητας του ^{40}K ανιχνεύτηκε στα 600 Bq kg^{-1} , με ανώτερη μετρούμενη τιμή τα 2000 Bq kg^{-1} (European Commission, 1999).



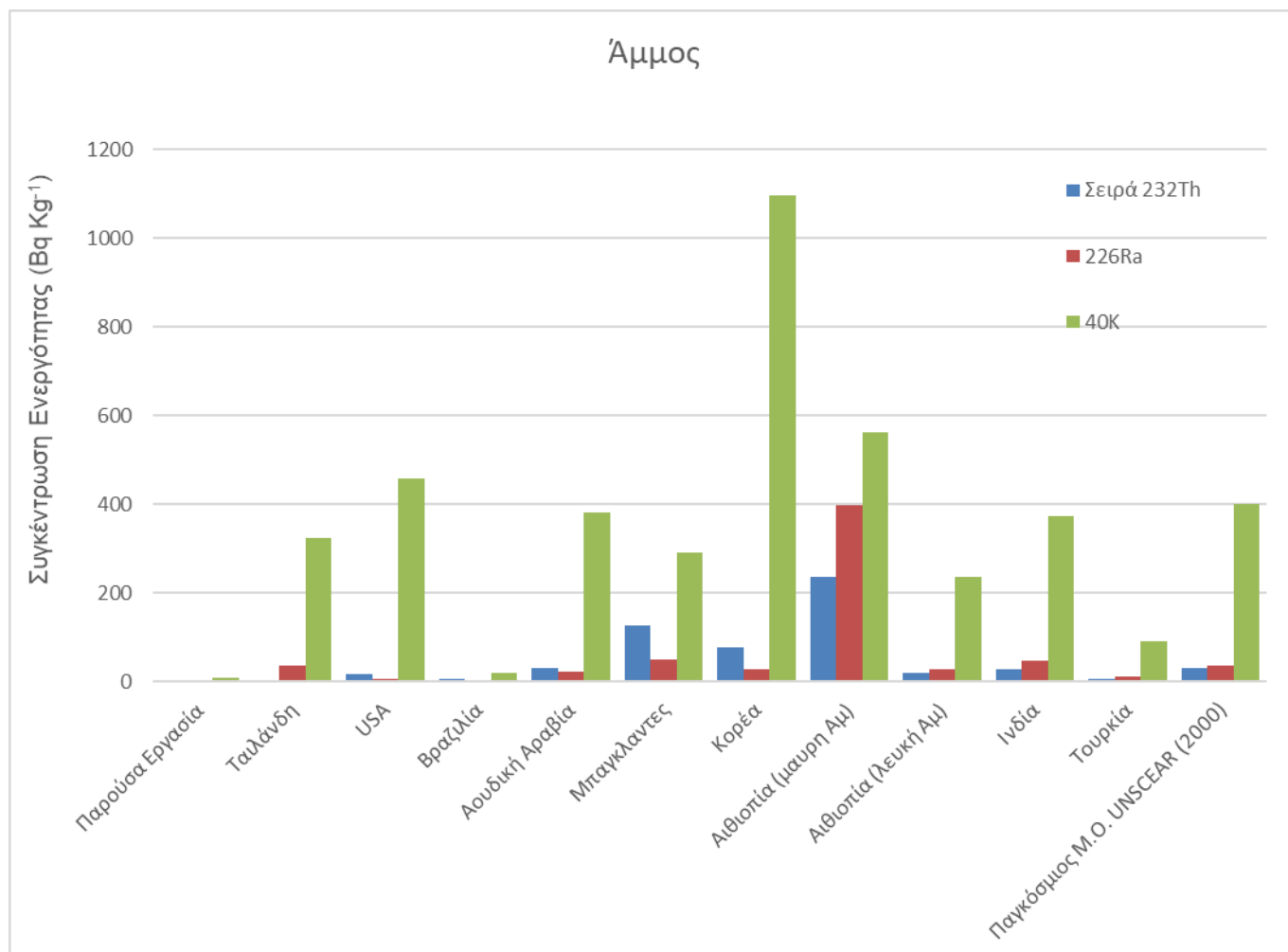
Διάγραμμα 10: Σύγκριση της μετρούμενης συγκέντρωσης ενεργότητας (σε Bq kg^{-1}) των ραδιοϊσοτόπων σε τσιμέντο ανά βιβλιογραφική πηγή. Η μπλε οριζόντια γραμμή αφορά τη μέγιστη τιμή του ^{232}Th σύμφωνα με την European Commission (1999). Οι παραπομπές που αφορούν στις συγκεντρώσεις ενεργότητας του διαγράμματος βρίσκονται στον πίνακα 16 του παραρτήματος Α.

Στο Διάγραμμα 10, για την περίπτωση του τσιμέντου, είναι εμφανές πως οι μετρήσεις των δύο δειγμάτων της παρούσας μελέτης ήταν περίπου τρεις φορές χαμηλότερες από τις συνήθεις τιμές, αλλά χαμηλότερες και από τις υπόλοιπες μελέτες. Συγκεκριμένα, η συγκέντρωση ενεργότητας της σειράς του ^{232}Th στην παρούσα εργασία είναι 11 Bq kg^{-1} με το όριο της European Commission (1999) να τίθεται στα 190 Bq kg^{-1} . Αντίστοιχα, οι συγκέντρωση ενεργότητας του ^{226}Ra είναι 29 Bq kg^{-1} . Τέλος, η συγκέντρωση ενεργότητας του ^{40}K είναι 122 Bq kg^{-1} , με όρια τα 1600 Bq kg^{-1} . Σε μελέτη 1760 δειγμάτων που έγινε στην Ευρώπη από τους Trevisi et al. (2008), προκύπτει πως στην παρούσα μελέτη ανιχνεύτηκαν τρεις, δυο και δυο φορές χαμηλότερες τιμές συγκέντρωσης ενεργότητας για την σειρά ^{232}Th και για τα ραδιοϊσότοπα ^{226}Ra και ^{40}K , αντίστοιχα. Διαφορά εντοπίζεται στη μέτρηση του ραδιοϊσοτόπου ^{40}K στα 122 Bq kg^{-1} , συγκριτικά με παλαιότερη μελέτη στην Ελλάδα, όπου η συγκέντρωση ήταν 32 Bq kg^{-1} (Papaefthymiou & Gouseti, 2008), δηλαδή στην παρούσα μελέτη ανιχνεύτηκε τέσσερις φορές υψηλότερη συγκέντρωση ενεργότητας ως προς το ραδιοϊσότοπο ^{40}K .



Διάγραμμα 11: Σύγκριση της μετρούμενης συγκέντρωσης ενεργότητας (σε Bq kg⁻¹) των ραδιοϊσοτόπων σε μάρμαρο ανά βιβλιογραφική πηγή. Οι παραπομπές που αφορούν στις συγκεντρώσεις ενεργότητας του διαγράμματος βρίσκονται στον πίνακα 16 του παραρτήματος Α.

Στα τέσσερα δείγματα μαρμάρου, που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, η συγκέντρωση ενεργότητας είναι 33% και 88% χαμηλότερη από τις παγκόσμιες τιμές για την σειρά ²³²Th, και για το ραδιοϊσότοπο ⁴⁰K σύμφωνα με τα δεδομένα των Akour & Shakhathreh (2022). Συγκεκριμένα οι συγκεντρώσεις ενεργότητας στην παρούσα μελέτη κυμάνθηκαν από 2 Bq kg⁻¹ έως 107 Bq kg⁻¹, 2 Bq kg⁻¹ έως 38 Bq kg⁻¹ και από 75 Bq kg⁻¹ έως 973 Bq kg⁻¹ για τη σειρά του ²³²Th, το ²²⁶Ra και το ⁴⁰K, αντίστοιχα. Μεγάλη διαφορά παρουσιάζει η μέτρηση του δείγματος “Μάρμαρο Τουρκίας” του ραδιοϊσοτόπου ⁴⁰K, όπου στην παρούσα μελέτη είναι αρκετά χαμηλότερη (5 Bq kg⁻¹) απ’ ότι σε αντίστοιχη μελέτη μαρμάρων στην Τουρκία (Turhan et al., 2021), η οποία βασίστηκε σε περιορισμένο πλήθος μαρμάρων. Συγκεκριμένα η μελέτη των Turhan et al. (2021) πραγματοποιήθηκε σε οκτώ δείγματα μαρμάρων Τουρκίας, η μέση τιμή συγκέντρωσης της ενεργότητας του ⁴⁰K ήταν 614 Bq kg⁻¹, δηλαδή 123 φορές υψηλότερη από το δείγμα “μάρμαρο Τουρκίας” της παρούσας εργασίας, με ελάχιστη τιμή τα 13 Bq kg⁻¹ και μέγιστη τα 1044 Bq kg⁻¹. Παρατηρούμε, λοιπόν, πως υπάρχει μεγάλη απόκλιση στην μετρούμενη συγκέντρωση ενεργότητας στα δείγματα μαρμάρων Τουρκίας. Σε μελέτη 2 δειγμάτων που έγινε στην Κορέα από τους Yong Lee et al. (2019), προκύπτει πως στην παρούσα μελέτη ανιχνεύτηκαν δεκατρείς, τρεις και δεκατρείς φορές χαμηλότερες τιμές συγκέντρωσης ενεργότητας για την σειρά ²³²Th και για τα ραδιοϊσότοπα ²²⁶Ra και ⁴⁰K, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 12: Σύγκριση της μετρούμενης συγκέντρωσης ενεργότητας (σε Bq kg⁻¹) των ραδιοϊσοτόπων σε άμμο ανά βιβλιογραφική πηγή. Οι παραπομπές που αφορούν στις συγκεντρώσεις ενεργότητας του διαγράμματος βρίσκονται στον πίνακα 16 του παραρτήματος Α.

Τέλος, στο δείγμα άμμου που μελετήθηκε, οι συγκεντρώσεις ενεργότητας που μετρήθηκαν ήταν πολύ χαμηλότερες συγκριτικά με άλλες χώρες, αλλά και συγκριτικά με τον Παγκόσμιο Μ.Ο. σύμφωνα με την UNSCEAR (2000). Συγκεκριμένα, στο δείγμα οικοδομικής άμμου που μελετήθηκε στην παρούσα μελέτη, η συγκέντρωση ενεργότητας ήταν 1 Bq kg⁻¹, κάτω από το όριο ανιχνευσιμότητας της μεθόδου, και 10 Bq kg⁻¹ για τα ραδιοϊσότοπα της σειράς ²³²Th, ²²⁶Ra και ⁴⁰K αντίστοιχα. Σε μελέτη 223 δειγμάτων που πραγματοποιήθηκε στην Ταϊλάνδη από τους Sola et al. (2021) προέκυψε πώς η συγκέντρωση ενεργότητας του ⁴⁰K είναι 46 φορές υψηλότερη απ' ό,τι στην παρούσα μελέτη. Παρομοίως από την μελέτη 2 δειγμάτων στην Κορέα σύμφωνα με τους Yong et al. (2019) προέκυψε 76 και 110 φορές υψηλότερη τιμή συγκέντρωσης ενεργότητας για την σειρά ²³²Th και για το ραδιοϊσότοπο ⁴⁰K απ' ό,τι στην παρούσα μελέτη. Αντίστοιχα σε μελέτη 101 δειγμάτων στην Ινδία από τους Thangam et al. (2022) ανιχνεύτηκε 9

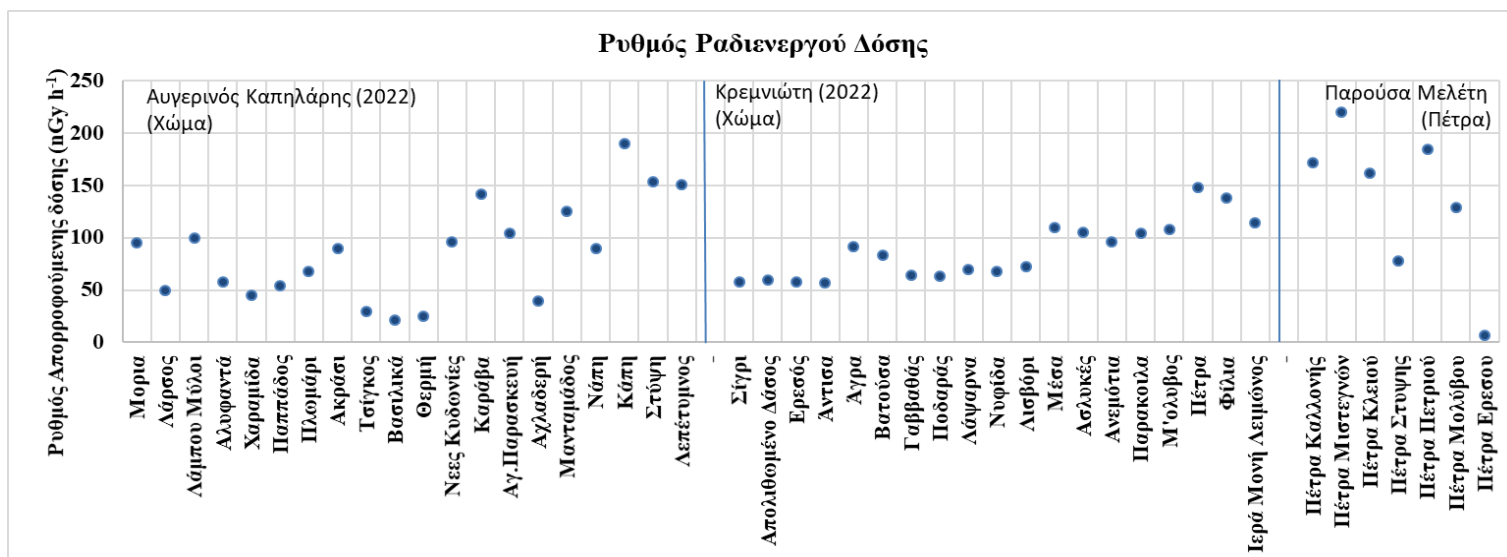
και 37 φορές υψηλότερη συγκέντρωση ενεργότητας για την σειρά ^{232}Th και για το ραδιοϊσότοπο ^{40}K απ' ό,τι στην παρούσα μελέτη.

4.3.1.2 Σύγκριση χρησιμοποιώντας το δείκτη συγκέντρωσης ενεργότητας (I)

Στην περίπτωση του δείκτη συγκέντρωσης ενεργότητας I, η σύγκριση έγινε μόνο για τα δομικά υλικά “πέτρα”, “τούβλο” και “τσιμέντο”, λόγω περιορισμένων δεδομένων στη βιβλιογραφία. Στον πίνακα 17 στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για πολλές περιοχές της Ευρώπης (Trevisi et al., 2008) και με σκούρα διαβάθμιση εμφανίζονται οι μετρήσεις που είναι άνω του προτεινόμενου ορίου σύμφωνα με την ΙΑΕΑ (2019). Στην παρούσα μελέτη, στο τούβλο ο δείκτης έλαβε τιμή 0,6, όπως περίπου και τα δείγματα τούβλων της μελέτης των Trevisi et al. (2008), που κυμάνθηκαν από 0,04 στο Ηνωμένο Βασίλειο μέχρι 1,28 στο Λουξεμβούργο και τη Σουηδία. Στο δείγμα τσιμέντου της παρούσας μελέτης, ο δείκτης συγκέντρωσης ενεργότητας ήταν 0,2 δηλαδή 50% χαμηλότερος από τον μέσο όρο (0,43) του δείκτη των αντίστοιχων δειγμάτων της μελέτης των Trevisi et al. (2008) όπου κυμάνθηκε από 0,06 στη Δανία έως 1,79 στην Ιταλία. Η συνολική εικόνα που προκύπτει από τον πίνακα του Παραρτήματος Β, είναι ότι στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες ο δείκτης συγκέντρωσης ενεργότητας είναι χαμηλότερος από το συνιστώμενο από την ΙΑΕΑ (2019) ($I=1$) και μόνο σε ελάχιστες περιπτώσεις (πχ. τούβλο στο Λουξεμβούργο) οι τιμές είναι υψηλότερες, στην παρούσα μελέτη στα δείγματα τούβλου και τσιμέντου ο δείκτης συγκέντρωσης ενεργότητας είναι κάτω του 1. Στα δείγματα πέτρας όμως της παρούσας μελέτης ο δείκτης συγκέντρωσης ενεργότητας κυμάνθηκε από 0,1 έως 1,8 με τέσσερα στα οκτώ δείγματα να είναι άνω του συνιστώμενου ορίου ($I=1$).

4.3.2 Σύγκριση με άλλα τοπικά δείγματα

Στο παρόν υποκεφάλαιο γίνεται σύγκριση του ρυθμού της απορροφούμενης ραδιενεργού δόσης που υπολογίστηκε στα πετρώματα της περιοχής της Λέσβου, με το ρυθμό απορροφούμενης ραδιενεργού δόσης που υπολογίστηκε σε χώματα της περιοχής της Λέσβου από παλαιότερες μελέτες, των Αυγερινός και Καπηλάρης (2022) και της Κρεμενιώτη (2022). Στο Διάγραμμα 13 παρουσιάζεται ο ρυθμός απορροφούμενης ραδιενεργού δόσης στην ανατολική (Κρεμενιώτη, 2022) και δυτική Λέσβο (Αυγερινός & Καπηλάρης, 2022) σε δείγματα χώματος, καθώς και τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης στα δείγματα πέτρας.



Διάγραμμα 13: Ρυθμός απορροφούμενης ραδιενεργού δόσης σε δείγματα χώματος στην Ανατολική (Κρεμινιώτη, 2022) και Δυτική Λέσβο (Αυγερινός & Καπηλάρης, 2022) και ρυθμός απορροφούμενης ραδιενεργού δόσης σε δείγματα πέτρας της νήσου Λέσβου (παρούσα μελέτη) .

Από το Διάγραμμα 13 είναι φανερό πως οι τιμές που προκύπτουν και από τις τρεις εργασίες [παρούσα, Αυγερινός & Καπηλάρης (2022) και Κρεμινιώτη (2022)] κυμαίνονται στο ίδιο εύρος τιμών, από 10 nGy h⁻¹ έως 220 nGy h⁻¹. Στην ανατολική Λέσβο οι διακυμάνσεις στις τιμές για τα δείγματα χώματος είναι μεγαλύτερες, από 5 nGy h⁻¹ έως 200 nGy h⁻¹, ενώ στη δυτική Λέσβο παρουσιάζεται μικρότερη διακύμανση από 50 nGy h⁻¹ έως 200 nGy h⁻¹. Στις τιμές της παρούσας εργασίας, η διακύμανση για τις πέτρες είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι στα δείγματα χώματος, από 5 nGy h⁻¹ έως 220 nGy h⁻¹. Συγκρίνοντας τα δείγματα ίδιων περιοχών, παρατηρούμε πώς υπάρχουν αποκλίσεις. Π.χ. από το δείγμα χώματος Ερεσού προέκυψε ρυθμός ραδιενεργού δόσης περίπου 50 nGy h⁻¹, ενώ στο δείγμα πέτρας Ερεσού ανιχνεύτηκε ρυθμός ραδιενεργού δόσης μόλις 6 nGy h⁻¹, δηλαδή στο χώμα εντοπίστηκε οκταπλάσιος ρυθμός ραδιενεργού δόσης από ό,τι στην πέτρα. Στην περίπτωση της Στύψης, στο χώμα ανιχνεύτηκε ρυθμός ραδιενεργού δόσης λίγο πάνω από 150 nGy h⁻¹, δηλαδή 46% μεγαλύτερο ρυθμός ραδιενεργού δόσης απ' ό,τι στην πέτρα (80 nGy h⁻¹). Το δείγμα “Πέτρα Μιστεγγών” στην πραγματικότητα προήλθε από τις Νέες Κυδωνίες, επομένως γίνεται σύγκριση με τα αντίστοιχα δείγματα χώματος. Συγκεκριμένα, στο χώμα που προήλθε από τις Νέες Κυδωνίες ανιχνεύτηκε ρυθμός ραδιενεργού δόσης στα 100 nGy h⁻¹, ενώ στην πέτρα Μιστεγγών ανιχνεύτηκε πάνω από τον διπλάσιο ρυθμό ραδιενεργού δόσης, στα 220 nGy h⁻¹. Στην περίπτωση του Μολύβου, στα χώματα εντοπίστηκε ρυθμός ραδιενεργού δόσης λίγο πάνω από 100 nGy h⁻¹, ενώ στο δείγμα πέτρας ο ρυθμός ραδιενεργού δόσης ήταν λίγο υψηλότερος, στα 130 nGy h⁻¹. Τέλος, γίνεται σύγκριση και του δείγματος χώματος Πέτρας με το δείγμα πέτρας από το Πετρί, μιας και απέ-

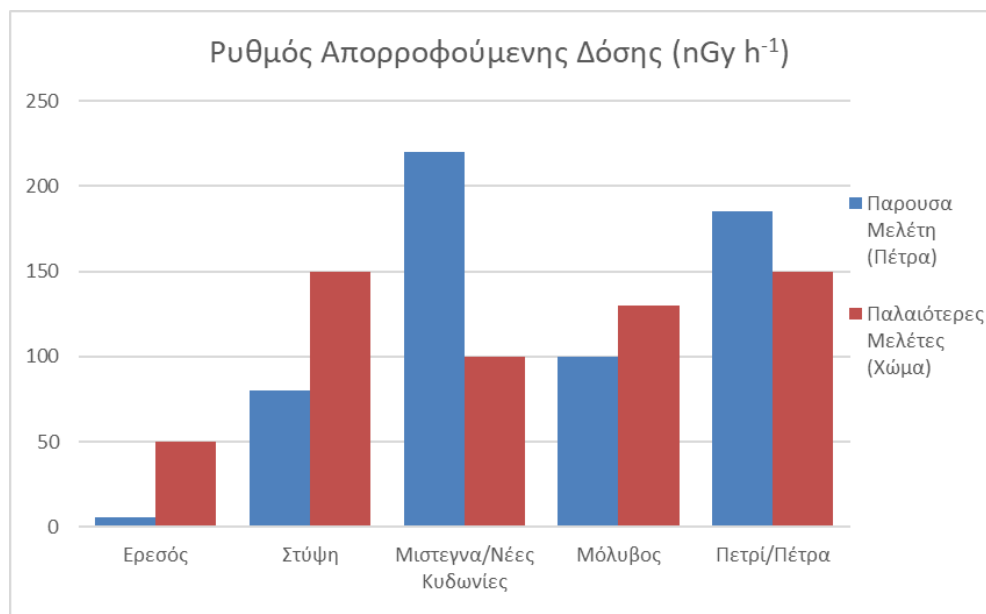
χουν μεταξύ τους μόλις ενάμιση χιλιόμετρο. Συγκεκριμένα ο ρυθμός ραδιενεργού δόσης στο χώμα Πέτρας ήταν 150 nGy h^{-1} , ενώ στην πέτρα από το Πετρί ήταν 185 nGy h^{-1} , δηλαδή απόκλιση 19% μεγαλύτερος. Για την ευκολότερη σύγκριση των τιμών στις κοινές τοποθεσίες δειγματοληψίας, παρουσιάζονται στον Πίνακα 15 μαζί με την απόκλιση που έχουν. Ως απόκλιση θεωρήθηκε η τιμή που προκύπτει από την πράξη $\frac{\text{ΔόσηΠέτρας}-\text{ΔόσηΧώμα}}{\text{ΔόσηΧώμα}}$, η αρνητική απόκλιση υποδεικνύει χαμηλότερο ρυθμό ραδιενεργού δόσης στο δείγμα πέτρας απ' ότι στο δείγμα χώματος.

Πίνακας 15: Σύγκριση δόσης ραδιενέργειας παρούσας μελέτης με παλιότερες για κοινές περιοχές της νήσου Λέσβου.

Περιοχή	Παρούσα μελέτη (πέτρα)	Παλαιότερες μελέτες (χώμα)	Απόκλιση
Ερεσός	6	50	-88%
Στύψη	80	150	-46%
Μιστεγνά/Νέες Κυδωνίες	220	100	120%
Μόλυβος	130	100	23%
Πετρί/Πέτρα	185	150	23%

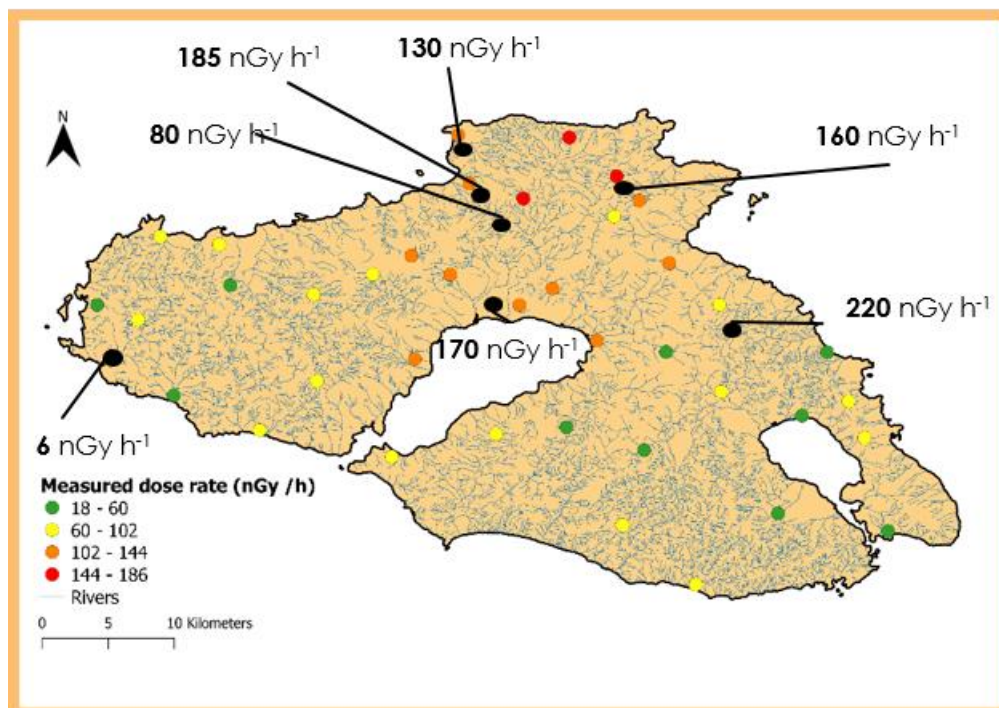
Από το Διάγραμμα 14, αλλά και τον Πίνακα 15, είναι φανερό πως η μεγαλύτερη απόκλιση είναι στην περιοχή της Ερεσού. Αυτό πιθανά να οφείλεται στις γεωλογικές διαφοροποιήσεις που αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.1.1, μπορεί δηλαδή το δείγμα της παρούσας εργασίας να προήλθε από μεταλικά ιζήματα, ενώ το δείγμα της εργασίας Κρεμενιώτη (2022) να αποτελείται από αλπικά και προαλπικά πετρώματα ή αντίστροφα.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει πως η προσπάθεια να συγκριθούν συγγενή υλικά (χώμα και πέτρα) δεν φαίνεται να είναι καλός δείκτης για την διεξαγωγή συμπερασμάτων. Αυτό απορρέει από την μεγάλη απόκλιση που παρουσιάζουν τα δείγματα (πίνακας 15) αλλά και από το γεγονός ότι το χώμα είναι επιφανειακό ενώ οι πέτρες προέρχονται από το εσωτερικό της γης και έχουν δημιουργηθεί με διαφορετικές γεωλογικές και γεωχημικές διεργασίες απ' ότι το χώμα.



Διάγραμμα 14: Σύγκριση ρυθμού ραδιενεργού δόσης σε κοινές περιοχές δειγματοληψίας στην παρούσα μελέτη (πέτρα) με παλαιότερες (χώμα).

Στην Εικόνα 17 γίνεται χωρική απεικόνιση των σημείων δειγματοληψίας της παρούσας μελέτης (μαύρες κουκίδες) και των παλαιότερων μελετών (πράσινες, κίτρινες, πορτοκαλί και κόκκινες κουκίδες), όπου η χρωματική διαβάθμιση αφορά την ταξινόμηση του ρυθμού ραδιενεργού δόσης σε τέσσερις κατηγορίες, ενώ τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης αναγράφονται σε κάθε σημείο για την ευκολότερη σύγκρισή τους.



Εικόνα 17: Χωρική απεικόνιση των σημείων δειγματοληψίας των εργασιών Αυγερινός & Καπηλάρης (2022), Κρεμειώτη (2022) και παρούσα εργασία.

Κεφάλαιο Πέμπτο

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν τα επίπεδα συγκέντρωσης ενεργότητας των ραδιοϊσοτόπων της σειράς ^{232}Th , ^{226}Ra και ^{40}K , καθώς και ο εκτιμώμενος ρυθμός ραδιενεργού δόσης σε δείγματα δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται από την τοπική κοινωνία της Λέσβου. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν, καθώς και ιδέες για μελλοντική έρευνα.

5.1 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων – Συζήτηση

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, τα τοπικά δείγματα πέτρας, τα οποία χρησιμοποιούνται εκτενώς ως δομικά υλικά στην τοπική κοινωνία, παρουσιάζουν αρκετά υψηλότερες τιμές συγκριτικά με όμοια δομικά υλικά άλλης προέλευσης. Μάλιστα σε πέντε από τα οκτώ δείγματα πέρας ανιχνεύτηκαν υψηλότερα επίπεδα ραδιενέργειας από τις συνιστώμενες τιμές της ΙΑΕΑ (2019). Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο ιδιαίτερο γεωμορφολογικό υπόβαθρο του νησιού. Πιο συγκεκριμένα:

Ως προς τη **συγκέντρωση ενεργότητας**:

- τα δείγματα τοπικής πέτρας εμφάνισαν σχεδόν διπλάσιες τιμές από τις συνήθεις τιμές (UNSCEAR, 2000) για τα ραδιοϊσότοπα που μελετήθηκαν.
- στο δείγμα τούβλου παλαιού τύπου, οι τιμές που ανιχνεύτηκαν ήταν πολύ κοντά στις συνήθεις τιμές των ραδιοϊσοτόπων και είναι πολύ χαμηλότερα από τις μέγιστες τιμές που αναφέρονται στην UNSCEAR (2000).
- τα δείγματα τσιμέντου εμφάνισαν τρεις φορές χαμηλότερες από τις συνήθεις τιμές, καθώς και αρκετά χαμηλότερες από τις βιβλιογραφικές μετρήσεις των υπολοίπων περιοχών.
- στα δείγματα μαρμάρου, ανιχνεύτηκαν έως και εκατό τριάντα φορές χαμηλότερες τιμές απ' ότι οι μετρήσεις άλλων εργασιών.
- στο δείγμα άμμου, οι τιμές που προέκυψαν στην παρούσα μελέτη ήταν σημαντικά χαμηλότερες από τις τιμές της βιβλιογραφίας. Πρέπει όμως να ληφθεί υπόψιν πως στις περισσότερες μελέτες η άμμος που μελετήθηκε ήταν παράκτιας προέλευσης (ή αδιευκρίνιστης προέλευσης), ενώ στη δική μας περίπτωση, η οικοδομική άμμος προέρχεται από λατομεία, με θρυμματισμό σαθρών πετρωμάτων.

Ως προς το **ρυθμό ραδιενεργού δόσης**:

- Για τα δείγματα πέτρας, οι υψηλότερες τιμές ανιχνεύτηκαν στην περιοχή των Μιστεγγών, και στις περιοχές γύρω από το υψηλότερο βουνό της Λέσβου (Λεπέτυμνος), με τιμές μέχρι και διπλάσιες από το συνιστώμενο όριο της ΙΑΕΑ (2019). Αντιθέτως, η τιμή του δείγματος που προήλθε από την Ερεσό ήταν χαμηλότερη από το αναμενόμενο -19 φορές μικρότερη

από το συνιστώμενο όριο της ΙΑΕΑ (2019)- παρόλο που η περιοχή έχει πλούσια ηφαιστειακή ιστορία. Η απόκλιση αυτή πιθανόν να οφείλεται στα αλπικά και προαλπικά πετρώματα που εμφανίζονται τοπικά στην περιοχή. Αυτό καθιστά τα περισσότερα δείγματα πέτρας (Καλλονής, Μιστεγνών, Κλειούς, Πετρίου και Μολύβου) μη ιδανικά δομικά υλικά σύμφωνα με τις υποδείξεις της ΙΑΕΑ. Θα μπορούσαν όμως να χρησιμοποιηθούν υπό προϋποθέσεις πχ. να μην είναι εμφανείς οι πετρόχτιστοι τοίχοι, αλλά να καλύπτονται εσωτερικά με τούβλο ή γυψοσανίδα, κλπ. ή να σοβατίζονται. Για την Ελλάδα, η αναμενόμενη τιμή είναι 39 nGy h^{-1} , ενώ ο Παγκόσμιος Μ.Ο είναι 51 nGy h^{-1} (UNSCEAR, 2000), δηλαδή όλα τα τοπικά δείγματα πέτρας (πλην του δείγματος Ερεσού) χαρακτηρίζονται από 2-5 φορές υψηλότερες δόσεις από τις αναμενόμενες τιμές στον Ελλαδικό χώρο και 1-4 φορές υψηλότερες από τον Παγκόσμιο Μ.Ο.

- Οι τιμές για τα υπόλοιπα δομικά υλικά που μελετήθηκαν ήταν αρκετά χαμηλότερες, για τα μάρμαρα περίπου 10 φορές χαμηλότερη από το συνιστώμενο όριο και για το τσιμέντο 5 φορές χαμηλότερη. Και στις δυο περιπτώσεις, οι τιμές είναι χαμηλότερες από τις αναμενόμενες στην Ελλάδα.

Ως προς το δείκτη συγκέντρωσης ενεργότητας I:

- Στα δείγματα πέτρας, στα πέντε από τα οκτώ ο δείκτης ήταν υψηλότερος από το συνιστώμενο όριο της ΙΑΕΑ (2019)
- Τα υπόλοιπα δομικά υλικά που μελετήθηκαν ήταν κάτω από το 60% του συνιστώμενου ορίου της ΙΑΕΑ (2019)

Αξίζει να σχολιαστεί πως με τη μέθοδο του Δείκτη Συγκέντρωσης Ενεργότητας (I), ένα από τα δείγματα πέτρας (Μολύβου) προέκυψε να είναι οριακά, αλλά εντός ορίου (σύμφωνα με την οδηγία της ΙΑΕΑ), ενώ όταν αξιολογήθηκε σύμφωνα με το ρυθμό ραδιενεργού δόσης, η μέτρηση του δείγματος ήταν εκτός ορίου, σύμφωνα πάντα με τις υποδείξεις της ΙΑΕΑ. Επομένως, πρέπει πάντα να γίνεται περαιτέρω έλεγχος όταν κάποιο δείγμα είναι στο άνω όριο με τη μέθοδο του δείκτη συγκέντρωσης ενεργότητας I.

Το τελικό συμπέρασμα της παρούσας εργασίας είναι πως ο ρυθμός ραδιενεργού δόσης, που προκύπτει από τα δομικά υλικά που μελετήθηκαν στην περίπτωση των περισσότερων πετρών, είναι υψηλότερη από την συνιστώμενη και όταν χρησιμοποιούνται ως δομικά υλικά κτηρίων, θα πρέπει να λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα ασφαλείας αναλόγως την κάθε περίπτωση. Για τα υπόλοιπα δομικά υλικά που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία ο ρυθμός ραδιενεργού δόσης που προκύπτει είναι αρκετά χαμηλότερος των καθορισμένων ορίων ασφαλείας, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για την ανοικοδόμηση κτηρίων. Αντίστοιχο συμπέρασμα έχει προκύψει και από άλλες μελέτες, όπως των Ravisankar et al. (2012) και των Kumar et al. (2003).

5.2 Μελλοντικές Ενέργειες

Λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων που εντοπίστηκαν στη βορειοανατολική περιοχή της Λέσβου, θα είχε ενδιαφέρον να ληφθούν και να αναλυθούν περισσότερα δείγματα πετρωμάτων της περιοχής με ταυτόχρονη ταυτοποίηση του είδους του πετρώματος. Να μελετηθεί, δηλαδή, εάν υπάρχει συσχέτιση της φυσικής ραδιενέργειας με το είδος του πετρώματος. Επιπροσθέτως, θα ήταν ενδιαφέρον να μελετηθούν τα πετρώματα στη νότια πλευρά της Λέσβου, απ' όπου επίσης προέρχονται διαδεδομένα τοπικά δομικά υλικά, όπως η πέτρα Πολιχνίτου, αλλά και να ληφθούν κι άλλα δείγματα από το δυτικό κομμάτι της Λέσβου, όπως η πέτρα Άντισσας.

Θα μπορούσαν να μελετηθούν και οι συγκεντρώσεις ενεργότητας για τούβλα νέου τύπου, μιας και χρησιμοποιούνται εκτενώς στις περισσότερες κατοικίες, ακόμα και πυρότουβλων, που συνήθως χρησιμοποιούνται εμφανώς σε παραδοσιακά τζάκια.

Επίσης, θα ήταν πολύ ενδιαφέρον να γίνουν μετρήσεις και σε άλλα δομικά υλικά όπως πλακάκια, laminate, γυψοσανίδες, τσιμεντοσανίδες, αλλά και θερμομονωτικά υλικά (πετροβάμβακας, ορυκτοβάμβακας κ.ά.), τα οποία πλέον τοποθετούνται σε όλα τα κτήρια, κάποια εντός των τοίχων και κάποια σε άμεση επαφή με τους χρήστες του κτηρίου. Αξίζει να μελετηθούν για να προσδιοριστεί σε ποιο βαθμό επηρεάζουν το συνολικό ρυθμό ραδιενεργού δόσης που λαμβάνουν οι χρήστες των κτηρίων, μιας και έχει συζητηθεί στην εμπορική κοινότητα πως πολλά οικονομικότερα υλικά με προέλευση εκτός ΕΕ, συχνά δε συμμορφώνονται με τους κανονισμούς και τα όρια που θέτουν παγκόσμιοι οργανισμοί, επομένως θα ήταν ενδιαφέρων να μελετηθούν ως προς την φυσική τους ραδιενέργεια και πιθανώς και την τεχνητή. Η ραδιενέργεια είναι σημαντικός παράγοντας τον οποίο πρέπει να γνωρίζει ο καταναλωτής για να μπορέσει να επιλέξει συνειδητά.

Τέλος θα μπορούσαν να γίνουν επιτόπιες (in situ) μετρήσεις σε κτήρια που έχουν χτιστεί με το κάθε είδος δομικού υλικού (Πέτρα Στύψης, Πέτρα Ερεσού, κτλ.), ώστε να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων. Για την πραγματοποίηση μιας τέτοιας έρευνας, όμως, θα πρέπει να βρεθούν κτήρια με όσο το δυνατόν παρόμοια χαρακτηριστικά (συνθήκες αερισμού, απουσία κατά το δυνατόν άλλων υλικών, κ.ά.), ώστε να μπορούν να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα μεταξύ τους, αλλά και με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης.

Βιβλιογραφία

Ελληνόγλωσση

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

Αυγερινός, Δ. και Καπηλάρης, Ε., 2022. *Μετρήσεις Ραδιενέργειας στην Ανατολική Λέσβο με Φασματοσκοπία Γάμμα*. (Αδημοσίευτη Πτυχιακή εργασία). Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.

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

Γαζής, Ε.Ν., 2002. Ιονίζουσες Ακτινοβολίες. Παπασωτηρίου Ε., Αθήνα.

Γαρυφαλλίδου, Μ.Δ., χ.χ.. *Μετατροπές Ενέργειας [διαδικτυακά]*. Μυτιλήνη, Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Διαθέσιμο στο: https://www.garyfallidou.org/energeia4/level_1/fission.html [Τελευταία πρόσβαση 24 Μαΐου 2023].

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

Θωμάϊδου, Ε. (2009). *Η ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΛΕΣΒΟΥ*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας.

Κρεμενιώτη, Ο., 2020. *Μετρήσεις ραδιενέργειας στην δυτική Λέσβο με γ-φασματοσκοπία*. (Αδημοσίευτη πτυχιακή εργασία). Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.

Μισαηλίδης, Π., & Νόλη, Φ., 2020. *ΡΑΔΙΟΧΗΜΕΙΑ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΧΗΜΕΙΑ*. Βασικές Αρχές και Εφαρμογές. Έκδοσεις Ζήτη. 1^η Έκδοση

Μουσείο Φυσικής Ιστορίας Απολιθωμένου Δάσους Λέσβου, χ.χ.. *Γεωπάρκα Λέσβου [διαδικτυακά]*. Μυτιλήνη, Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Διαθέσιμο στο: <https://www.lesvosmuseum.gr/geoparko-lesboy> [Τελευταία πρόσβαση 24 Μαΐου 2023].

Μπασιάκος, Ι., 2011. *Η φυσική ραδιενέργεια στα Ελληνικά Βουνά και Σπήλαια*. Εκδρομικά Χρονικά τ.8. Ελληνική Σπηλαιολογική Εταιρεία.

Παπούλας, Ν., 2018. Φαινόμενο Compton [διαδικτυακά]. Μυτιλήνη, Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Διαθέσιμο στο: <https://www.youtube.com/watch?v=YjXgiaczFo8> [Τελευταία πρόσβαση 24 Μαΐου 2023].

Πέλλης, Σ., 2013. *Ραδιενέργεια [διαδικτυακά]*. Μυτιλήνη, Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Διαθέσιμο στο: http://physiclessons.blogspot.com/2013/05/blog-post_1154.html [Τελευταία πρόσβαση 24 Μαΐου 2023].

Τσάμης, Χ., χ.χ. *Περί Ακτινοβολιών [διαδικτυακά]*. Μυτιλήνη, Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Διαθέσιμο στο: <https://users.sch.gr/xtsamis/OkosmosMas/Aktinovolies/Aktinovolies.htm> [Τελευταία πρόσβαση 24 Μαΐου 2023].

Χατζησπυρογλου, Π., 2011. *Χαρακτηρισμός της απόδοσης ανιχνευτή υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe) με την μέθοδο Monte-Carlo*. (Πτυχιακή εργασία)

Ξενόγλωσση

Abate, T., Eshete, S., 2023. *Determination of radioactivity levels in black and white sands used for buildings and estimation of radiation hazards in the north-west region of Ethiopia*. Radiation Protection Dosimetry, 199, 69-78. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncac237>

Akour, A.N. & Shakhathreh, S., 2022. *A study on radiation hazard of granite and marble widely used in Jordan using gamma ray spectrometer*. Atom Indonesia, vol. 48, 67-71. <https://doi.org/10.17146/aij.2022.1184>

Buchtela, K., 2005. RADIOCHEMICAL METHODS | Gamma-Ray Spectrometry, in: Worsfold, P., Townshend, A., Poole, C. (Eds.), *Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition)*. Elsevier, Oxford, pp. 72–79. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00525-2>

Ebbing, D.D., and Gammon, S.D., 1999. ΓΕΝΙΚΗ ΧΗΜΕΙΑ. 6th edition. Εκδοτικός οίκος Τραυλός, Αθήνα

Enterprise Greece, 2022. Βιομηχανικά Προϊόντα [online]. Μυτιλήνη, Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Διαθέσιμο στο: <https://www.enterprisegreece.gov.gr/proothisi-eksagagon/eksagoges-ellinikon-proionton/eksagogikoi-kladoi/viomix-anika-domika-ilika> [Τελευταία πρόσβαση 24 Μαΐου 2023]

European Atlas of Natural Radiation, 2019. Publication Office of the European Union, Luxemburg.

European Commission, 1999. Radiation protection 112. *Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials*. Luxemburg.

Fallatah, O., & Khattab, M.R., 2023. *Evaluation of environmental radioactivity and hazard impacts Saudi Arabia granitic rocks used as building materials*. Minerals, 13,165. <https://doi.org/10.3390/min13020165>

Gebremeskel, D.K., Deressu, T.T., Chaubey, A.K., 2022. *Assessment of natural radioactivity levels and radiological hazards in building materials commonly used in Ethiopian constructions*. International Journal of Environmental Analytical Chemistry. <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2100257>

Hyperphysics, n.d.. *Electron Capture [online]*. Mytilene, University of the Aegean. Available from: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Nuclear/radact2.html> [Last access 24 May 2023].

- Imani, M., Adelikhah, M., Shahrokhi, A., Azimpour, G., Yadollahi, A., Kocsis, E., Toth-Bodrogi, E., Kovacs, T., 2021. *Natural radioactivity and radiological risks of common building materials used in Semnan Province dwellings, Iran*. Environmental Science and Pollution Research. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13469-6>
- International Atomic Energy Agency (IAEA), *NORM in building materials*. Technical Reports Series, 2019.
- Katsikatsos, G., Migiros, G., Triantaphyllis, N., and Mettos, A. (1986). *Geological structure of the internal Hellenides (E. Thessaly – SW. Macedonia, Euboea – Attica – Northern Cyclades Islands and Lesvos)*. I.G.M.E. Geological and Geophysical Research, Sp.Issue, pp.191-212.
- Kilic, O., Belivermis, M., Topcuoglu, S., Cotuk, Y., Coskun, M., Cayir, A., Kucer, R., 2007. *Radioactivity concentrations and dose assessment in surface soil samples from east and south of Marmara region, Turkey*. Radiation Protection Dosimetry 128, 324–330. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncm400>
- Knoll, G. (1999). *Radiation Detection and Measurement*. Journal of Molecular Imaging & Dynamics, Mini Review.
- Kumar, A., Kumar, M., Singh, B., Singh, S., 2003. *Natural activities of the ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K in some Indian building materials*. Radiation Measurements 36:465-469. doi:10.1016/S1350-4487(03)00173-2
- Lofqvist, T., 2019. Norm in building materials. Accredited methods and experience working with testing of NORM in building materials. IAEA GSR Part 3, Sweden.
- My School Lab, n.d.. *Το Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο [online]*. Μυτιλήνη, Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Διαθέσιμο στο: <https://myschlab.com/2020/12/19/photoelectric-effect/> [Τελευταία πρόσβαση 24 Μαΐου 2023].
- Papaefthymiou, H., Gouseti, O., 2008. *Natural radioactivity and associated radiation hazards in building materials used in Peloponnese, Greece*. Elsevier, Radiation Measurements 43:1453-1457. [doi:10.1016/j.radmeas.2008.03.032](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.03.032)
- Premalatha, P.V., Rex, L.K., Bharathkumar, N., Thomas, A.C., 2021. *Assessment of radioactivity in textile sludge incorporated bricks*. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, vol., February 2023, pp. 165-171. [DOI: 10.56042/ijems.v1i1.49714](https://doi.org/10.56042/ijems.v1i1.49714)
- Radenkovic, M., Alshikh, S.M., Andric, V., Miljanic, S., 2008. *Radioactivity of sand from several renowned public beaches and assessment of the corresponding environmental risks*. Journal of the Serbian Chemical Society 74:461-470.
- Ravisankar, R., Vanasundari, K., Chandrasekaran, A., Rajalakshmi, A., Suganya, M., Vijayagopal, P., Meenakshisundaram, V., 2011. *Measurement of natural radioactivity in building materials of Namakkal, Tamil Nadu, India using gamma-ray spectrometry*. Applied Radiation and Isotopes 70:699-704. [doi:10.1016/j.apradiso.2011.12.001](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.12.001)

- Sidique, E., Hassan, S.H.A., Dawoud, M.M., 2022. *Natural radioactivity measurements and radiological hazards evaluation for some Egyptian granites and ceramic tiles*. Sustainability, 14, 14611. <https://doi.org/10.3390/su142114611>
- Siegesmund, S., Pereira, A., Sousa, A., Rucker, S., Kallas, L., Kopka, B., Domingos, f., Seco, S., 2022. *Is there any health danger by radioactivity on the use of dimensional stones?* Environmental Earth Sciences (2022) 81:383. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10483-w>
- Smith, D.R., Nordberg, M., 2015. Chapter 2 - General Chemistry, Sampling, Analytical Methods, and Speciation*, in: Nordberg, G.F., Fowler, B.A., Nordberg, M. (Eds.), Handbook on the Toxicology of Metals (Fourth Edition). Academic Press, San Diego, pp. 15–44. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59453-2.00002-0>
- Sola, P., Injarean, U., Picha, R., Kranrod, C., Kukusamude, C., Tokonami, S., 2021. *Measurement of NORM in Building Materials to Assess Radiological Hazards to Human Health and Develop the Standard Guidelines for Residents in Thailand: Case Study in Sand Samples Collected from Seven Northeastern Thailand Provinces*. Atmosphere, 12,1024. <https://doi.org/10.3390/atmos12081024>
- Stoulos, S., Manolopoulou, M., Papastefanou, C., 2003. *Assessment of natural radiation exposure and radon exhalation from building materials in Greece*. J. Environ. Radioact. 69, 225–240.
- Thangam, V., Rajalakshmi, A., Chandrasekaran, A., Arun, B., Viswanathan, S., Venkatraman, B., Bera, S., 2022. *Determination of natural radioactivity in beach sands collected along the coastal area of Tamilnadu, India using gamma ray spectrometry*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry (2022) 331:1207–1223. <https://doi.org/10.1007/s10967-022-08193-5>
- Trevisi, R., D'Alessandro, M., Nuccetelli, C., Risica, S., 2008. *Radioactivity in building materials : a first overview of the European scenario*. Conference: IRPA 12: 12. International congress of the International Radiation Protection Association (IRPA): Strengthening radiation protection worldwide, 19-24 Oct 2008 Buenos Aires (Argentina).
- Turhan, S., Kurnaz, A., Karatasli, M., 2021. *Evaluation of natural radioactivity levels and potential radiological hazards of common building materials utilized in Mediterranean region, Turkey*. Environmental Science and Pollution Research (2022) 29:10575–10584. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16505-7>
- UNSCEAR. (2000). Sources and Effects of Ionizing Radiation. New York: United Nations Publication
- Wikimedia Commons, 2020. *File: Decay Chain of Thorium-232*. [online] Μυτιλήνη, Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Διαθέσιμο στο: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_Chain_of_Thorium-232.svg [Τελευταία πρόσβαση: 24 Μαΐου 2023].
- Yong Lee, K., Hwang, S., Kim, Y., Ko, K., 2019. *Measurement of NORM in geologic and building materials by pair measurement–gamma spectrometry*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 322:1791–1795.

Young, H.D., 1994. Physics, 8th edition. Εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα.

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

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακας 16: Παρουσίαση Μ.Ο. τιμών, καθώς και (ελάχιστη – μέγιστη) τιμή για τα δείγματα της παρούσας εργασίας, αλλά και σύγκριση με άλλες εργασίες.

Πέτρες [Bq kg ⁻¹]					
	# δειγμάτων	Σειρά ²³² Th	²²⁶ Ra	⁴⁰ K	Πηγή
Συνήθεις Τιμές		60	60	640	UNSCEAR, 2000
Μέγιστη τιμή		310	500	4000	UNSCEAR, 2000
Ανατολική Λέσβος	6	130 (60-190)	90 (40-150)	960 (550-1375)	Παρούσα Εργασία
Δυτική Λέσβος	1	4	5	40	Παρούσα εργασία
	20	1.6 (<DL-2)	14 (2-21)	-	H. Papaefthymiou, O. Gouseti, 2008
Σαουδική Αραβία	24	487 (47-1058)	102 (19-255)	726 (135-1519)	Fallatah & Khattab, 2023
Αίγυπτος	41	66 (11-122)	-	1108 (207-1631)	Sidique et al, 2022
Παγκόσμιας προέλευσης	82	2	9	63	Siegesmund et al, 2022
Τούβλο [Bq kg ⁻¹]					
		Σειρά ²³² Th	²²⁶ Ra	⁴⁰ K	Πηγή
Συνήθεις Τιμές		50	50	670	UNSCEAR, 2000
Μέγιστη τιμή		200	200	2000	UNSCEAR, 2000
Λέσβος	1	50	30	600	Παρούσα εργασία
Ευρώπη	1537	52 (1-200)	48 (2-200)	619 (12-2000)	Trevisi et al, 2008
Αιθιοπία	1	113	44	661	Gebremeskel et al, 2022
Τουρκία	4	31 (5-55)	63 (19-46)	372 (53-822)	Turhan et al, 2021
Ινδία	5	27 (25-38)	-	146 (126-168)	Premalatha et al, 2021
Τσιμέντο [Bq kg ⁻¹]					
		Σειρά ²³² Th	²²⁶ Ra	⁴⁰ K	Πηγή
Συνήθεις Τιμές		30		400	UNSCEAR, 2000
Μέγιστη τιμή		190		1600	UNSCEAR, 2000
Ελλάδα	2	11	29	122	Παρούσα εργασία

		(10-12)	(25-33)	(117-128)	
Κορέα	2	45 (32-58)	24 (21-28)	311 (280-342)	Yong Lee et al, 2019
Ευρώπη	1760	34 (1-240)	49 (4-330)	226 (1-846)	Trevisi et al, 2008
Αιθιοπία	1	141	52	1127	Gebremeskel et al, 2022
Τουρκία	5	46 (12-112)	64 (12-91)	306 (135-424)	Turhan et al, 2021
Ελλάδα	18	16 (11-22)	28 (19-48)	32 (<DL-79)	Papaefthymiou & Gouseti, 2008
Μάρμαρο/Γρανίτες [Bq kg⁻¹]					
		Σειρά ²³² Th	²²⁶ Ra	⁴⁰ K	Πηγή
Παγκόσμια	4	8 (1-16)	9 (2-16)	75 (5-199)	Παρούσα εργασία
Κορέα	2	107 (54-160)	31 (28-34)	973 (969-978)	Yong Lee et al, 2019
Τουρκία	8	70 (1-154)	38 (2-103)	614 (13-1044)	Turhan et al, 2021
Ελλάδα	20	2 (1.2-3.3)	2 (<DL-2.6)	-	Papaefthymiou & Gouseti, 2008
Παγκόσμια	6	12 (2-23)	-	438 (8-971)	Akour & Shakhathreh, 2022
Άμμος [Bq kg⁻¹]					
		Σειρά ²³² Th	²²⁶ Ra	⁴⁰ K	Πηγή
Ελλάδα	1	1,1	-	10	Παρούσα εργασία
Ταϊλάνδη	223	3 (0,3-20)	36 (2-89)	323 (9-814)	Sola et al,2021
USA		17	5	457	Radenkovic et al. 2008
Βραζιλία	mean	6	2	19	Radenkovic et al. 2008
Σαουδική Αραβία	mean	30	23	380	Alaamer, 2012
Μπαγκλαντές	mean	126	49	292	Ahmed et al 2016
Κορέα	2	76 (54-98)	29 (27-32)	1095 (839-1350)	Yong Lee et al, 2019

Αιθιοπία (μαύρη άμμος)	12	235 (135-567)	398 (230-620)	563 (345-890)	Abate & Eshete, 2023
Αιθιοπία (λευκή άμμος)	12	21 (6-42)	28 (12-60)	235 (115-429)	Abate & Eshete, 2023
Ινδία	101	27	-	372	Thangam et al, 2022
Τουρκία	5	5 (2-8)	12 (9-20)	90 (9-158)	Turhan et al, 2021
Ελλάδα	20	3 (<DL-10)	12 (7-15)	-	Papaefthymiou & Gouseti, 2008
Παγκόσμιος Μ.Ο.	mean	30	35	400	UNSCEAR, 2000

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Πίνακας 17: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δείκτη συγκέντρωσης ενεργότητας (I), ανά περιοχή για τα δομικά υλικά τούβλο, σκυρόδεμα και τσιμέντο από την μελέτη των Trevisi et al, (2008) και την παρούσα μελέτη

BRICK					CONCRETE				CEMENT			
Trevisi et al. (2008)												
	N (a)	I _{mean}	I _{max}	I _{min}	N (a)	I _{mean}	I _{max}	I _{min}	N (a)	I _{mean}	I _{max}	I _{min}
Austria	32	0.56	1.09	0.32	1	0.17	0.48	0.04	18	0.23	0.39	0.12
Belgium	61				8				22			
Bulgaria	1	0.56			2	0.35	0.48	0.22	1	0.25		
Czech Republic	448	0.60	0.60	0.59	491	0.40			496	0.33		
Denmark	83	0.34	0.52	0.16	121	0.85	2.90	0.19	6	0.16	0.25	0.06
Finland	42	0.65	0.91	0.39	294	0.57	0.65	0.46	11	0.32	0.67	0.15
Germany	135	0.55	1.00	0.17	75	0.67	1.02	0.37	23	0.71	1.68	0.27
Greece	32	0.59	0.75	0.29	49	0.19	0.40	0.10	117	0.48	0.92	0.13
Hungary	176	0.61	1.06	0.41	97	0.28	0.37	0.17	400	0.28	0.60	0.12
Ireland	14	0.45	0.81	0.15	8	0.23	0.54	0.10	3	0.30	0.39	0.19
Italy	192	0.49	0.98	0.11	20	0.26	0.34	0.20	200	0.57	1.79	0.13
Lithuania	1	0.54			1	0.33						
Luxembourg	2	1.21	1.28	1.13	2	0.80	0.82	0.79				
The Netherlands	70	0.50	0.95	0.15	55	0.36	1.33	0.13	17	0.62	0.96	0.26
Poland	6	0.32	0.51	0.13	678	0.97	1.64	0.56	344	0.69	1.41	0.33
Portugal	10	0.73			11	0.54			7	0.32		
Romania	75	0.55	1.14	0.16	133	0.67	1.07	0.19	55	0.39	1.00	0.08
Slovakia	1	0.62	0.84	0.36	41	0.38	0.57	0.16	6	0.28	0.33	0.22
Slovakia	2	0.93	1.11	0.74	3	0.56	1.37	0.16				
Spain	1	0.83							2	0.45	0.48	0.43
Sweden	33	1.27	1.28	1.26	458	1.32	4.93	0.40	26	0.52	0.61	0.41
United Kingdom	80	0.46	1.04	0.04	17	0.54	0.58	0.45	6	0.22		
Παρούσα εργασία												
Greece	1	0.60							2	0.2	0.2	0.2