

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Πολυτεχνική Σχολή  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών  
και Μηχανικών Υπολογιστών



Διπλωματική Εργασία

**Προσδιορισμός της συγκέντρωσης ραδονίου,  
φυσικών και τεχνητών ραδιοουκλιδίων σε υδάτινα περιβάλλοντα  
γεωλογικών ρηγμάτων**

Ραφαήλ Αποστόλου

Επιβλέπων Καθηγητής: Ιωάννης Καΐσας

Θεσσαλονίκη 2023

## Ευχαριστίες

Με βαθύτατη εκτίμηση θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Ιωάννη Καΐσα για την καθοδήγηση και την αμέριστη υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω για τον ομότιμο καθηγητή κ. Αλέκο Κλούβα για τις γνώσεις και τις συμβουλές που μου παρείχε για να καταστεί δυνατή η εκπόνηση της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Μιχάλη Ομήρου για την βοήθεια του σε οποιαδήποτε στιγμή και αν τον χρειάστηκα. Τέλος θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την στήριξη και την βοήθεια που μου παρείχε με κάθε μέσο στα φοιτητικά μου χρόνια.

## Περιεχόμενα

Περίληψη: .....	5
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή στην Ακτινοβολία και στη Ραδιενέργεια .....	8
1.1) Δομή του ατόμου: .....	8
1.2) Ραδιενέργεια .....	9
1.3) Ραδιενεργές Διασπάσεις .....	11
1.4) Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα και ιονίζουσα ακτινοβολία: .....	15
1.5) Έκθεση και Δόση (Μεγέθη και μονάδες) .....	16
1.6) Ραδιενέργεια Περιβάλλοντος .....	18
1.7) Αλληλεπίδραση γ-ακτινοβολίας με την ύλη .....	21
Κεφάλαιο 2 - Γεωτεκτονικές ζώνες και γεωμορφολογία εδάφους στον Ελλαδικό χώρο .....	25
2.1) Εισαγωγή στις γεωτεκτονικές ζώνες .....	25
2.2) Εισαγωγή στους σεισμούς .....	29
2.3) Σεισμολογικά Ρήγματα .....	32
2.4) Ραδόνιο στα υπόγεια νερά .....	33
2.5) Εκροή Ραδονίου .....	34
2.6) Ραδιενέργεια σε υδάτινα περιβάλλοντα .....	34
Κεφάλαιο 3 - Εργαστηριακές μετρήσεις και μέθοδος συλλογής .....	36
3.1) Δειγματοληψία νερού και πειραματικές μέθοδοι .....	36
3.2) Δειγματοληψία χόματος και πειραματικές μέθοδοι .....	37
3.3) Δειγματοληψία βρύων και πειραματικές μέθοδοι .....	38
3.4) Όργανα μέτρησης .....	38
3.5) Πειραματική διαδικασία με ανιχνευτή γ-φασματοσκοπίας HPGe .....	38
3.6) Θάλαμος ιονισμού Electret Ion Chamber (EIC) .....	54
3.7) Πειραματική διαδικασία μέσω θαλάμου ιονισμού του ανιχνευτή AlphaGuard .....	57
Κεφάλαιο 4 – Αποτελέσματα μετρήσεων .....	62
4.1) Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων στα δείγματα νερού .....	62
4.2) Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων στα δείγματα χόματος .....	75
4.3) Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων στα δείγματα βρύων .....	82
Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα .....	85
5.1) Συμπεράσματα του γεωλογικού υποβάθρου βάση των αποτελεσμάτων του Rn-222 στα δείγματα νερού .....	85
5.2) Συμπεράσματα στις μεθόδους μέτρησης των δειγμάτων νερού .....	85
5.3) Συμπεράσματα στις μεθόδους μεταφοράς των δειγμάτων νερού .....	86

5.4) Συμπεράσματα κατανομής των φυσικών ραδιοϊσοτόπων στα υδάτινα περιβάλλοντα από τα δείγματα χώματος .....	86
5.5) Συμπεράσματα κατανομής των τεχνητών ραδιοϊσοτόπων στα υδάτινα περιβάλλοντα από τα δείγματα χώματος.....	87
5.6) Συμπεράσματα κατανομής των τεχνητών ραδιοϊσοτόπων στα υδάτινα περιβάλλοντα από τα δείγματα βρύων .....	87
Βιβλιογραφία .....	88

## Περίληψη:

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των συγκεντρώσεων φυσικών και τεχνητών ραδιονουκλιδίων με μετρήσεις δειγμάτων που λήφθηκαν από υδάτινα περιβάλλοντα γεωλογικών ρηγμάτων της ευρύτερης περιοχής της Βορείου Ελλάδας, αλλά και από περιοχές απομακρυσμένες από τα ρήγματα. Προς τον σκοπό αυτό, πάρθηκαν 80 δείγματα νερού, χόματος, βρύων από διαφορετικά σημεία με απώτερο στόχο την μελέτης τους με πιθανή ανίχνευση ραδιενεργών στοιχείων.

Αναλυτικότερα έγινε προσδιορισμός της συγκέντρωσης ενεργότητας του ραδονίου ( $Rn-222$ ) στα δείγματα νερού που λήφθηκαν. Η άμεση μέτρηση (primary) του ραδονίου έγινε μέσω των ανιχνευτών AlphaGuard και E-perm, όπου μας δόθηκαν ακριβέστερα αποτελέσματα της συγκέντρωσης του ραδονίου στα δείγματα νερού. Η έμμεση μέτρηση (secondary) του ραδονίου έγινε μέσω του ανιχνευτή Υπερκαθαρού Γερμανίου (HPGe). Το αποτέλεσμα της γ-φασματοσκοπίας είναι οι συγκεντρώσεις ενεργότητας των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του  $Rn-222$ , οι οποίες ανάγονται με υπολογισμούς στην συγκέντρωση του  $Rn-222$ . Για τον λόγο αυτό η μέθοδος χαρακτηρίζεται ως έμμεση. Το δύο θυγατρικά ραδιοϊσότοπα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του  $Rn-222$  είναι το βισμούθιο ( $Bi-214$ ) και ο μόλυβδος ( $Pb-214$ ). (α) Λαμβάνεται υπόψη η ραδιενεργός ισορροπία (οι συγκεντρώσεις τους είναι σχεδόν ίσες) που αποκαθίσταται περίπου 3 ώρες μετά τη συλλογή του δείγματος, μεταξύ του  $Rn-222$  και των θυγατρικών του, αφού ο χρόνος ημιζωής του πρώτου είναι αρκετά μεγαλύτερος από των τελευταίων. (β) Μέσω υπολογισμών γίνεται αναγωγή των αποτελεσμάτων στον χρόνο συλλογής του δείγματος λαμβάνοντας υπόψη και την διάρκεια του χρόνου που μεσολάβησε από την συλλογή μέχρι την μέτρηση για την εύρεση της συγκέντρωσης  $Rn-222$  στο νερό.

Έγινε ανάλυση και προσδιορισμός των συγκεντρώσεων φυσικών ραδιοϊσοτόπων του ουρανίου ( $U-238$ ), του θορίου ( $Th-232$ ) και του καλίου ( $K-40$ ) στα δείγματα χόματος, όπως και της συγκέντρωσης του τεχνητού ραδιονουκλιδίου του καισίου ( $Cs-137$ ) στα ίδια δείγματα. Λόγω του ότι τα δείγματα είχαν μεγάλη ποσότητα υγρασία αποφασίστηκε πρώτα να γίνεται ξήρανση τους στον εργαστηριακό φούρνο. Κατόπιν, τοποθετήθηκαν στον ανιχνευτή HPGe γ-φασματοσκοπίας, για να μετρηθούν οι ποσότητες των φυσικών και τεχνητών ραδιονουκλιδίων από κάθε δείγμα.

Στα δείγματα βρύων που συγκεντρώθηκαν ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία με τα δείγματα του χόματος. Το κύριο ραδιονουκλίδιο που μελετήθηκε στα βρύα είναι το καισίο ( $Cs-137$ ), καθώς παρατηρείται ότι τα βρύα συγκαταλέγονται μεταξύ των οργανισμών που λειτουργούν ως συσσωρευτές βαρέων μετάλλων και ραδιονουκλιδίων. Μετά την συλλογή τους ακολουθήθηκε ξήρανση στον εργαστηριακό φούρνο με σκοπό να μειωθεί η υγρασία των δειγμάτων για πιο ακριβή αποτελέσματα. Στην συνέχεια τοποθετήθηκαν στον ανιχνευτή HPGe γ-φασματοσκοπίας με κυάθια συγκεκριμένης γεωμετρίας για να ληφθούν η συγκέντρωση ενεργότητας του τεχνητού ραδιονουκλιδίου από το κάθε δείγμα.

Για την επιλογή τοποθεσίας από όπου συλλέχθηκε το κάθε δείγμα, λήφθηκε υπόψη το γεωλογικό υπόβαθρο της κάθε περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε το γεωτεκτονικό σχήμα των ζωνών της Βόρειας Ελλάδας, η θέση των ενεργών, των πιθανών και των μη ενεργών ρηγμάτων. Ακόμη ένας παράγοντας για την επιλογή της τοποθεσίας είναι το υφιστάμενο πέτρωμα της κάθε περιοχής. Ειδικότερα στην περίπτωση των ουρανιούχων πετρωμάτων, παρατηρούνται μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ενεργότητας των φυσικών ραδιονουκλιδίων. Χαρακτηριστικό των περιοχών με ουρανιούχα πετρώματα είναι ο γρανίτης. Αυτό το

χαρακτηριστικό μας δίνει την δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων από περιοχές γρανιτικών αποθεμάτων και μη. Τέλος συλλέχθηκαν δείγματα με διαφορετικές μεθόδους ώστε να μελετηθεί η επιρροή των παραγόντων της κάθε μεθόδου στο τελικό αποτέλεσμα των μετρήσεων. Για παράδειγμα η μέθοδος δειγματοληψίας του νερού ή το ύψος από το έδαφος που βρίσκονται τα βρύα.

## **Abstract:**

The purpose of this thesis is the study of the concentrations of natural and artificial radionuclides in aqua environments and geological faults in the wider area of Northern Greece. The samples collected mostly from areas near the faults, but also from areas far from the faults. Therefore, some initiative conclusions can be drawn concerning the correlation of the concentrations with the distance from the fault. More than 80 samples of water, soil and moss were collected from different places prepared and measured in order to determine the concentration of radioactive elements, natural and artificial.

Specifically, the activity concentration of radon (Rn-222) was determined in the water samples. The direct measurement (primary) of radon was performed with AlphaGuard and E-perm detectors, which are capable to give more accurate results of the concentration of radon in water samples. The indirect measurements (secondary) of radon were performed with High Purity Germanium (HPGe)  $\gamma$ -spectroscopy of 2 daughters of Rn-222, i.e. Bismuth (Bi-214) and Lead (Pb-214). The result of  $\gamma$ -spectroscopy is the activity concentrations of these 2 daughter radioisotopes of Rn-222, which used to calculate the concentration of Rn-222. Therefore, this method is characterized as indirect. The calculations take into account: (a) the radioactive equilibrium of Rn-222 with its daughters which observed to take place about three hours after the collection of the sample and (b) the interval of the elapsed time from the collection of the samples to the measurement, to find the concentration of Rn-222 in the water .

The concentration of natural radioisotopes of uranium (U-238), thorium (Th-232) and potassium (K-40) were analyzed and determined in the soil sample. In addition, the concentration of the artificial radionuclide cesium (Cs-137) was determined in the same samples. Most of the samples were originally quite moist, so they were put in the laboratory oven to become dry. After that, they were placed in the HPGe  $\gamma$ -spectroscopy detector, to measure the concentration of natural and artificial radionuclides from each sample.

In the collected mosses samples, a similar procedure was followed. The main radionuclide studied in mosses is cesium (Cs-137), for it is observed that mosses are among the organisms that act as sponges of heavy metals and among them of several radionuclides. Samples collected and dried in laboratory oven to get rid of their moisture. They were put in vessels of specific geometry and were measured with HPGe detector to derive the concentration of Cs-137 for each sample.

Concerning the selection of the location from where each sample was collected, the geological background of each area was considered. Specifically, the geotectonic layers of the zones of Northern Greece, the location of active, potential and inactive faults were studied. Another factor taken into account for site selection is the kind of bedrock of each area. Particularly in the case of bedrock with high concentrations of uranium series radionuclides, higher activity concentrations of natural radionuclides were measured. A characteristic rock with high concentrations of uranium series radionuclides is the granite. This fact gives us the opportunity to compare the results from areas with granitic bedrock to the ones from other types of bedrock. Finally, samples were collected with different methods in order to study the influence of the factors of each method on the final result of the measurement. For example, the method of sampling the water or sampling of mosses from different height on tree.

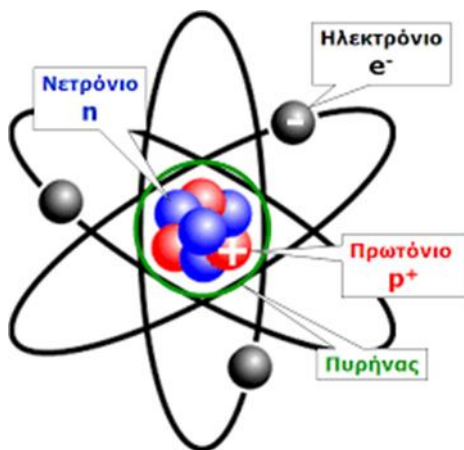
# Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή στην Ακτινοβολία και στη Ραδιενέργεια

## 1.1) Δομή του ατόμου:

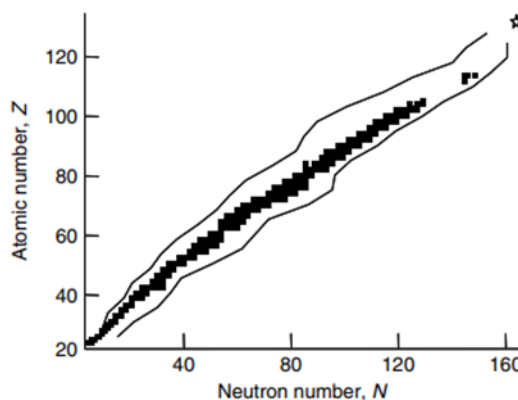
Το άτομο είναι το μικρότερο κομμάτι της ύλης το οποίο μπορούμε να διακρίνουμε με χημικές μεθόδους. Η δομή του αποτελείται από πρωτόνια, νετρόνια και ηλεκτρόνια. Τα πρωτόνια έχουν θετικό φορτίο, τα νετρόνια δεν φέρουν φορτίο και τα ηλεκτρόνια έχουν αρνητικό φορτίο. Ο πυρήνας του ατόμου είναι θετικά φορτισμένος και σχηματίζεται με τα πρωτόνια και τα νετρόνια, και τα δύο μαζί ονομάζονται νουκλεόνια. Τα ηλεκτρόνια σχηματίζουν το ηλεκτρονιακό νέφος, το οποίο περιβάλλει τον πυρήνα. Το ηλεκτρονιακό νέφος έλκεται από τον θετικά φορτισμένο πυρήνα και κατέχει συγκεκριμένες ενεργειακές στάθμες που δεν επιτρέπουν τα ηλεκτρόνια να πέσουν στον πυρήνα. Ο χώρος που καταλαμβάνει το ηλεκτρονιακό νέφος καθορίζει τις διαστάσεις του ατόμου.

Η ταυτότητα του κάθε χημικού στοιχείου καθορίζεται βάση τον ατομικό αριθμό  $Z$ , ο οποίος αντιστοιχεί στον αριθμό των πρωτονίων του ατόμου. Όλα τα άτομα με ίδιο ατομικό αριθμό χαρακτηρίζονται από μια σειρά ίδιων χημικών ιδιοτήτων. Επίσης κάθε άτομο χαρακτηρίζεται έναν μαζικό αριθμό  $A$ , ο οποίος είναι το άθροισμα του αριθμού των πρωτονίων και νετρονίων του ατόμου. Άτομα του ίδιου στοιχείου που έχουν διαφορετικό μαζικό αριθμό ονομάζονται **ισότοπα** του συγκεκριμένου στοιχείου. Με το γράμμα  $N$  συμβολίζεται ο αριθμός των νετρονίων του ατόμου. Νουκλίδιο ονομάζεται κάθε πυρήνας με ταυτότητα του τον ατομικό και τον μαζικό αριθμό. (Μ. Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2005)

$$A \text{ (Μαζικός Αριθμός)} = Z \text{ (Ατομικός Αριθμός)} + N \quad (1.1)$$



Εικόνα 1.1: Δομή του ατόμου, μοντέλο Rutherford

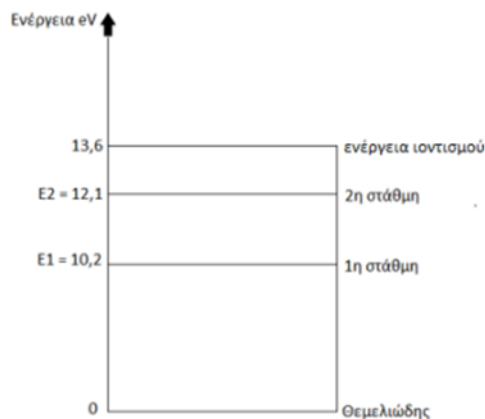


Εικόνα 1.2: Μαζικός και ατομικός αριθμός όλων των στοιχείων (Segrè chart) (Gilmore, 2008)

Τα ηλεκτρόνια του ατόμου δεν μπορούν να έχουν οποιαδήποτε ενέργεια αλλά μόνο διακριτές επιτρεπόμενες στάθμες ενέργειας διαφορετικές για κάθε στοιχείο και χαρακτηριστικές του κάθε ατόμου. Η μικρότερη από τις επιτρεπόμενες ενέργειες ηλεκτρονίων ονομάζεται θεμελιώδης κατάσταση και είναι η μόνη ευσταθής. Οι άλλες επιτρεπόμενες καταστάσεις (στάθμες) είναι μη ευσταθείς και ονομάζονται καταστάσεις διέγερσης (Gilmore, 2008).

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι ενεργειακές στάθμες του ατόμου του υδρογόνου:





Εικόνα 1.3:Ενεργειακές στάθμες και θεμελιώδης ενεργιακή στάθμη του ηλεκτρονίου (Ομήρου, 2019)

Έστω ότι, το άτομο του υδρογόνου ενώ βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση απορροφά ενέργεια ικανή να προκαλέσει τη μετάβαση του ηλεκτρονίου σε άλλη επιτρεπόμενη τροχιά υψηλότερης ενέργειας. Αυτή η μετάβαση του ηλεκτρονίου ονομάζεται διέγερση του ατόμου. Το άτομο παραμένει στην κατάσταση διέγερσης για πολύ μικρό χρονικό διάστημα και επανέρχεται στη θεμελιώδη κατάσταση. Η επιστροφή του ηλεκτρονίου στην θεμελιώδη κατάσταση γίνεται απευθείας μέσω ενός άλματος κατά αυτή την διαδικασία εκπέμπεται ένα φωτόνιο ενέργειας ίσης με την στάθμη ενέργειας στην οποία βρισκόταν. Εναλλακτικά η επιστροφή του ηλεκτρονίου στην θεμελιώδη κατάσταση γίνεται μέσω διαδοχικών αλμάτων, οπότε ο αριθμός των φωτονίων που εκπέμπονται είναι ίσος με τα άλματα που πραγματοποιούνται (Gilmore, 2008).

Στην περίπτωση που έχει απορροφηθεί πολύ μεγάλη ενέργεια από το άτομο τότε το ηλεκτρόνιο του θα απομακρυνθεί από τον πυρήνα του ατόμου σε περιοχή όπου δεν ασκείται ηλεκτρική δύναμη στο ηλεκτρόνιο. Έτσι το άτομο παραμένει με λιγότερα ηλεκτρόνια από αυτά της αρχικής του κατάστασης (ηλεκτρικά ουδέτερο) και το άτομο μετατρέπεται σε θετικό ιόν (Gilmore, 2008).

### Ισχυρές Πυρηνικές Δυνάμεις:

Οι δυνάμεις οι οποίες είναι υπεύθυνες για την συγκράτηση των νουκλεονίων μέσα στο πυρήνα παρά την ηλεκτροστατική άπωση μεταξύ των πρωτονίων ονομάζονται ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις. Οι δυνάμεις αυτές είναι αρκετά ισχυρές ώστε να υπερισχύουν των απωστικών δυνάμενων.

### **1.2)Ραδιενέργεια**

Τα περισσότερα άτομα είναι σταθερά, παρατηρείται όμως ότι υπάρχουν αρκετά στοιχεία των οποίων τα ισότοπα είναι ασταθή. Οι πυρήνες διασπώνται από μόνοι τους, χωρίς καμία εξωτερική διέγερση και μετατρέπονται σε κάποιο άλλο σταθερό πυρήνα εκπέμποντας σωματίδια ή μεταβαίνουν από μια στάθμη διέγερσης σε κάποια άλλη χαμηλότερη εκπέμποντας φωτόνια. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται **ραδιενεργός διάσπαση** του ασταθούς πυρήνα.

Ο διασπώμενος πυρήνας ονομάζεται **μητρικός** και πυρήνας που προκύπτει από την διάσπαση ονομάζεται **θυγατρικός**. Η διάσπαση αυτή συνοδεύεται από εκπομπή σωματιδίων ή/και ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ταυτόχρονα με τη διάσπαση των ασταθών πυρήνων εκπέμπονται σωματίδια, όπως σωματίδια  $\alpha$ ,  $\beta$  και συνήθως εκπέμπεται  $\gamma$  ακτινοβολία. Τα σωματίδια εκπέμπονται με σημαντική ενέργεια και η εκπομπή τους χαρακτηρίζεται ραδιενεργός ακτινοβολία (Μ. Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2005).

### Ραδιενέργεια:

Ονομάζεται η ιδιότητα της αυθόρμητης διάσπασης, δηλαδή της διάσπασης χωρίς εξωτερική διέγερση, των ραδιενεργών πυρήνων, με ταυτόχρονη εκπομπή ραδιενεργών ακτινοβολιών. Η ραδιενέργεια μπορεί να οριστεί και ως ο συνολικός αριθμός διασπάσεων κάθε είδους που συμβαίνουν σε κάποιο υλικό ανά μονάδα χρόνου. Οι κύριες μονάδες μέτρησης της ραδιενέργειας είναι το Curie (Ci) που ορίζεται:  $1\text{Ci} = 3,7 * 10^{10}$  διασπάσεις ανά δευτερόλεπτο και το Becquerel (Bq) που ορίζεται ως:  $1\text{Bq} = 1$  διάσπαση ανά δευτερόλεπτο (Μ. Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2005).

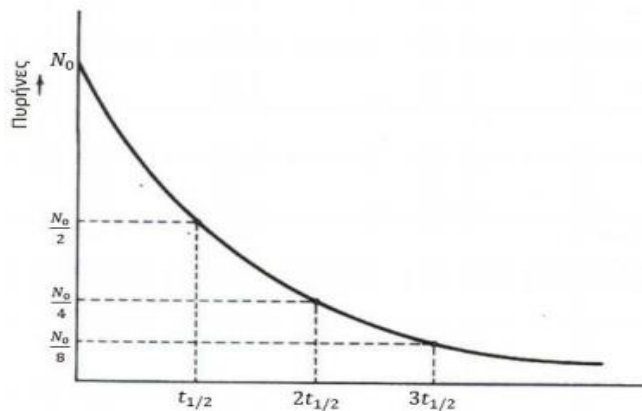
Ο όρος ραδιενέργεια (radioactivity) αποδόθηκε το 1898, από την Marie Curie, για να περιγράψει τη ραδιενεργό συμπεριφορά του ραδίου, που είχε παρατηρήσει. Το πρώτο συνθετικό της λέξης (radio) είναι εμπνευσμένο από το λατινικό radium που σημαίνει ακτίνα, ενώ το δεύτερο συνθετικό (activity) αποδόθηκε στα ελληνικά ως ενέργεια. Τα ραδιενεργά νουκλίδια ονομάζονται και ραδιονουκλίδια (Howard Matis, 2018).

Το φαινόμενο της ραδιενεργούς διάσπασης είναι πιθανοκρατικό, οι πυρήνες διασπώνται ανεξάρτητα ο ένας του άλλου και το μόνο που μπορεί να προσδιοριστεί είναι η πιθανότητα διάσπασης τους. Η πιθανότητα διάσπασης εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες και τη δομή των πυρήνων. Μέσα από πειραματικές διαδικασίες έχει διαπιστωθεί ότι η πιθανότητα διάσπασης ενός ραδιενεργού πυρήνα σε μικρό χρονικό διάστημα είναι από  $t$  σε  $t+dt$ . Ο χρόνος αυτός είναι χαρακτηριστικός του είδους του πυρήνα και ανεξάρτητος από το θυγατρικό του στοιχείο. Κατά αυτό τον τρόπο, για έναν αριθμό  $N$  αδιάσπαστων ραδιενεργών πυρήνων (μητρικοί πυρήνες), ο αριθμός των διασπάσεων  $dN$  (μεταβολή του αριθμού των μητρικών πυρήνων), που θα συμβούν κατά το στοιχειώδες χρονικό διάστημα  $dt$ , είναι ανάλογος του αριθμού των πυρήνων  $N$  και του χρονικού διαστήματος  $dt$  (Gilmore, 2008).

Ο συντελεστής  $\lambda$  προσδιορίζει την **σταθερά διάσπασης** και εκφράζει το ποσοστό των

$$dN = -\lambda N dt \quad (1.2)$$

πυρήνων που διασπώνται στη μονάδα του χρόνου και είναι χαρακτηριστική του θεωρούμενου



Εικόνα 1.4: Καμπύλη χρόνου ημιζωής ενός ραδιενεργού στοιχείου (Ομήρου, 2019)

πυρήνα καθώς και του θεωρούμενου τρόπου διάσπασης. Η μονάδα μέτρησης της σταθεράς

διάσπασης είναι  $s^{-1}$  (χρόνος $^{-1}$ ). Το αρνητικό πρόσημο στην (1.2) προσδιορίζει την μείωση του αριθμού των μητρικών πυρήνων.

Ολοκληρώνοντας την προηγούμενη σχέση προκύπτει:

$$N(t) = N_0 * e^{-\lambda t} \quad (1.3)$$

όπου,  $N_0$  είναι ο αριθμός των μητρικών πυρήνων τη χρονική στιγμή  $t=0$  και  $N(t)$  ο αριθμός των μητρικών πυρήνων που επιβιώνουν μέχρι τη χρονική στιγμή  $t$ .

Αν  $N=N_0/2$ , προκύπτει ο χρόνος υποδιπλασιασμού ή χρόνος ημιζωής  $T_{1/2}$ . Ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται για να διασπαστούν οι μισοί από τους αρχικούς μητρικούς πυρήνες.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (1.4)$$

και αναφέρεται όπως και το  $\lambda$  σε συγκεκριμένο ραδιονουκλίδιο και σε συγκεκριμένο τρόπο διάσπασης του ραδιονουκλιδίου αυτού.

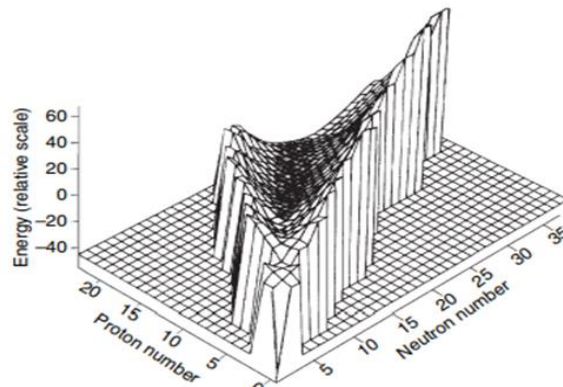
Πολλά ραδιονουκλίδια μπορούν να διασπαστούν με περισσότερους από ένα τρόπους και κάθε τρόπος διάσπασης  $i$  έχει συγκεκριμένη πιθανότητα να συμβεί, επομένως το κάθε στοιχείο θα έχει και συγκεκριμένη σταθερά διάσπασης  $\lambda_i$  χαρακτηριστική του τρόπου αυτού διάσπασης. Κάθε τρόπος διάσπασης είναι στατικά ανεξάρτητος των υπολοίπων. Επομένως η συνολική σταθερά διάσπασης  $\lambda$  που δίνει την ανά μονάδα χρόνου πιθανότητα να διασπαστεί ο πυρήνας ανεξάρτητα από τον τρόπο διάσπασης είναι:

$$\lambda = \sum \lambda_i \quad (1.5)$$

### **1.3)Ραδιενεργές Διασπάσεις**

Παρατηρώντας το ακόλουθο διάγραμμα (Εικ. 1.5) της κοιλάδας β σταθερότητας στην τρισδιάστατη εκδοχή του, στον κατακόρυφο άξονα προσδιορίζεται το πηλίκο της ενέργειας ως προς την μάζα του κάθε στοιχείου. Τα στοιχεία της κοιλάδας έχουν πυρηνική σταθερότητα που εκτείνεται από το υδρογόνο (H-1) μέχρι το βισμούθιο (Bi-214) (Gilmore, 2008).

Η σταθερότητα αναλύεται από τον αριθμό των πρωτονίων και νετρονίων του κάθε πυρήνα. Αντίθετα τα νουκλίδια εκτός της κοιλάδας (λόφοι) παρουσιάζουν μεγαλύτερη αστάθεια και το ύψος τους στην γραφική παράσταση αντικατοπτρίζει την ενέργεια σύνδεσής τους ως προς την μάζα τους.

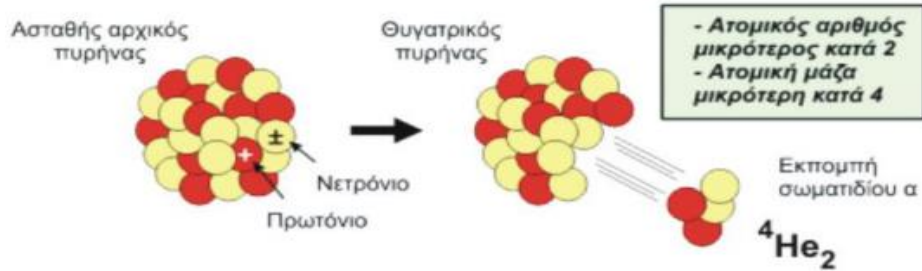


Εικόνα 1.5: Γραφική Παράσταση Segrè (Segrè chart) (Gilmore, 2008)

Οι συνηθέστερες ραδιενεργές διασπάσεις, κατά την διάσπαση φυσικών ραδιενεργών πυρήνων είναι:

- **Διάσπαση με εκπομπή σωματιδίων α (alpha decay):**

Η διάσπαση του ραδιενεργού πυρήνα γίνεται με εκπομπή ενός σωματιδίου α, το οποίο αποτελείται από ένα πυρήνα ηλίου (He-4). Η διάσπαση το πυρήνα είναι πιθανότερη αν ο ατομικός αριθμός είναι μεγαλύτερος του 83 ( $Z > 83$ ). Το σωματίδιο α αποτελείται από δύο νετρόνια και δύο πρωτόνια, ισχυρά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Αφού ολοκληρωθεί η διάσπαση, ο μαζικός και ο ατομικός αριθμός του θυγατρικού πυρήνα είναι μικρότεροι από τον μητρικό κατά 4 και 2 αντίστοιχα (Gilmore, 2008).



Εικόνα 1.6: Διάσπαση με εκπομπή ενός σωματιδίου α ( ${}^4_2\text{He}$ ) (Ομήρου, 2019)

Ένα από τα πιο συνηθισμένα ραδιοϊσότοπα που δίνουν διάσπαση α, είναι το ράδιο (Ra-226):



Κατά αυτή την διάσπαση, ένας πυρήνας ραδίου μετατρέπεται σε ραδόνιο και εκπέμπεται ένα σωματίδιο α, το οποίο παίρνει σχεδόν εξολοκλήρου την σταθερή ενέργεια Q, με μορφή κινητικής ενέργειας. Η ενέργεια ισούται με την διαφορά μάζας μεταξύ του αρχικού ραδιονουκλιδίου και των τελικών προϊόντων που απελευθερώνονται. Αυτή η ενέργεια κατανέμεται μεταξύ του ραδονίου και του ηλίου σε συγκεκριμένη αναλογία λόγω της διατήρησης της ορμής.

Τα σωματίδια α κατά την κίνηση τους μέσα σε κάποιο υλικό χάνουν κινητική ενέργεια προκαλώντας ιονισμό των ατόμων του υλικού αλλά και λόγω των ελαστικών σκεδάσεων που προκαλούνται με πυρήνες του υλικού. Η απόσταση που διανύουν τα σωματίδια α σε ένα υλικό είναι μικρή και εξαρτάται από την ενέργεια του σωματιδίου α. Για παράδειγμα, τα σωματίδια α που εκπέμπονται από ραδιενεργούς πυρήνες απορροφώνται σε ένα απλό φύλλο χαρτί ή φύλλο αλουμινίου πάχους 0.04mm ή σε μερικά εκατοστά αέρα. (Gilmore, 2008)

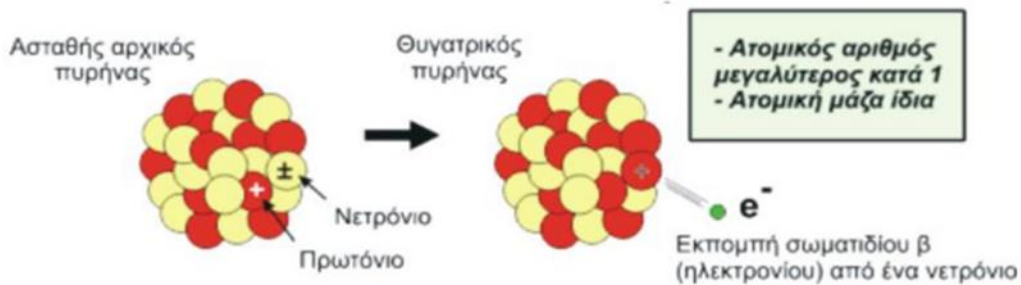
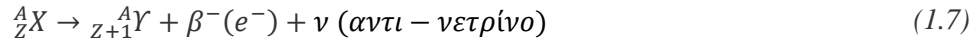
- **Διάσπαση με εκπομπή σωματιδίων β (beta decay):**

Η διάσπαση β αποτελεί την κυρίαρχη μορφή της ραδιενεργούς διάσπασης, στην οποία τα στοιχεία των λόφων της κοιλάδας β σταθερότητας κινούνται προς την κοιλάδα. Αν ο πυρήνας έχει περισσότερα πρωτόνια σε σχέση με τα νετρόνια που απαιτούνται για να είναι σταθερός, τότε θα πρέπει να μειωθεί ο αριθμός των πρωτονίων συγκριτικά με τον αριθμό των νετρονίων. Εφόσον ο πυρήνας δεν έχει επαρκή ενέργεια να διώξει το πρωτόνιο που είναι σε περίσσεια, το μετατρέπει σε νετρόνιο. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται αν τα νετρόνια είναι σε περίσσεια, τότε το νετρόνιο μετατρέπεται σε πρωτόνιο.

Κατά την διάσπαση των ραδιενεργών πυρήνων γίνεται εκπομπή ηλεκτρονίων ή ποζιτρονίων τα οποία ονομάζονται σωματίδια β. Η πιο απλή διαδικασία αυτού του είδους είναι η διάσπαση βήτα ( $\beta^-$ ) του νετρονίου σε πρωτόνιο, με την ταυτόχρονη εκπομπή ενός ηλεκτρονίου

και ενός αντι-νετρίνου. Ο ατομικός αριθμός του θυγατρικού πυρήνα είναι αυξημένος κατά 1, σε σχέση με αυτόν του μητρικού του (άρα είναι διαφορετικό χημικό στοιχείο), ενώ ο μαζικός αριθμός παραμένει σταθερός (Gilmore, 2008).

Η διάσπαση  $\beta^-$  συμβολικά γράφεται ως:



Εικόνα 1.7: Διάσπαση με εκπομπή σωματιδίου  $\beta^-$  (Ομήρου, 2019)

Η διάσπαση βήτα ανήκει στις ασθενείς πυρηνικές αλληλεπιδράσεις και μπορεί να γίνει και από τις δύο κατευθύνσεις (από τον έναν ή τον άλλο λόφο προς την κοιλάδα).

Το ποζιτρόνιο έχει μάζα ίση με αυτή του ηλεκτρονίου και το ηλεκτρικό του φορτίο είναι ίσο και αντίθετο από του ηλεκτρονίου (+e). Κατά την θετική διάσπαση βήτα, ένα πρωτόνιο μετατρέπεται σε νετρόνιο, γίνεται ταυτόχρονη εκπομπή ενός ποζιτρονίου ( $\beta^+$ ) και ενός νετρίνου ( $\nu$ ). Ο ατομικός αριθμός του θυγατρικού πυρήνα είναι μειωμένος κατά 1, σε σχέση με αυτόν του μητρικού (άρα είναι διαφορετικό χημικό στοιχείο από το αρχικό) και ο μαζικός αριθμός παραμένει αναλλοίωτος.

Η διάσπαση  $\beta^+$  συμβολικά γράφεται ως:



Τα σωματίδια  $\beta$  με ενέργειες μικρότερες από 1 MeV επιβραδύνονται κατά την κίνηση τους μέσα σε κάποιο υλικό προκαλώντας ιονισμό των ατόμων του υλικού. Σε σύγκριση με τα σωματίδια  $\alpha$ , τα σωματίδια  $\beta$  μπορούν να διανύσουν πολύ μεγαλύτερη απόσταση μέσα σε κάποιο υλικό μέχρι να χάσουν όλη την κινητική τους ενέργεια. Αυτό επιτυγχάνεται λόγω της μικρότερης μάζας των σωματιδίων  $\beta$  και μπορούν να σταματήσουν σε ένα παχύ κομμάτι πλαστικού. Η διάσπαση  $\beta$  σε αντίθεση με την διάσπαση  $\alpha$ , παράγει πολύ λιγότερα ζεύγη ιόντων ανα mm διαδρομής (Κλούβας Α., 2020).

- **Διάσπαση  $\gamma$ :**

Παρατηρείται μετά από μια διάσπαση  $\alpha$  ή  $\beta$ , ο θυγατρικός πυρήνας του ατόμου να παραμένει σε μια διεγερμένη ενδιάμεση κατάσταση της οποίας η ενεργειακή στάθμη είναι αρκετά υψηλή. Σε αυτή την κατάσταση ο νέος πυρήνας μεταπίπτει σε μια κατάσταση χαμηλότερης ενεργειακής στάθμης εκπέμποντας ένα φωτόνιο  $\gamma$ . Κατά την μετάβαση παρουσιάζεται διαφορά ανάμεσα στις δύο ενεργειακές στάθμες του πυρήνα. Η διαφορά αυτή απελευθερώνεται με τη μορφή ενός ή περισσότερων φωτονίων (0,1 έως 10MeV). Επομένως κατά τη διάσπαση  $\gamma$  ένας ασταθής πυρήνας αποβάλλει την περίσσεια ενέργεια του με αυθόρμητη εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής  $\gamma$ -ακτινοβολίας. Παράλληλα το μέτρο της ενέργειας των φωτονίων

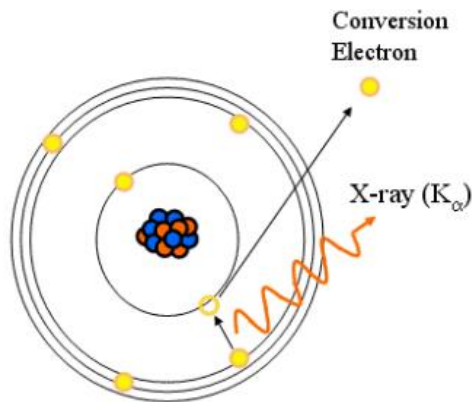
της  $\gamma$ -ακτινοβολίας είναι χαρακτηριστικό τόσο της συγκεκριμένης ενεργειακής κατάστασης όσο και του στοιχείου του πυρήνα από όπου εκπέμπεται. Επομένως η μέτρηση της ενέργειας των εκπεμπόμενων ακτινών  $\gamma$  επιτρέπει την ταυτοποίηση του πυρήνα εκπομπής. Ακολούθως η εκπομπή της  $\gamma$ -ακτινοβολίας δεν επηρεάζει τη δομή του πυρήνα (σταθερός ατομικός και μαζικός αριθμός), αλλά μόνο την ενεργειακή του κατάσταση.

Ως ακόλουθο της  $\gamma$ -ακτινοβολίας λαμβάνουν χώρα δύο φυσικοί μηχανισμοί:

- 1) **Εσωτερική μετατροπή (Internal Conversion)**: Μερικές φορές, αντί να εκπεμφθεί η περίσσεια ενέργειας ως φωτόνιο  $\gamma$  από τον πυρήνα, δίδεται σε ένα ηλεκτρόνιο των εσωτερικών στιβάδων του ατόμου και αυτό εκτοξεύεται από την τροχιά της στιβάδας. Η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου ισούται με την διαφορά της αρχικής ενέργειας ( $E_i$ ) μείον τελική ενέργεια του ηλεκτρονίου ( $E_f$ ) και την τροχιακή ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου ( $E_B$ ), η οποία είναι ανάλογη της στιβάδας αυτού. Τα ηλεκτρόνια εκπέμπονται από το άτομο και ονομάζονται ηλεκτρόνια εσωτερικής μετατροπής και είναι μονοενεργειακά. Τα ηλεκτρόνια στις στιβάδες κοντά στον πυρήνα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να εκτοξευθούν μέσω της εσωτερικής μετατροπής.

$$E = (E_i - E_f) - E_B \quad (1.9)$$

Αφού εκτοξεύεται το ηλεκτρόνιο εσωτερικής μετατροπής, η θέση που κατείχε στην στιβάδα παραμένει κενή και συμπληρώνεται από με ηλεκτρόνιο άλλης στιβάδας. Η διαδικασία κάλυψης της κενής θέσης με άλλο ηλεκτρόνιο συνοδεύεται με εκπομπή ακτινοβολίας X ενέργειας ίσης με την διαφορά των ενεργειών των 2 στιβάδων που συμμετέχουν (Walter D, 2005).



Εικόνα 1.8: Η διαδικασία της εσωτερικής μετατροπής (NSCL Michigan State University, 2018)

- 2)  **$\gamma$ -διάσπαση**: Στην περίπτωση αυτή ο θυγατρικός πυρήνας μιας διάσπασης  $\alpha$  ή  $\beta$  παραμένει σε ανώτερη διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση για μετρήσιμο χρονικό διάστημα και στην συνέχεια απελευθερώνονται τα φωτόνια  $\gamma$ -ακτινοβολίας για να φτάσει ο πυρήνας σε χαμηλότερο σταθερό ενεργειακό επίπεδο. Οι ακτίνες  $\gamma$  που εκπέμπονται δεν αλληλεπιδρούν με κάποιο από τα τροχιακά ηλεκτρόνια του ατόμου. Το χρονικό διάστημα που ο πυρήνας παραμένει σε υψηλή ενεργειακή κατάσταση ονομάζεται μετασταθή περίοδος (U.o.Patras, n.d.).

#### 1.4) Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα και ιονίζουσα ακτινοβολία:

Η  $\gamma$ -ακτινοβολία συγκαταλέγεται στις ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες μαζί με τις υπόλοιπες επιμέρους ζώνες του φάσματος, όπως τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα και το ορατό φως. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα έχει μεγάλο εύρος ενεργειών από μηδενικές συχνότητες έως πολύ μεγάλης συχνότητας ακτίνες  $\gamma$ . Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η συχνότητα τόσο πυκνώνει και μειώνεται το μήκος κύματος. Οι ακτίνες  $\gamma$  βρίσκονται στο μεγαλύτερο επίπεδο ενέργειας του φάσματος μεταξύ των συχνοτήτων  $10^{19} \text{ Hz}$  και  $10^{21} \text{ Hz}$  ( $41,135 \text{ keV} - 4,135 \text{ MeV}$ ) με το μικρότερο μήκος κύματος από  $10^{-10} \text{ m}$  έως  $10^{-14} \text{ m}$ .

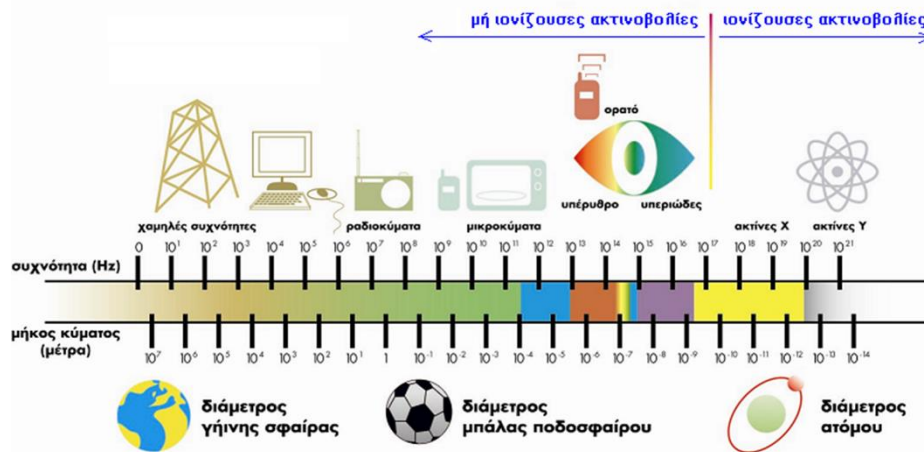
Ο υπολογισμός της ενέργειας κάθε ακτινοβολίας προκύπτει από την εξίσωση:

$$E = h * f \quad (1.10)$$

Ο συντελεστής  $f$  ορίζει την συχνότητα (Hz) του κύματος και το  $h$  ισούται με την σταθερά του Planck ( $4,135 * 10^{-15} \frac{\text{eV}}{\text{Hz}}$ ). Το μήκος κύματος έχει μονάδα μέτρησης τα μέτρα (m) και προκύπτει από την εξίσωση:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.11)$$

Ο συντελεστής  $c$  συμβολίζει την ταχύτητα του φωτός ( $2,997 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ).



Εικόνα 1.9: Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

Η ακτινοβολία ταξινομείται ως ιονίζουσα ή μη ιονίζουσα, με βάση την ενέργεια που διακατέχει ώστε να απομακρύνει ηλεκτρόνια από τα άτομα με τα οποία αλληλεπιδρά. Η μη ιονίζουσα ακτινοβολία έχει αρκετή ενέργεια ώστε να προκαλέσει δόνηση των ηλεκτρονίων ενός ατόμου χωρίς όμως να είναι ικανή να απομακρύνει τα ηλεκτρόνια από τα άτομα. Τα ραδιοκύματα, το ορατό φως και τα μικροκύματα περιλαμβάνονται στις μη ιονίζουσες ακτινοβολίες (Μ. Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2005).

Η ιονίζουσα ακτινοβολία προκαλείται από ασταθείς καταστάσεις που εκπέμπουν ενέργεια για να φθάσουν σε μια πιο σταθερή κατάσταση. Στις ιονίζουσες ακτινοβολίες κατατάσσονται οι ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες όπως  $\gamma$  και X (ουδέτερα κβάντα ενέργειας, χωρίς μάζα) και οι σωματιδιακές όπως οι  $\alpha$ ,  $\beta$ , τα νετρόνια και κάποια σωματίδια που παράγονται τεχνητά ή αποτελούν συνιστώσες της κοσμικής ακτινοβολίας. Η έκθεση των ανθρώπων σε ιονίζουσα ακτινοβολία αποτελεί κίνδυνο για την υγεία καθώς μπορεί να προκαλέσει αλλαγή στην

βασική σύνθεση των ατόμων στα κύτταρα και πιο συγκεκριμένα των μορίων DNA είτε άμεσα η ίδια, είτε έμμεσα με τη δημιουργία ελεύθερων ριζών (Μ. Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2005; Ομήρου, 2019).

### **1.5) Έκθεση και Δόση (Μεγέθη και μονάδες)**

Κατά την πρόσκρουση της ιονίζουσας ακτινοβολίας στους ανθρώπινους ιστούς παρατηρείται αλληλεπίδραση με τα μόρια των κυττάρων με αποτέλεσμα να εναποτίθεται ενέργεια σε αυτά. Μέσα από αυτή την διαδικασία παρατηρούνται βίαιες χημικές και βιολογικές αντιδράσεις εντός των κυττάρων με αποτέλεσμα την βλάβη ή τον θάνατο των προσβεβλημένων κυττάρων.

Οι πιθανότητες μεταβολής των κυττάρων από έκθεση σε ιονίζουσα ακτινοβολία εξαρτώνται από την ποσότητα και το είδος της ακτινοβολίας αλλά και από το μέρος του σώματος που εκτίθεται σε αυτήν.

Απορροφούμενη Δόση:

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad (1.12)$$

Το μέγεθος που προσδιορίζει τη μέση ενέργεια που απορροφάται ( $d\varepsilon$ ) ανά μονάδα μάζας του υλικού ( $dm$ ), ορίζεται ως απορροφούμενη δόση, δηλαδή απορροφώμενη ενέργεια ανά μονάδα μάζας (Joule/Kg) και ονομάζεται Gray (Gy) (Μ. Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2005).

$$1Gy = 1 \text{ Joule/kg} \quad (1.13)$$

Πιο συγκεκριμένα η απορροφούμενη δόση εκφράζει την μέση ενέργεια που εναποτίθεται από ραδιενεργό ακτινοβολία σε οποιοδήποτε σημείο της ύλης. Πρακτικά όμως ενδιαφερόμαστε να υπολογίζεται η απορροφούμενη δόση σε τμήματα ιστών ή όργανα. Μέσω αυτού ορίζεται η έννοια της μέσης απορροφούμενης δόσης  $D_T$  στην περιοχή ενός οργάνου ή ιστού:

$$D_T = \frac{\int D(x, y, z)\rho(x, y, z)dV}{\int \rho(x, y, z)dV} \quad (1.14)$$

Η πιο πάνω σχέση μας περιγράφει την απορροφούμενη δόση  $D$  σε ένα σημείο  $(x, y, z)$  μίας περιοχής ή ενός οργάνου με όγκο  $V$  και πυκνότητα μάζας  $\rho$  στο σημείο αυτό (Μ. Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2005).

Συντελεστής στάθμισης  $W_R$

Τα αποτελέσματα που παρατηρούνται μετά την έκθεση σε ραδιενεργό ακτινοβολία δεν εξαρτώνται μόνο από την ενέργεια που εναποτίθεται στα κύτταρα και στους οργανισμούς, αλλά και από το είδος της ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, για την ίδια τιμή απορροφούμενης δόσης μπορεί να προκληθεί μεγαλύτερη βιολογική επίπτωση σε έναν οργανισμό όταν του εναποθέτονται σωματίδια  $\alpha$  σε σύγκριση με την ακτινοβολία  $\gamma$ . Βάση αυτού εισάγεται ο συντελεστής στάθμισης  $W_R$ , ο οποίος αντικατοπτρίζει κατά προσέγγιση τη βιολογική αποτελεσματικότητα κάθε συγκεκριμένου είδους ακτινοβολία σε σχέση με την βιολογική αποτελεσματικότητα της ακτινοβολίας  $\gamma$  ή  $X$  (Μ. Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2005).



### Ισοδύναμη δόση

Καθώς οι επιπτώσεις σε ένα ιστό ή όργανο μεταβάλλονται ανάλογα με το είδος της ακτινοβολίας και το ποσό της ενέργειας που εναποτίθεται ανά μονάδα μάζας, καθαυτό τον τρόπο εισάγεται ο όρος της ισοδύναμης δόσης.

$$\text{Ισοδύναμη Δόση} = \text{Απορροφώμενη Δόση} * W_R \quad (1.15)$$

Η ισοδύναμη δόση ορίζεται ως το γινόμενο της απορροφούμενης δόσης (Gy) επί τον συντελεστή στάθμισης  $W_R$ . Η μονάδα μέτρησης της ισοδύναμης δόσης είναι τα Sievert (Sv). Επομένως ένα όργανο ή ένας ιστός στον οποίο προσπίπτουν περισσότερες του ενός είδους ακτινοβολίες, τότε η ισοδύναμη δόση θα ισούται με το άθροισμα των απορροφούμενων δόσεων επί τους συντελεστές στάθμισης του εκάστοτε είδους ακτινοβολίας.

### Ενεργός Δόση

Παρατηρείται ότι η ίδια ποσότητα ισοδύναμης δόσης δεν επιφέρει τις ίδιες βιολογικές επιπτώσεις και δεν συνεπάγεται τον ίδιο βαθμό επικινδυνότητας για τα διάφορα όργανα. Στο σημείο αυτό εισάγεται ο όρος της ενεργού δόσης, η οποία παρουσιάζει το μέτρο κινδύνου για κάθε συγκεκριμένο όργανο ή ιστό.

$$\text{Ενεργός Δόση} = \text{Ισοδύναμη Δόση} * W_T \quad (1.16)$$

Η τιμή της ενεργού δόσης ισούται με το γινόμενο της ισοδύναμης δόσης επί τον συντελεστή στάθμισης  $W_T$  για κάθε ιστό ή όργανο. Για παράδειγμα ο συντελεστής στάθμισης για ολόκληρο το σώμα είναι ίσος με 1, ενώ για τους γεννητικούς αδένες ο συντελεστής στάθμισης είναι 0,08 Η μονάδα μέτρησης της ενεργού δόσης είναι τα Sievert. Το μέτρο της διακινδύνευσης σε περίπτωση έκθεσης σε ακτινοβολία είναι η ενεργός δόση, όταν η έκθεση γίνει σε όλο το τμήμα του σώματος η ενεργός δόση ισούται με την ισοδύναμη δόση.

### Όρια Δόσεων

Εξ'ορισμού τα όρια δόσεων έχουν σκοπό την προστασία των ανθρώπων από τις ιονίζουσες ακτινοβολίες. Όπως θα αναφερθεί και στην συνέχεια οι άνθρωποι από τα πρώτα χρόνια εμφάνισης τους δέχονται ακτινοβολία διαφόρων μορφών από το περιβάλλον. Τα όρια δόσεων αφορούν στις επιπλέον δόσεις πέραν της φυσικής ραδιενέργειας.

Σύμφωνα με την Διεθνή Επιτροπή για την Ραδιολογική Προστασία (ICRP), για το ευρύ κοινό έχει θεσπιστεί η τιμή του 1mSv κατά την διάρκεια ενός έτους. Επίσης αναφέρεται ότι η μέση ετήσια τιμή ολόσωμης δόσης από φυσική ραδιενέργεια είναι 2,5mSv.



Εικόνα 1.10: Μέση ετήσια δόση έκθεσης σε ακτινοβολία παγκοσμίως (σε mSv) (Υπηρεσία Ελέγχου και Επιθεώρησης για Ακτινοβολίες, n.d.)

## **1.6) Ραδιενέργεια Περιβάλλοντος**

Οι μορφές ραδιενέργειας στο περιβάλλον διακρίνονται σε φυσικές και τεχνητές. Ανέκαθεν, στο φυσικό περιβάλλον του ανθρώπου υπήρχαν ραδιενεργές ακτινοβολίες. Με το πέρασμα των χρόνων, οι μορφές αυτών αυξήθηκαν καθώς προστέθηκαν και τεχνητές ραδιενέργειες, οι οποίες οφείλονται σε προϊόντα της ανθρώπινης τεχνολογίας.

Η έκθεση του ατόμου στις φυσικές πηγές ραδιενεργού ακτινοβολίας μπορεί να γίνει είτε από εξωτερικές πηγές είτε από εσωτερικές πηγές. Οι εξωτερικές πηγές ακτινοβολίας, είναι οι πηγές που εκπέμπουν ακτινοβολία από το εξωτερικό περιβάλλον προς το ανθρώπινο σώμα. Τέτοιου είδους ακτινοβολία εκπέμπεται από το έδαφος, το νερό, τον ατμοσφαιρικό αέρα, τα οικοδομικά υλικά αλλά και από τεχνητά ραδιοϊσότοπα διάφορων χρήσεων. Αντίθετα στην κατηγορία των εσωτερικών πηγών (φυσικές και τεχνητές), η έκθεση στην ακτινοβολία γίνεται μέσω της αναπνοής και της διατροφής ή και από την απορρόφηση από το δέρμα ή ανοιχτές πληγές.

- Φυσικά Ραδιονουκλίδια

Τα φυσικά ραδιονουκλίδια υπάρχουν στη Γη από την στιγμή της δημιουργίας της. Τα σημαντικότερα φυσικά πρωτογενή ραδιονουκλίδια και για τα οποία έχουν ληφθεί υπόψη οι συγκεντρώσεις τους στην ανάλυση των δειγμάτων της παρούσας εργασίας είναι το κάλιο-40 (K-40), τα ραδιονουκλίδια της σειράς του θορίου (Th-232) και του ουρανίου (U-238). Το K-40 αποτελεί μεμονωμένο φυσικό ραδιενεργό ισότοπο του καλίου, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία που αναφέρθηκαν είναι μητρικά ραδιονουκλίδια των σειρών του U-238 και του Th-232. Τα φυσικά ραδιονουκλίδια δεν εμφανίζονται μόνο στο χώμα και στα πετρώματα αλλά συγκεντρώσεις τους παρουσιάζονται στο νερό, στον αέρα, στους ζωντανούς οργανισμούς, στις τροφές, στα δομικά υλικά ακόμη και στο ανθρώπινο σώμα, όπως είναι το K-40 στους μύες.

### Ουράνιο

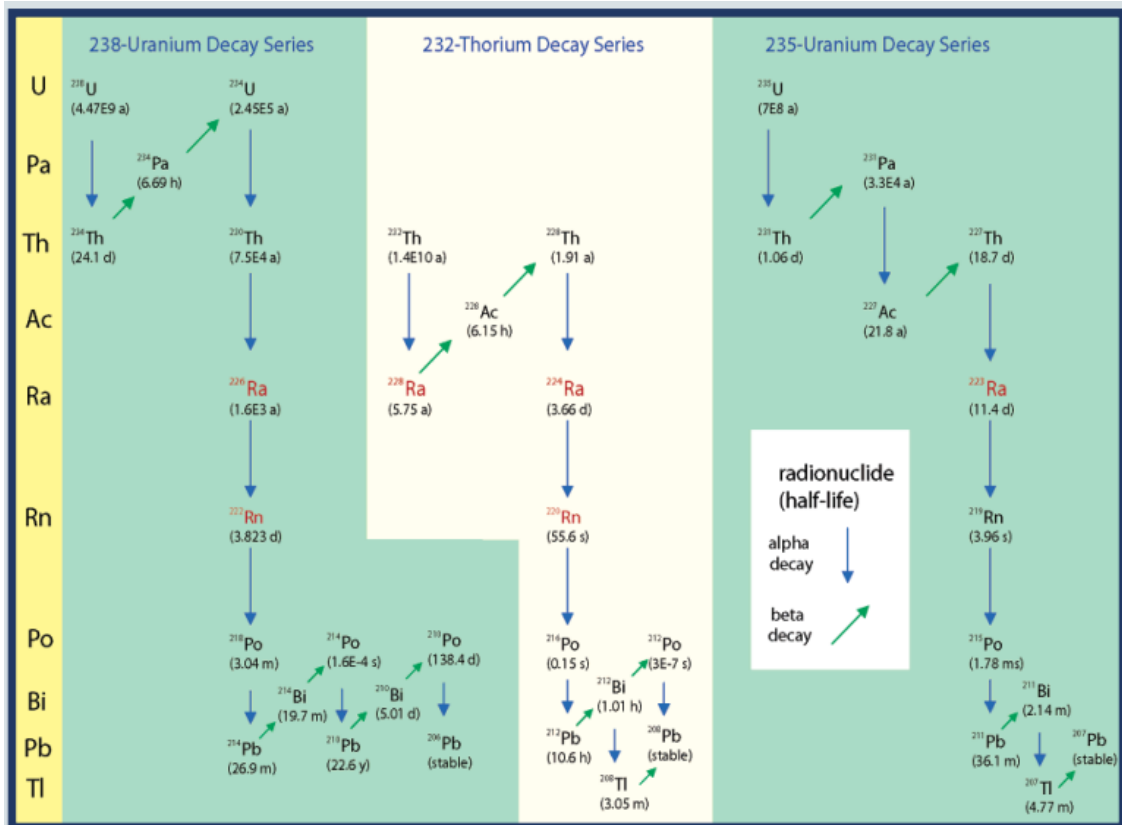
Το Ουράνιο που παρατηρείται στη φύση αποτελείται από τρία ισότοπα με μαζικούς αριθμούς 234, 235 και 238. Το U-238 βρίσκεται στο φλοιό της γης σε ποσοστό 99,28% και είναι συνήθως σε ραδιενεργό ισορροπία με το U-234, το οποίο βρίσκεται σε ποσοστό 0,0058%. Το U-235, πατρικό ισότοπο της σειράς του ακτινίου βρίσκεται σε ποσοστό 0,71% και έχει χρόνο ημιζωής  $703,8 * 10^6$  χρόνια. Αντίστοιχα το U-238 έχει χρόνο ημιζωής  $4,5 * 10^9$  χρόνια, ενώ το U-234  $233 * 10^3$  χρόνια. Η εξέλιξη του εδάφους έχει ως αποτέλεσμα ο μέσος όρος συγκέντρωσης ουρανίου στο χώμα να είναι μικρότερος από το μέσο όρο συγκέντρωσης ουρανίου σε βραχώδη εδάφη. Οι τυπικές συγκεντρώσεις κυμαίνονται από 0,03 ppm στα υπερβασικά πυριγενή πετρώματα μέχρι 120 ppm στα φωσφορικά πετρώματα, τα οποία χρησιμοποιούνται για εμπορική εκμετάλλευση. Στην αλυσίδα του U-238 ανήκει ο Μόλυβδος-214 (Pb-214), οποίος είναι θυγατρικό ισότοπο του Rn-222 (Ανεσιάδου Αικατερίνη, 2014).

### Θόριο-232

Το Θόριο-232 είναι το μόνο ισότοπο του Θορίου που υπάρχει στην φύση. Διασπάται με εκπομπή α σωματιδίου και έχει χρόνο ημιζωής  $14,05 * 10^9$  χρόνια. Το Th-232 βρίσκεται στο φλοιό της γης στο έδαφος και στα πετρώματα. Η μέση συγκέντρωση του Th-232 είναι περίπου τέσσερις έως πέντε φορές μεγαλύτερη από εκείνη του U-238. Ωστόσο, η ειδική ενεργότητα του Th-232 είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του U-238, περίπου τρεις φορές. Με αποτέλεσμα η ραδιενέργεια που οφείλεται από τα δύο ραδιονουκλίδια να είναι περίπου ίση. Η τυπική συγκέντρωση πετρωμάτων σε θόριο είναι 8,1-33 ppm για τα πυριγενή πετρώματα με γεωμετρικό μέσο τα 12 ppm στους ψαμμόλιθους και 1 ppm στους ασβεστόλιθους (Ανεσιάδου Αικατερίνη, 2014).

### Κάλιο-40

Το Κάλιο είναι χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 19. Η συγκέντρωση του στο φλοιό της γης είναι περίπου 15gr/kg. Το K-40 είναι ένα φυσικό ραδιενεργό ισότοπο του Καλίου. Είναι ευρέως διαδεδομένο στη φύση και υπάρχει σε όλους τους φυτικούς και ζωικούς ιστούς. Το K-40 αποτελεί περίπου το 0,012% του φυσικού Καλίου. Είναι το βασικό ραδιενεργό συστατικό στους ανθρώπινους ιστούς και στα τρόφιμα. Ο χρόνος ημιζωής του K-40 είναι  $1,3 \cdot 10^9$  χρόνια και εκπέμπει β σωματίδια και γ ακτινοβολία (Ανεσιάδου Αικατερίνη, 2014).



Εικόνα 1.11: Ραδιενεργές σειρές των φυσικών ραδιοϊσοτόπων

- Κοσμογενή ραδιονουκλίδια

Τα κοσμογενή ραδιονουκλίδια παράγονται από την αλληλεπίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα. Από την αλληλεπίδραση αυτή παράγονται ιονίζοντα σωματίδια. Το 79% των σωματιδίων αποτελείται από πρωτόνια, το 20% από σωματίδια α και το υπόλοιπο 1% είναι βαριά ιόντα (Μ. Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2005).

Αρχικά, κατά την σύγκρουση της κοσμικής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα παράγονται πρωτογενή σωματίδια, τα οποία δεν φτάνουν ποτέ στην επιφάνεια της γης καθώς αλληλεπιδρούν με το οξυγόνο και το άζωτο της ατμόσφαιρας. Κατά την πρόσκρουση παράγεται δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία. Τμήμα της δευτερογενούς ακτινοβολίας καταλήγει στην γη, ενώ μεγάλη ποσότητα αυτής απορροφάται από την ατμόσφαιρα. Στον φλοιό της γης οι ενέργειες των σωματιδίων παρατηρούνται μειωμένες.

Η δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία χωρίζεται στην σκληρή και τη μαλακή συνιστώσα. Η διαφορά που παρατηρείται ανάμεσα στις δύο συνιστώσες είναι η διεισδυτικότητα τους. Η σκληρή συνιστώσα εισέρχεται βαθιά μέσα στο έδαφος και την θάλασσα, ενώ η μαλακή συνιστώσα παράγεται σε μικρή απόσταση από το σημείο μέτρησης. Η σκληρή συνιστώσα

αποτελείται κυρίως από μίονια, νετρόνια και νετρίνα, τα οποία δημιουργούνται από τις πυρηνικές αντιδράσεις μεταστοιχείωσης των πυρήνων. Η μαλακή συνιστώσα αποτελείται από φωτόνια, ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια.

- Τεχνητά ραδιονουκλίδια

Τα τεχνητά ραδιονουκλίδια διαφεύγουν στο περιβάλλον ως πυρηνικοί ρύποι από εγκαταστάσεις όπως οι πυρηνικοί αντιδραστήρες, οι επιταχυντές σωματιδίων ακόμη και πυρηνικές δοκιμές. Όπως έχουν καταγραφεί και στο παρελθόν, τα μεγάλα πυρηνικά ατυχήματα έχουν προκαλέσει σημαντική ρύπανση του περιβάλλοντος. Παράλληλα επιφέρουν υψηλές δόσεις ραδιενέργειας στον πληθυσμό κυρίως στην περιοχή του ατυχήματος. Μετά το πρώτο έτος από ένα πυρηνικό ατύχημα οι μόνοι αξιόλογοι ρύποι που παραμένουν στο έδαφος είναι τα ισότοπα του καϊσίου και μετά από μερικά έτη το καϊσίο-137 (Cs-137), δεδομένου ότι έχει μεγάλο χρόνο ημιζωής (30,2 χρόνια). Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν οι συγκεντρώσεις του τεχνητού ραδιενεργού ισότοπου του Cs-137 στο χώμα και στα βρύα.

Μετά το ατύχημα στον ηλεκτροπαραγωγικό σταθμό του Chernobyl τον Μάιο του 1986 μεγάλες συγκεντρώσεις ραδιενεργών ισότοπων εκλύθηκαν στην ατμόσφαιρα. Η απελευθέρωση της ραδιενέργειας μεταφέρθηκε και διασκορπίστηκε μέσω του ανέμου σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες, κύριο μέσο εναπόθεσης της ήταν η βροχή με επακόλουθο να επηρεαστούν ανέπαφα μέχρι τότε φυσικά περιβάλλοντα. Μεταξύ άλλων επηρεάστηκαν οικοσυστήματα όπως ορεινοί βοσκότοποι, αλπικά λιβάδια, βάλτοι αλλά και κωνοφόρα και φυλλοβόλα δάση.

Η εναπόθεση των τεχνητών ραδιοϊσοτόπων σε αυτές τις περιοχές έχει μακροπρόθεσμη επίδραση στο περιβάλλον και ιδιαίτερα στην τροφική αλυσίδα. Αυτό το γεγονός, επαληθεύεται με την παρουσία των τεχνητών ραδιοϊσοτόπων σε όλο το εύρος των δασών, των βοσκοτόπων και των φυσικών λιβαδιών, κυρίως της βόρειας Ελλάδας και της Πίνδου (M. Antonopoulos-Domis et al., 1997).

Τα τελευταία χρόνια ακολούθησε το πυρηνικό ατύχημα της Fukushima το οποίο συνέβαλε στην απελευθέρωση Cs-137 στην ατμόσφαιρα. Οι περιοχές οι οποίες βρίσκονται μακριά από την Ιαπωνία παρατηρείται ότι παρουσιάζουν εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα συγκεντρώσεων από τα ραδιενεργά κατάλοιπα αυτού του ατυχήματος.

Μετά το ατύχημα στο Chernobyl, ακολουθήθηκε μια ευρεία μελέτη σε όλο τον πλανήτη σχετικά με τις συγκεντρώσεις του Cs-137 σε διάφορα υλικά όπως το χώμα, ο αέρας, το νερό, το φαγητό, τα λαχανικά, τα βρύα κτλ (Betsou Chrysoula, 2020).

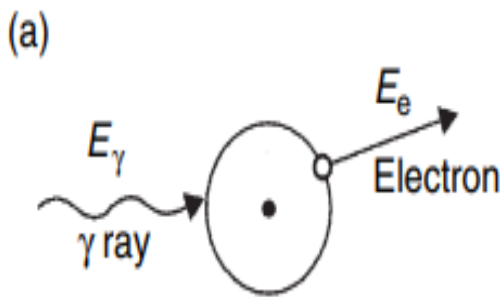
### 1.7) Αλληλεπίδραση γ-ακτινοβολίας με την ύλη

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (Photoelectric absorption):

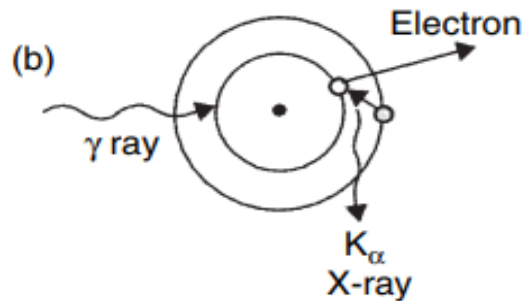
Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο προκύπτει από την αλληλεπίδραση ενός φωτονίου με ένα άτομο, με αποτέλεσμα να συμβεί απορρόφηση του φωτονίου και παράλληλη εκπομπή ενός ηλεκτρονίου του συγκεκριμένου ατόμου. Στο φαινόμενο αυτό παρατηρούμε ότι γίνεται απορρόφηση του φωτονίου από το ηλεκτρόνιο που βρίσκεται στην εσωτερική στοιβάδα του ατόμου, μετά την απορρόφηση το ηλεκτρόνιο βρίσκεται σε θέση να εγκαταλείψει το άτομο και να απομακρυνθεί από αυτό (ελευθερώνεται). Το ηλεκτρόνιο που ελευθερώνεται ονομάζεται φωτο-ηλεκτρόνιο. Βάση της αρχής διατήρησης της ορμής, η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι ίση με την κινητική ενέργεια του φωτονίου κατά την κρούση μείον την ενέργεια σύνδεσης ( $E_b$ ), όπου  $m$  είναι η μάζα του ηλεκτρονίου και  $u$  η ταχύτητα που εγκαταλείπει το άτομο. Η κινητική ενέργεια του φωτονίου ισούται με το γινόμενο της σταθεράς του Planck  $h$  με την συχνότητα του φωτονίου  $\nu$ .

$$E_e = E_\gamma - E_b = \frac{1}{2}mu^2 \quad (1.17)$$

$$E_\gamma = h\nu \quad (1.18)$$



Εικόνα 1.12α: Διαδικασία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου (Gilmore, 2008)

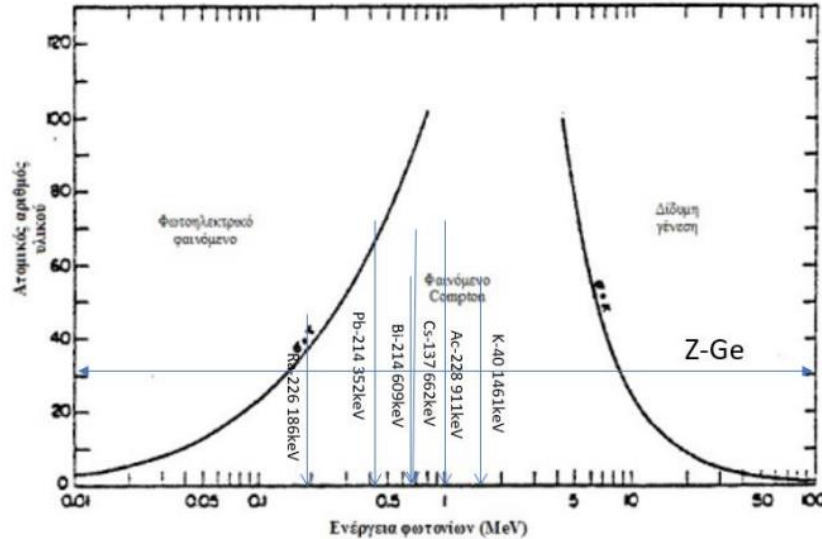


Εικόνα 1.12β: Εκπομπή φορτισουσών ακτίνων X (Gilmore, 2008)

Από την σχέση είναι φανερό ότι απαιτείται κατώφλι ενέργειας του φωτονίου, δηλαδή πρέπει η ενέργεια του φωτονίου  $h\nu$  να ξεπερνά την ενέργεια σύνδεσης  $E_b$ , έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί το φαινόμενο ( $h\nu > E_b$ ). Το κενό που αφήνει η διαφυγή του φωτό-ηλεκτρονίου μπορεί να συμπληρωθεί με ένα ηλεκτρόνιο υψηλότερης ενέργειας με ταυτόχρονη εκπομπή χαρακτηριστικής ακτίνας-X (φορρίζουσα ακτινοβολία X). Στην συνέχεια αυτή η ακτινοβολία θα υποστεί φωτοηλεκτρική απορρόφηση εκπέμποντας περαιτέρω ακτίνες-X, οι οποίες απορροφούνται με την σειρά τους, έως ότου τελικά απορροφηθεί όλη η ενέργεια της ακτίνας-γ.

Καθώς το ηλεκτρόνιο απομακρύνεται, το άτομο φορτίζεται θετικά, για σύντομο χρονικό διάστημα μέχρι να λάβει κάποιο ηλεκτρόνιο ή να δημιουργήσει κάποιον χημικό δεσμό. Ο καθοριστικός τρόπος ιονισμού του ατόμου προέρχεται από έμμεση διαδικασία και οφείλεται στην μεγάλη κινητική ενέργεια του φωτο-ηλεκτρονίου, που πρακτικά είναι ίση με την ενέργεια του προσπίπτοντος γ, αφού η ενέργεια του γ είναι πολύ μεγαλύτερη (ως πυρηνικής προέλευσης) από την ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου στο άτομο. Το φωτο-ηλεκτρόνιο κινούμενο με μεγάλη ταχύτητα μέσα στο υλικό, συγκρούεται με ηλεκτρόνια των ατόμων, επιβραδύνεται μέχρι το σημείου που χάνει όλη του την κινητική ενέργεια και σταματάει. Κατά την διαδικασία αυτή, το φωτο-ηλεκτρόνιο παράγει μεγάλο αριθμό ζευγών θετικών ιόντων και ελευθέρων ηλεκτρονίων

με αποτέλεσμα να ιονίζει το υλικό. Επομένως οι ακτίνες γ ιονίζουν έμμεσα το υλικό στο οποίο εισέρχονται. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι ο κύριος τρόπος αλληλεπίδρασης των ακτινών γ σχετικά χαμηλής ενέργειας (<500keV) και εντείνεται με την παρουσία υλικών με μεγάλο ατομικό αριθμό (Gilmore, 2008; Μ. Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2005).

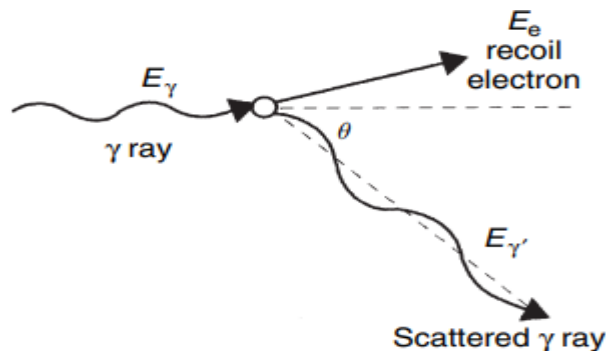


Εικόνα 1.13: Περιοχές επικράτησης του κάθε φαινομένου συναρτήσει της ενέργειας και του ατομικού αριθμού (Knoll Glenn, 2000)

### Σκέδαση Compton (Compton scattering):

Το φαινόμενο της σκέδασης Compton αποτελεί τον σημαντικότερο τρόπο άμεσης αλληλεπίδρασης φωτονίων μέσης ενέργειας με την ύλη. Στην περίπτωση που η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου είναι σχετικά υψηλή (μεγαλύτερη των 500 keV), τότε το αναμενόμενο φαινόμενο που θα εξελιχθεί είναι η σκέδαση Compton. Το φωτόνιο γ – ακτινοβολίας συγκρούεται με ένα ηλεκτρόνιο του υλικού. Στην συνέχεια προκύπτει σκεδαζόμενο φωτόνιο που κινείται με μικρότερη ενέργεια από το αρχικό φωτόνιο και διαφορετικής κατεύθυνσης σε γωνία  $\theta$ .

$$E_e = E_\gamma - E'_\gamma \quad (1.19)$$



Εικόνα 1.14: Διαδικασία της σκέδασης Compton (Gilmore, 2008)

Το φαινόμενο εμφανίζεται ως ανελαστική σκέδαση και οι ενέργειες ηλεκτρονίων και σκεδασμένου φωτονίου μπορούν να υπολογιστούν με εφαρμογή των αρχών διατήρησης της ενέργειας και της ορμής. Υποθέτοντας μηδενική την ταχύτητα του ηλεκτρονίου πριν τη σκέδαση, η ενέργεια του φωτονίου  $E'_\gamma$  μετά την σκέδαση προκύπτει:

$$E'_\gamma = hv' = hv / [1 + (hv * \frac{1 - \cos\theta}{m_0 c^2})] \quad (1.20)$$

Όπου  $hv$  είναι η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου  $\gamma$ -ακτινοβολίας,  $m_0$  είναι η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου και  $c$  η ταχύτητα του φωτός. Όπως φαίνεται η ενέργεια  $E'_\gamma$  του σκεδασμένου φωτονίου εξαρτάται από τη γωνία σκέδασης  $\theta$ . Για γωνία  $\theta=0$ , αντιστοιχεί μη σκέδαση, συνεπάγεται:

$$E'_\gamma = E_\gamma = hv \Rightarrow E_e = 0 \quad (1.21)$$

Η ελάχιστη ενέργεια του σκεδασμένου φωτονίου προκύπτει για την οπισθοσκέδαση (Backscatter)  $\theta=\pi$ . Το φάσμα του ανιχνευτή θα δείχνει μια κορυφή στην περιοχή των 0,2 έως 0,25 MeV. Η κορυφή αυτή προκαλείται μέσω της σκέδασης Compton των ακτινών  $\gamma$  που αλληλεπιδρούν με τα υλικά που περιβάλλουν τον ανιχνευτή (Knoll Glenn, 2000). Το σκεδασμένο ηλεκτρόνιο θα έχει ενέργεια:

$$E_e = hv - hv' \quad (1.22)$$

Και αυτή έχει μέγιστο για  $\theta=\pi$ .

Το σκεδασμένο ηλεκτρόνιο κινούμενο με μεγάλη ταχύτητα αλληλεπιδρά με τα ηλεκτρόνια των ατόμων του υλικού, επιβραδύνεται και μέχρις ότου σταματήσει παράγει μεγάλο αριθμό ζευγών θετικών ιόντων και ελευθέρων ηλεκτρονίων. Όπως και στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, έμμεσα δηλαδή οι ακτίνες  $\gamma$  ionίζουν το υλικό στο οποίο εισέρχονται με την δράση των σκεδασμένων ηλεκτρονίων (Μ. Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2005).

#### Δίδυμη γένεση ή σχηματισμός ζεύγους (Pair production):

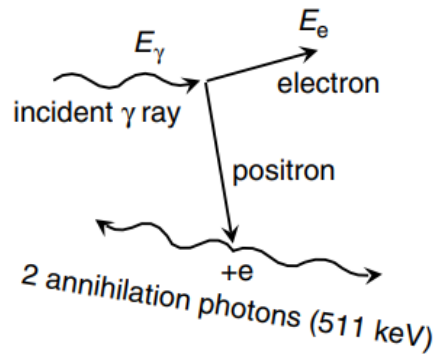
Σε αντίθεση με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και την σκέδαση Compton, το αποτέλεσμα της δίδυμης γένεσης προκύπτει από την αλληλεπίδραση του φωτονίου  $\gamma$  και του ατόμου, κατά την οποία το φωτόνιο εξαφανίζεται και στη θέση του εμφανίζονται ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο. Για να επιτευχθεί το φαινόμενο απαιτείται η ενέργεια του φωτονίου να είναι μεγαλύτερη ή ίση με την μάζα ηρεμίας των δύο σωματιδίων που λαμβάνονται. Συγκεκριμένα πρόκειται για μετατροπή ενέργειας σε μάζα. Η ενέργεια που απαιτείται για την δημιουργία των δύο σωματιδίων πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 1022 keV. Από την αρχή διατήρησης της ενέργειας προκύπτει ότι το άθροισμα  $T$  της κινητικής ενέργειας του ηλεκτρονίου και του ποζιτρονίου είναι

$$T = h * \nu - 2m_0 * c^2 \quad (1.23)$$

όπου  $h\nu$  είναι η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου  $\gamma$ , με τον όρο  $m_0$  απεικονίζεται η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου και  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός. Σύμφωνα με την πιο πάνω εξίσωση για να επιτευχθεί το φαινόμενο το άθροισμα των κινητικών ενεργειών ( $T$ ) πρέπει να είναι μεγαλύτερο του μηδενός, βάση αυτού διαπιστώνουμε ότι η κινητική ενέργεια του φωτονίου

πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το διπλάσιο γινόμενο της μάζα του ηλεκτρονίου επί την ταχύτητα του φωτός

$$(h * \nu > 2m_0 * c^2 = 1,02MeV). \quad (1.24)$$



Εικόνα 1.15: Η διαδικασία της δίδυμης γένεσης (Gilmore, 2008)

Το ηλεκτρόνιο και το ποζιτρόνιο έχουν μεγάλη κινητική ενέργεια, η οποία προκύπτει από την περίσσεια ενέργεια για την δημιουργία τους. Τα σωματίδια αυτά έχουν μεγάλη ταχύτητα και κινούμενα μέσα στο υλικό αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρόνια των ατόμων του υλικού. Κατά την κίνηση τους μέσα στο υλικό, μέχρι να αποκτήσουν μηδενική ταχύτητα, παράγουν μεγάλο αριθμό ζευγών θετικών ιόντων και ελευθέρων ηλεκτρονίων. Όπως και στα προηγούμενα φαινόμενα, έμμεσα δηλαδή με την δράση των παράγωγων στοιχείων από την πρόσκρουση του φωτονίου στο άτομο προκύπτει ο ιονισμός του υλικού, στο οποίο φτάνουν οι ακτίνες  $\gamma$  (Μ. Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2005).



## **Κεφάλαιο 2 - Γεωτεκτονικές ζώνες και γεωμορφολογία εδάφους στον Ελλαδικό χώρο**

### **2.1) Εισαγωγή στις γεωτεκτονικές ζώνες**

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι στην ευρύτερη περιοχή της Βορείου Ελλάδος και συγκεκριμένα οι περιφέρειες Κεντρικής, Ανατολικής και Δυτικής Μακεδονίας. Μεμονωμένα δείγματα προς μελέτη έχουν ληφθεί και από άλλες περιφέρειες όπως η Ήπειρος, η Θεσσαλία, η περιφέρεια Δυτικής Ελλάδας και η Θράκη. Στις περιοχές που έχουν αναφερθεί, παρατηρούνται έντονες διαφορές στην γεωμορφολογία του εδάφους και στα πετρώματα που τις απαρτίζουν.

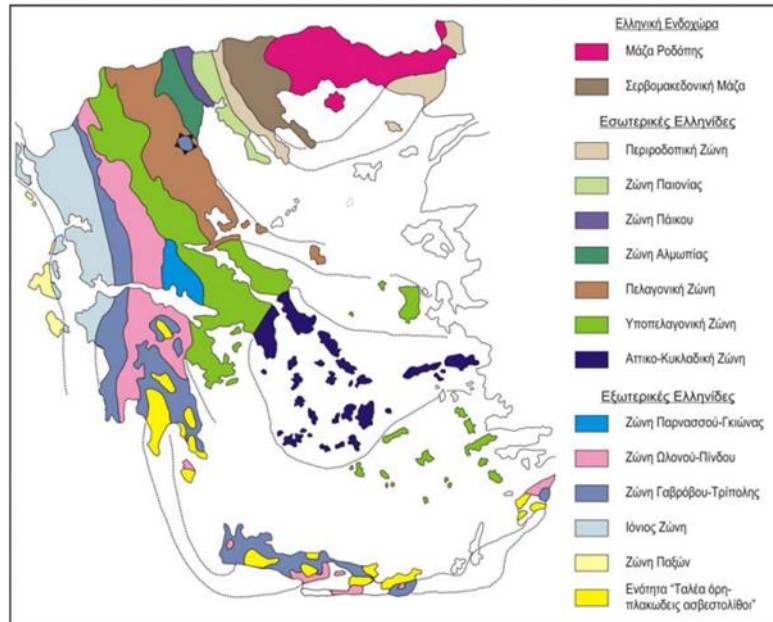
Ο κύριος παράγοντας για την επιλογή των υφιστάμενων σημείων για την λήψη δειγμάτων προς μέτρηση είναι τα μαγματικά πετρώματα, τα οποία αποτελούν ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά του ελληνικού ορογενούς. Τα μαγματικά πετρώματα στην Ελλάδα απαρτίζονται τόσο με πλουτωνική, όσο και με την ηφαιστειακή μορφή. Η πλουτωνική μορφή των πετρωμάτων λαμβάνει χώρα όταν η πίεση του μάγματος δεν είναι αρκετή για να σπάσει τα επιφανειακά πετρώματα της Γης, τότε αυτό αντί να χυθεί έξω, διεισδύει μέσα σε άλλα πετρώματα του στερεού φλοιού. Στην περίπτωση αυτή το μάγμα αργεί πολύ να κρυσταλλώσει και δημιουργεί τα πλουτωνικά πετρώματα. Από την χημική σύσταση του μάγματος παράγονται τα διάφορα είδη πλουτωνίων όπως ο γρανίτης, ο γάββρος κτλ. Αντίθετα στην περίπτωση της ηφαιστειακής μορφής του πετρώματος το μάγμα φτάνει στην επιφάνεια της Γης, η λάβα ψύχεται άμεσα, στερεοποιείται και δημιουργούνται τα πυριγενή πετρώματα. Λόγω της άμεσης ψύξης δεν δημιουργούνται μεγάλοι κρύσταλλοι ορυκτών με συνηθέστερους το ρυόλιθο, τον βασάλτη και τον οψιανό. Αυτά τα είδη των πετρωμάτων εμφανίζονται στις περισσότερες ελληνικές γεωτεκτονικές ζώνες. (Οικονομόπουλος, 2008)

Ειδικότερα, τα γρανιτικά πετρώματα στον ελλαδικό χώρο εντοπίζονται σε όλες τις εσωτερικές Ελληνίδες και τις ζώνες της ενδοχώρας. Πιο συγκεκριμένα, εντοπίζονται στη Μάζα της Ροδόπης, στη Σερβομακεδονική Μάζα, στην Περιροδοπική ζώνη, στη ζώνη Αξιού, στην Πελαγονική ζώνη και στην Αττικοκυκλαδική Μάζα.

Από τις γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδας η μάζα Ροδόπης και η Σερβομακεδονική μάζα αποτελούν την «Ελληνική Ενδοχώρα», οι ζώνες Περιροδοπικής, Παιονίας, Πάικου, Αλμωπίας, Πελαγονική, Αττικοκυκλαδική και Υποπελαγονική ονομάζονται «Εσωτερικές Ελληνίδες». Στις «Εξωτερικές Ελληνίδες» συγκαταλέγονται οι ζώνες Παρνασσού-Γκίωνα, Ωλονού-Πίνδου, Γαβρόβου-Τρίπολης, Αδριατικοϊόνιος και Παξών (Δ. Μουντράκης, 1985).

Οι μάζες Ροδόπης και Σερβομακεδονική της Ελληνικής Ενδοχώρας είναι τμήματα του παλιού ηπειρωτικού φλοιού. Τα λίγα Αλπικά ιζήματα των δυο ζωνών υποδηλώνουν ότι στους Αλπικούς χρόνους η Ελληνική Ενδοχώρα ήταν ρηχή θάλασσα με το μεγαλύτερο μέρος της να ήταν χερσαίο. Όσον αφορά τις Εσωτερικές Ελληνίδες η διαίρεση τους σε ζώνες παρουσιάζει ότι το μεγαλύτερο μέρος τους αντιπροσωπεύει την κατωφέρεια της Ελληνικής Ενδοχώρας προς την ωκεάνια περιοχή αλλά και την ίδια την ωκεάνια περιοχή με την παρουσία ιζηματογένεσης βαθιάς θάλασσας. Ένα μεγάλο μέρος των Εξωτερικών Ελληνίδων αποτελεί κομμάτι της Απούλιας μικρόπλακας και αντιπροσωπεύει περιοχές συνεχούς ηπειρωτικής ιζηματογένεσης. Παράλληλα παρουσιάζεται διαφοροποίηση στην ζώνη Αδριατικοϊόνιου, η οποία εμφανίζει χαρακτηριστικά ηπειρωτικής λεκάνης με παρουσία πελαγικών ιζημάτων (Δ. Μουντράκης, 1985).

Στην συνέχεια γίνεται σύντομη περιγραφή των γεωτεκτονικών ζωνών της Ελλάδας, στις οποίες εμφανίζονται γρανιτικά πετρώματα και από αυτές ακολουθήθηκε η διαδικασία της δειγματοληψίας για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας.



Εικόνα 2.1: Οι γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδος (Μουντράκης, 2010)

### Μάζα Ροδόπης

Η μάζα της Ροδόπης γεωγραφικά περιλαμβάνει το ένα τμήμα της νότιας Βουλγαρίας, την ανατολική Μακεδονία, τη Θάσο και εκτείνεται στο μεγαλύτερο μέρος της Θράκης στον ελληνικό χώρο. Συνορεύει με την Σερβομακεδονική μάζα στο δυτικό της όριο, με σύνορο τους τον ποταμό Στρυμόνα, ενώ παράλληλα στο νότιο και νοτιοανατολικό της άκρο βρίσκεται η Περιοδοπική ζώνη.

Ανά τον χρόνο έχει γίνει εκτενής μελέτη για την λιθολογία της μάζας της Ροδόπης από διάφορους ερευνητές. Στην πιο πρόσφατη μελέτη, αναφέρεται ότι η μάζα της Ροδόπης αποτελείται από δύο σειρές πετρωμάτων: την Ανώτερη Τεκτονική Ενότητα ή ενότητα Σιδηρόνερου και την Κατώτερη Τεκτονική Ενότητα ή ενότητα Παγγαίου.

Η μάζα της Ροδόπης χαρακτηρίζεται από έντονη παρουσία πυριγενών πετρωμάτων, όπου κεντρικά και ανατολικά της μάζας είναι ευρέως διαδεδομένες οι ηφαιστειακές δράσεις κατά το Κάτω Ηώκαινό – Ολιγόκαινό (23 – 35 εκ. έτη). Βόρεια της Ξάνθης παρουσιάζεται η πρώτη ηφαιστειακή δραστηριότητα (27 εκ. έτη), ενώ η δεύτερη είναι κοντά στην περιοχή του Έβρου (28 εκ. έτη). (Παπαδοπούλου Α. Αργυρίου, 2011)

Χαρακτηριστικό της τεκτονικής της μάζας Ροδόπης αποτελεί το ενεργό ρήγμα Μαρωνείας – Μάρκης, το οποίο οριοθετεί τις ακτές της Θράκης μεταξύ Αγ. Χαράλαμους Μαρωνείας (Ισμαρος) και Αλεξανδρούπολης. Με βάση την γεωμετρία του και τη γεωμορφολογία του χαρακτηριστικά διακρίνεται σε τρία ανεξάρτητα τμήματα. Το πρώτο τμήμα και δυτικότερο τμήμα της Μαρμαρίτσας, το δεύτερο ενδιάμεσο τμήμα της Μεσημβρίας και το ανατολικότερο της Μάρκης που πιθανώς εκτείνεται μέχρι τις ακτές της Αλεξανδρούπολης (Μέλφος et al., 2018).

## Σερβομακεδονική Μάζα

Η Σερβομακεδονική μάζα είναι μια σύνθετη γεωτεκτονική ενότητα η οποία εκτείνεται από το Βελιγράδι, σαν μια επιμήκης στενή ζώνη έως την χερσόνησο της Χαλκιδικής στην βόρεια Ελλάδα. Παρουσιάζεται αρκετά περίπλοκη δομή στην τεκτονική της μάζας καθώς υπάρχει πλήθος λιθολογικών ενότητων. Όπως έχει αναφερθεί η Σερβομακεδονική μάζα στο ανατολικό της τμήμα συνορεύει με την Μάζα Ροδόπης, κατά μήκος του Στρυμόνα. Στο δυτικό περιθώριο βρίσκεται σε τεκτονική επαφή κυρίως με πετρώματα της Περιοδοπικής ζώνης. Στο όριο των δύο ζωνών εμφανίζεται επικάλυψη των πετρωμάτων της Περιοδοπικής ζώνης από αυτά της Σερβομακεδονικής μάζας.

Η τεκτονική δομή της Σερβομακεδονικής μάζας αποτελείται από δύο ενότητες, την κατώτερη ενότητα Κερδυλλίων και την ανώτερη ενότητα Βερτίσκου. Τα κύρια πετρώματα της κατώτερης ενότητας των Κερδυλλίων είναι μαρμαρυγιακοί γνεύσιοι και μάρμαρα, ενώ τα πετρώματα της ανώτερης ενότητας είναι κυρίως μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι και αμφιβολίτες. Στα πετρώματα της Σερβομακεδονικής μάζας διεσδύουν μεγαλύτεροι και μικρότεροι όγκοι πλουτωνικών πετρωμάτων, όπως οι πλουτωνίτες της Αρναίας, της Κερκίνης, της Ιερισσού, του Στρατωνίου και του Αγίου Όρους (Παπαδοπούλου Α. Αργυρίου, 2011).

Στην ευρύτερη περιοχή της Βορείου Χαλκιδικής παρουσιάζονται δυο ενεργά ρήγματα τα οποία μπορούν να διακριθούν σε μικρότερα τμήματα. Συγκεκριμένα το ρήγμα του Στρατωνίου – Βαρβάρας και το ρήγμα Γοματίου – Μεγάλης Παναγίας.

Το πρώτο ρήγμα έχει συνολικό μήκος 30km και μπορεί να διακριθεί σε τρία τμήματα όπου το κάθε ένα από αυτά μπορεί να χωριστεί σε άλλα δύο μικρότερα. Το πρώτο τμήμα εκτείνεται από το χωρίο Βαρβάρα έως το Στρατωνίκη, το δυο τμήμα είναι συνέχεια του πρώτου που φτάνει μέχρι το Στρατώνι και το τρίτο τμήμα συνεχίζεται υποθαλάσσια. Το ρήγμα Στρατωνίου αποτελεί σε σημαντικό μήκος χαρτογραφικό όριο της κατώτερης ενότητας Κερδυλλίων με την ανώτερη ενότητα Βερτίσκου της Σερβομακεδονικής μάζας. Αντίστοιχα το ρήγμα Γοματίου – Μεγάλης Παναγίας μπορεί να διαιρεθεί σε δυο τμήματα. Το πρώτο τμήμα του ρήγματος ξεκινάει από τη Μεγάλη Παναγίας και έχει μήκος περίπου 7,5 km ενώ το δεύτερο τμήμα του ρήγματος του Γοματίου έχει μήκος 8 km (Παυλίδης Σπυρίδων et al., 2010).

Βορειότερα και βορειοανατολικά της πόλης της Θεσσαλονίκης βρίσκεται το ενεργό ρήγμα Σοχού. Είναι κανονικό ρήγμα με πιθανή προέκταση του προς τα ανατολικά στο ρήγμα Μαυρούδας. Έχει συνολικό μήκος 28 km και χωρίζεται σε δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα και μεγαλύτερο βρίσκεται εντός της Σερβομακεδονικής μάζας στην ενότητα Βερτίσκου, όπου συναντούμε κρυσταλλοσχιστώδη και γρανιτικά πετρώματα. Το δεύτερο τμήμα εκτείνεται από το Κρουονέρι μέχρι τον Σοχό (Ζερβοπούλου Α., 2010).

## Περιοδοπική Ζώνη

Η Περιοδοπική ζώνη στον Ελλαδικό χώρο εκτείνεται από τα σύνορα με τη Βόρεια Μακεδονία προς τα ΝΑ, συνεχίζει στη Χαλκιδική μέχρι τη χερσόνησο της Σιθωνίας και στη συνέχεια κάμπτεται προς τα ΒΑ. Περνάει από το νοτιότερο άκρο της χερσονήσου του Άθω, τη Σαμοθράκη και καταλήγει στη Θράκη, στην περιοχή του Έβρου. Ερευνητικά θεωρείται ότι η Περιοδοπική ζώνη είναι μια ζώνη οφειολίθων που διαχωρίζει τη Σερβομακεδονική μάζα από την ζώνη Αξιού.

Στην περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας η Περιοδοπική έρχεται σε επαφή με τη Σερβομακεδονική μάζα. Η Περιοδοπική ζώνη σε αυτό το τμήμα τέμνεται σε τρεις ενότητες, την ενότητα Ντεβέ Κοράν – Δουμπία, την ενότητα Μελισσοχωρίου – Χολομώντα και την ενότητα Ασπρης Βρύσης – Χορτιάτη.

Στο βορειοδυτικό τμήμα της Περιοδοπικής ζώνης εμφανίζονται κυρίως ηφαιστιογενή ιζήματα, μάρμαρα και ασβεστόλιθους που συχνά περιλαμβάνουν γραφιτικούς φυλλίτες. Με νοτιοδυτική κατεύθυνση συναντούμε εναλλασσόμενα στρώματα μαρμάρων αλλά και ιζήματα βαθιάς θάλασσας με μαγματική προέλευση. Στο ανατολικό άκρο στην περιοχή του Έβρου παρουσιάζονται σχιστόλιθοι και χαλαζίτες. Η παρουσία πλουτωνικών όγκων και γρανιτών στην Περιοδοπική ζώνη γίνεται στη Σιθωνία Χαλκιδικής, στη Σαμοθράκη και στη περιοχή της Θράκης (Παπαδοπούλου Α. Αργυρίου, 2011).

Εντός της Περιοδοπικής ζώνης στον δυτικό τμήμα της παρουσιάζονται οι ρηξιγενείς ζώνες της Μυγδόνιας Λεκάνης, η οποία αποτελείται από τεκτονικό βύθισμα που αναπτύχθηκε λόγω των εφελκυστικών τάσεων. Τα περιφερειακά ρήγματα τα οποία οριοθετούν τη λεκάνη θεωρούνται σεισμικά ενεργά. Ένα από τα κυριότερα ρήγματα της λεκάνης αποτελεί το ενεργό ρήγμα Γερακαρούς – Νικομιδηνού – Στίβου – Περιστερώνα (F-GNSP), το οποίο έδωσε το 1978 τον σεισμό στον Στίβο. Η συνολική του απόσταση από την πόλη της Θεσσαλονίκης είναι περίπου 28 km προς τα ανατολικά. Έχει συνολικό μήκος 12 km και οριοθετεί το νότιο τμήμα της λίμνης Λαγκαδά και του ενδιάμεσου τμήματος των λιμνών.

Επίσης νότια της λίμνης Βόλβης βρίσκεται το ρήγμα της Ν. Απολλωνίας – Ν. Μαδύτου (F-AM). Το ρήγμα είναι κανονικό, έχει μήκος 10 km και εκτείνεται από την Ν. Απολλωνία μέχρι την Ν. Μάδυτο, ενώ διακόπτεται από το ρήγμα λουτρών Βόλβης. Κοντά στο πολεοδομικό συγκρότημα της πόλης της Θεσσαλονίκης παρουσιάζεται το ρήγμα Πυλαίας – Πανοράματος. Απέχει 6 km από το κέντρο της πόλης και έχει συνολικό μήκος 9 km. Εκτείνεται από ανατολικά του Πανοράματος μέχρι και τον Δήμο της Πυλαίας και πιθανά προεκτείνεται εντός της πόλης (Ζερβοπούλου Α., 2010).



Εικόνα 2.2: Σεισμολογικά ρήγματα στη ρηξιγενής ζώνη της Μυγδόνιας λεκάνης (Ζερβοπούλου Α., 2010)

## Ζώνη Αξιού

Η ζώνη Αξιού (Vardar, όπως αναφέρεται στην διεθνή βιβλιογραφία) εκτείνεται από το Πανονικό λεκανοπέδιο και συνεχίζει νοτιότερα ακολουθώντας τη διάταξη των Ελληνικών οροσειρών. Αποτελεί μια από τις σημαντικότερες γεωτεκτονικές ζώνες για την γεωδυναμική εξέλιξη της Ελλάδας. Συνορεύει με τη Σερβομακεδονική μάζα από ανατολικά και με τη Πελαγονική ζώνη στα δυτικά. Εκφράζει την συρραφή των Εσωτερικών Ελληνίδων, από τα ανατολικά προς τα δυτικά διακρίνεται στις υποζώνες Παιονίας, Πάικου και Αλμωπίας.

Στη ζώνη Αξιού περιλαμβάνονται οφειολιθικά τμήματα και αλπικά ιζημάτα, ενώ συναντούνται και παρεμβολές πετρωμάτων που προέρχονται από τη Σερβομακεδονική μάζα. Στη ζώνη Αξιού διεισδύουν γρανιτικά πετρώματα όπως ο πλουτωνίτης του Φανού και του Μονοπήγαδου (Παπαδοπούλου Α. Αργυρίου, 2011).

Εντός της ζώνης Αξιού, βόρεια και βορειοδυτικά της πόλης της Θεσσαλονίκης βρίσκεται το ενεργό ρήγμα Αγχιάλου – Ν. Μεσημβρίας. Είναι κανονικό ρήγμα, το ορατό του μήκος είναι 8 km και υπάρχει πιθανότητα προέκτασης του προς τα δυτικά εντός των αποθέσεων του Αξιού ποταμού (Ζερβοπούλου Α., 2010).

## Πελαγονική ζώνη

Η Πελαγονική ζώνη ξεκινάει στον Ελληνικό χώρο από τα σύνορα με την Βόρεια Μακεδονία, συνεχίζει στους Ελληνικούς ορεινούς όγκους του Βόρα, του Βέρνου, των Πιερίων, του Ολύμπου, του Πηλίου και της Β. Εύβοιας. Περιλαμβάνει τα νησιά των Σποράδων και υπάρχει πιθανή προέκταση της ζώνης στο Αιγαίο και συγκεκριμένα στα νησιά Οινούσες (βόρεια της Χίου).

Στο βόρειο τμήμα, στην ενότητα της Καστοριάς, συναντάμε τον πλουτωνίτη του Βαρνούντα και νοτιότερα το πλουτωνίτη της Καστοριάς. Στο νότιο τμήμα της ζώνης, στην ενότητα του Φλάμπουρου, απαντώνται οι πλουτωνίτες των Πιέριων, του Λιβαδίου, της Ολυμπιάδας, της Δεσκάτης και της Βερδικούσας (Παπαδοπούλου Α. Αργυρίου, 2011).

## Αττικοκυκλαδική Μάζα

Η Αττικοκυκλαδική Μάζα, γνωστή και ως Αττικοκυκλαδικό Κρυσταλλικό Σύμπλεγμα καταλαμβάνει τη Νότια Εύβοια, σημαντικό τμήμα της Αττικής, όλες τις Κυκλάδες και καταλήγει διαμέσου της Ικαρίας και της Σάμου στη κρυσταλλική μάζα του Menderes. Μαζί με τα αντίστοιχα κρυσταλλικά συμπλέγματα της δυτικής Μακεδονίας, της Θεσσαλίας και του Menderes (Δυτική Τουρκία), σχηματίζουν την Ενδιάμεση Αιγαϊκή Κρυσταλλική Ζώνη (Median Aegean Crystalline Belt)

Η Αττικοκυκλαδική ζώνη αποτελείται από ένα πολύπλοκο σύμπλεγμα από επάλληλα τοποθετημένα καλύμματα και απωθήσεις ιζημάτων. Σύμφωνα με το μοντέλο των Okrusch & Brocker (1990) διακρίνονται από ενότητες κυανοσχιστόλιθων, οφειολίθων και από μολαστικές αποθέσεις (Παπαδοπούλου Α. Αργυρίου, 2011).

## **2.2) Εισαγωγή στους σεισμούς**

Από την αρχή της δημιουργίας της, η γη μεταβάλλεται διαρκώς. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στις δυνάμεις που επιδρούν στη γη, από ενδογενείς ή εξωγενείς παράγοντες. Οι εξωγενείς δυνάμεις που ασκούνται στην γη είναι η ηλιακή ακτινοβολία και οι δυνάμεις έλξης από τη Σελήνη και τον Ήλιο. Ως ενδογενείς παράγοντες θεωρούνται η βαρύτητά, η περιστροφή της

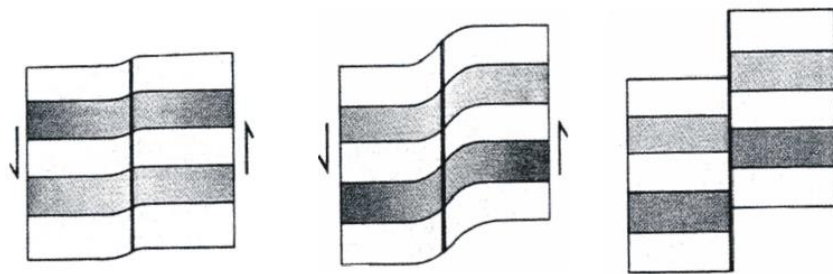
γης και η θερμότητα στο εσωτερικό της. Η θερμότητα αυτή, είναι από την γένεση της γης και παράγεται διαρκώς λόγω ραδιενεργών ή χημικών αντιδράσεων υπό την πίεση του βάρους της (Οικονομόπουλος, 2008).

Ως φυσικό επακόλουθο των ασκούμενων δυνάμεων στη γη είναι η συνεχής παραμόρφωση της και σχετική μετάθεση των γήινων πετρωμάτων. Αποτέλεσμα αυτών των διεργασιών αποτελούν τα γεωδυναμικά φαινόμενα, ένα τμήμα αυτών μπορεί να παρατηρηθεί και από την επιφάνεια της γης. Μερικά παραδείγματα είναι η ορογένεση, η ηπειρογένεση και η ηφαιστειότητα.

Ο φλοιός της γης παραμορφώνεται βαθμιαία κατά μεγάλα χρονικά διαστήματα, ώστε να προκαλούνται αναθλώσεις, ερπυσμοί κτλ. Σε μεμονωμένες περιπτώσεις η παραμόρφωση που θα υποστεί ο φλοιός της γης μπορεί να είναι μικρής χρονικής διάρκειας και κατά μήκος των σεισμολογικών ρηγμάτων ώστε να προκληθεί ο σεισμός. Ρήγμα θεωρείται η ασυνέχεια του φλοιού της γης, η οποία προκαλεί μετατόπιση των τεμαχίων εκατέρωθεν της. Κάθε κίνηση ενός ρήγματος δημιουργεί ένα σεισμό. Στον Ελληνικό χώρο, ελκύεται το μεγαλύτερο ποσοστό της σεισμικής ενέργειας του ευρωπαϊκού χώρου. Υπολογίζεται ότι το 95% της σεισμικής ενέργειας της Ευρώπης απελευθερώνεται στην Ελλάδα (Οικονομόπουλος, 2008).

Οι σεισμοί είναι δονήσεις του υπεδάφους που παράγονται κατά τη διάρκεια διαταράξεων της μηχανικής ισορροπίας μεταξύ των πετρωμάτων στο εσωτερικό της γης, από φυσικό αίτιο. Η πλειονότητα των σεισμικών δονήσεων προέρχεται από τα περιθώρια των τεκτονικών πλακών του φλοιού της γης. Κατά την μακρόχρονη επίδραση των τεκτονικών δυνάμεων ένα πέτρωμα αρχικά κάμπτεται συσσωρεύοντας βαθμιαία ελαστική ενέργεια (Εικόνα 2.3). Όταν ξεπεραστεί το όριο αντοχής του πετρώματος σχηματίζεται μια διάρρηξη και το πέτρωμα αυτής αναπηδά προς τα πίσω ως αντίδραση της ελαστικής δύναμης (Οικονομόπουλος, 2008).

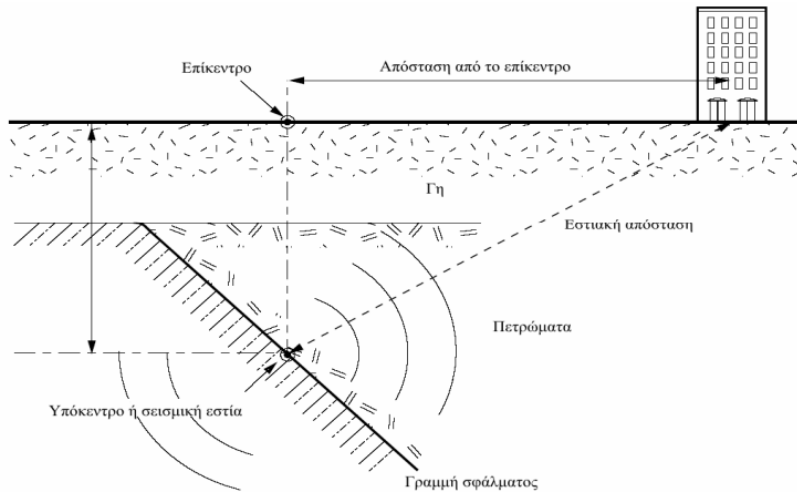
Η δεσμευμένη ενέργεια που έχει συσσωρευτεί μέσα στο φλοιό ή στο μανδύα της γης απελευθερώνεται με αποτέλεσμα να δημιουργούνται τα σεισμικά κύματα. Αφού απελευθερωθεί η ενέργεια τα σεισμικά κύματα διαδίδονται στην επιφάνεια του εδάφους. Υπάρχει πιθανότητα για εμφάνιση διάρρηξης του ρήγματος στην επιφάνεια της γης αλλά οι διαρρήξεις των ρηγμάτων σε βάθος θεωρούνται πολλαπλάσιες.



Εικόνα 2.3: Ελαστική συμπεριφορά κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής διάρρηξης (Δούτσος, 2000)

Η εστία του σεισμού δέχεται τη μεγαλύτερη μετατόπιση, η οποία ελαττώνεται προς τα όρια της διάρρηξης. Μια σειρά από μικρο-διαρρήξεις μπορεί να προηγηθούν του κύριου σεισμού ή να εκδηλωθούν μετά από αυτόν. Αντίστοιχα, αφού προκληθούν οι μικρο-διαρρήξεις παράγονται οι προσεισμοί και οι μετασεισμοί, που στο σύνολο τους μαζί με τον κύριο σεισμό αποτελούν τη σεισμική ακολουθία.

Η προβολή της εστίας του σεισμού στην επιφάνεια της γης ονομάζεται το επίκεντρο του σεισμού. Όλη η περιοχή που παραμορφώνεται γύρω από το ρήγμα πριν και μετά το σεισμό αποτελεί το σεισμογόνο χώρο (Δούτσος, 2000).



Εικόνα 2.4: Σεισμικά γνωρίσματα και χαρακτηριστικά στοιχεία (Οικονομόπουλος, 2008).

Οι διαρρήξεις που προέρχονται από τους σεισμούς έχουν μετατοπίσει την επιφάνεια της γης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε παγκόσμια κλίμακα παρουσιάζει η περίπτωση του μεγάλου ρήγματος του Αγίου Ανδρέα, στις δυτικές ακτές των Ηνωμένων Πολιτειών αλλά και γνωστό ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας, που διασχίζει τη βόρεια Τουρκία από τα ανατολικά προς τα δυτικά και διάφορα τμήματα του απολήγουν στο βόρειο Αιγαίο. Αλλά και στο Ελληνικό χώρο υπάρχουν αντίστοιχα παραδείγματα του παρελθόντος με έντονες επιφανειακές διαρρήξεις. Μερικά από αυτά είναι το ρήγμα το ρήγμα της Γερακαρούς – Στίβου (1978), όπου ο σεισμός προκάλεσε εκτεταμένες ζημιές στο συγκρότημα της Θεσσαλονίκης με 49 νεκρούς και 220 τραυματίες. Ακόμη η περίπτωση της Πάτρας όπου παρουσιάστηκε εδαφική ρωγμή 1,5 km κατά μήκος παλιού ρήγματος που ενεργοποιήθηκε από τους σεισμούς του 1989.



Εικόνες 2.5 – 2.6: Φωτογραφίες από τον Στίβο όπου διακρίνεται η μετατόπιση εκατέρωθεν του ρήγματος και οι πληγμένες οικίες (Ζερβοπούλου Α., 2010)

### 2.3) Σεισμολογικά Ρήγματα

Τα ρήγματα αποτελούν ασυνέχειες του στερεού φλοιού της γης απαντώνται σε όλες τις κλίμακες μετατοπίζοντας στρώματα, ακολουθίες ιζημάτων, μαγματικούς όγκους ακόμη και μεγάλα ηπειρωτικά τεμάχια. Τα ρήγματα γίνονται αντιληπτά όταν παρουσιάζεται διακοπή της συνέχειας των πετρωμάτων. Επίσης τα ρήγματα εμφανίζονται όταν σε κοντινή απόσταση παρουσιάζονται διαφορετικής δομής και ηλικίας πετρώματα.

Ακολουθώς γίνεται ταξινόμηση της κατάστασης των ρηγμάτων στις ακόλουθες κατηγορίες:

- **Ενεργό ρήγμα:** θεωρείται το ρήγμα το οποίο συνδέεται άμεσα με ισχυρούς σεισμούς (πρόσφατους ή ιστορικούς) και μπορεί να προκαλέσει ένα νέο σεισμό. Επίσης όταν παρουσιάζεται μικρή αλλά συνεχή μετακίνηση των δύο τεμαχίων του, για παράδειγμα όταν αποκόπτονται ιζήματα ή ηφαιστειακά πετρώματα
- **Πιθανό ενεργό ρήγμα:** είναι το ρήγμα που συνδέεται σε μικρό βαθμό συσχέτισης με μεγάλους σεισμούς ή πιθανότερά μόνο με μικροσεισμούς. Ακόμη για αυτό το ρήγμα δεν υπάρχουν ιστορικές πληροφορίες για σεισμούς και εδαφικές μετακινήσεις.
- **Αδρανές ρήγμα:** είναι το ρήγμα για το οποίο σεισμολογικές, ιστορικές και γεωλογικές ενδείξεις δεν αναφέρουν επαναδραστηριοποίηση του για το πρόσφατο παρελθόν (Σπύρος Β. Παυλίδης, 2003).

#### Τύποι ρηγμάτων

Τα ρήγματα ταξινομούνται ανάλογα με την διεύθυνση και την φορά τους, οι οποίες προκύπτουν από την εφαρμοσμένη τάση που ασκείται. Οι τύποι των σεισμολογικών ρηγμάτων είναι οι εξής:

##### 1) Κανονικά ρήγματα

Αυτός ο τύπος ρηγμάτων αποτυπώνεται στην περίπτωση όπου τα ρηξιγενή τεμάχια εκατέρωθεν του ρήματος απομακρύνονται το ένα από το άλλο. Προκαλείται έτσι μια διαστολή και απολέπνωση το φλοιού της γης στην οποία παρατηρείται δημιουργία στενόμακρων ζωνών βύθισης και ανύψωσης (τεκτονικές τάφρους και τεκτονικά κέρατα αντίστοιχα). Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το ρήγμα Γερακαρούς στην Περιοδοπική ζώνη.

##### 2) Ανάστροφα ρήγματα

Στην περίπτωση των ανάστροφων ρηγμάτων, τα ρηξιγενή τεμάχια έλκονται το ένα προς το άλλο. Κατά την διαδικασία αυτή, παρουσιάζεται συστολή και πάχυνση του φλοιού της γης, ως αποτέλεσμα της οριζόντιας συμπίεσης. Ανάστροφα ρήγματα μεγαλύτερα των 45° ονομάζονται επωθήσεις, ενώ αυτά που είναι μικρότερα των 45° επιπεύσεις.

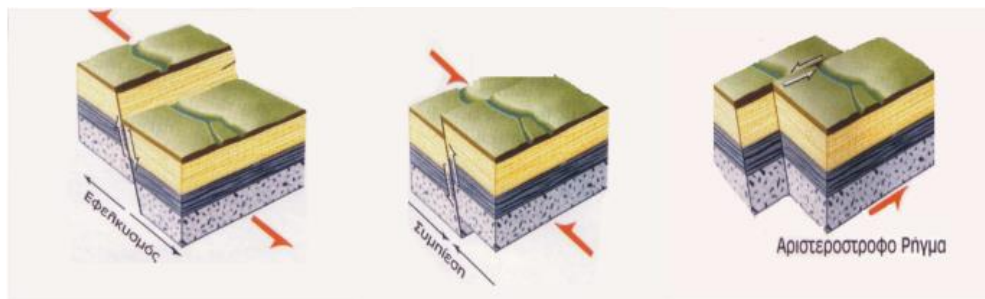
##### 3) Οριζόντια ρήγματα

Στα συγκεκριμένα ρήγματα παρουσιάζεται οριζόντια κίνηση κατά την οποία η φορά μπορεί να είναι δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη. Το μεγαλύτερο οριζόντιο ρήγμα στον Ελληνικό χώρο είναι αυτό της Καβάλας- Ξάνθης- που έχει μήκος μεγαλύτερο των 150 χιλιομέτρων (Οικονομόπουλος, 2008).



#### **2.4) Ραδόνιο στα υπόγεια νερά**

Το μετεωρικό νερό κατεισδύει στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες, μέσω των πόρων και των ρωγμών των πετρωμάτων αφού σε αυτό επιδράει η δύναμη της βαρύτητας. Όσο αυξάνεται το βάθος από την επιφάνεια της γης παρατηρείται μείωση της διείσδυσης του νερού στους υδροφόρους άξονες. Η μεγαλύτερη ποσότητα υπόγειου νερού συγκεντρώνεται μέχρι τα 750 μ. κάτω από την επιφάνεια της γης, ενώ σε μεγαλύτερο βάθος οι πόροι των πετρωμάτων



Εικόνα 2.7: Απεικόνιση ειδών των ρηγμάτων Α) Κανονικό ρήγμα Β) Ανάστροφο ρήγμα Γ) Οριζόντια μετατόπιση (Οικονομόπουλος, 2008)

κλείνουν και το νερό ελαχιστοποιείται. Σύμφωνα με δεδομένα πετρελαιογεωτρήσεων ή ερευνητικών γεωτρήσεων, έχουν εμφανιστεί δείγματα νερού σε βάθος μέχρι και 11km (Δούτσος, 2000).

Τα πετρώματα διαχωρίζονται αναλόγως της δυνατότητας κίνησης του νερού σε διαπερατά και αδιαπερατά. Η διαπερατότητα, δηλαδή η ικανότητα του νερού να κινείται δια μέσου των πόρων του εδάφους και των πετρωμάτων, εξαρτάται όχι μόνο από το μέγεθος των κενών μεταξύ των κόκκων του πετρώματος αλλά και από τον τρόπο που είναι συνδεδεμένοι οι πόροι. Πορώδη πετρώματα λοιπόν δεν είναι απαραίτητο να είναι και διαπερατά. Για παράδειγμα, πυριγενή πετρώματα όπως οι γρανίτες, βασάλτες κτλ, έχουν ελάχιστους πόρους με αποτέλεσμα να είναι διαπερατά μόνο όταν έχουν κατακεραματισθεί σε πυκνό σύστημα διακλάσεων ή ρηγμάτων. Τα πετρώματα αυτά λέγονται μακροδιαπερατά ή δευτερογενώς διαπερατά (Δούτσος, 2000).

Οι εκλύσεις Rn-222 γίνονται από το έδαφος στους πόρους, των υπόγειων υδροφόρων που είναι πληρωμένοι με νερό αναγκάζουν το Rn-222 να παραμείνει σε αυτούς δεδομένου ότι το μήκος διάχυσης του στο νερό είναι μικρό. Στην περίπτωση όπου το υπόγειο νερό κινείται γρήγορα παρατηρείται ότι ένα σημαντικό ποσοστό ραδονίου διαφεύγει από το πέτρωμα.

Τα δεδομένα διάχυσης ραδονίου διαφέρουν με την ύπαρξη νερού στις ρωγμές του υποβάθρου, όπου η συγκέντρωση Rn-222 είναι μεγαλύτερη από ότι στο περιβάλλον πέτρωμα. Ο λόγος για την υψηλή συγκέντρωση Rn-222 οφείλεται στη διαλυτότητα του ουρανίου το οποίο εκπλένεται από το πέτρωμα με την βοήθεια του υπόγειου νερού. Σύμφωνα με τους Landstrom και Tullborg (1990), αποδεικνύεται ότι οι συγκεντρώσεις ουρανίου στις επιστρώσεις των διαρρήξεων είναι 3 – 20 φορές υψηλότερες από ότι στο περιβάλλον πέτρωμα.

Οι συγκεντρώσεις ραδονίου σε υπόγεια ύδατα είναι μεταξύ των τιμών 10 – 200 Bq/L. Σε περιοχές στις οποίες το μητρικό πέτρωμα αποτελείται από πλούσιους σε ουράνιο γρανίτες το υπόγειο νερό εμφανίζει μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ραδονίου, κάποιες φορές μπορεί να ξεπερνούν τα 1000 Bq/L. Επίσης υπάρχουν πιθανότητες οι υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου να εμφανίζονται σε σημεία με πηγματίτες και φημιστίτες πλούσιους σε χαλαζία και άστριο.

Αντίθετα οι χαμηλές συγκεντρώσεις ραδονίου σε υπόγεια ύδατα παρουσιάζονται σε περιοχές όπου οι συγκεντρώσεις ουρανίου στα πετρώματα είναι χαμηλές.

Παρόλα αυτά, η συγκέντρωση ραδονίου δεν εξαρτάται απαραίτητα από τις συγκεντρώσεις ουρανίου στο μητρικό πέτρωμα. Για παράδειγμα, η συγκέντρωση ραδονίου στο νερό μπορεί να είναι υψηλή ακόμη και σε συνδυασμό με χαμηλή συγκέντρωση ουρανίου στο μητρικό πέτρωμα (Οικονομόπουλος, 2008).

### **2.5) Εκροή Ραδονίου**

Η μορφολογία του μητρικού πετρώματος στο έδαφος επηρεάζει τις συγκεντρώσεις ραδονίου. Σύμφωνα με μετρήσεις, παρουσιάζονται αυξημένες συγκεντρώσεις ραδονίου στον εδαφικό αέρα και στα υπόγεια νερά, σε περιοχές με ζώνες διάρρηξης, γεωλογικών ρηγμάτων και έντονης σεισμικότητας (Gümüş, 2023).

Η υγρασία του εδάφους παίζει σημαντικό ρόλο στην εκροή και τη διάχυση του Rn-222 στο έδαφος. Η υγρασία του εδάφους, σε μορφή ενός λεπτού φίλμ επηρεάζει άμεσα την εκροή Rn-222 δεσμεύοντας το αφού διαφεύγει από τη συμπαγή δομή του εδάφους. Εφόσον το νερό έρθει σε επαφή με το Rn-222, διαχωρίζεται σε αδιάλυτο και σε διαλυμένο στο νερό ανάλογα με τον όγκο του νερού και την θερμοκρασία. Η διαλυτότητα του νερού αυξάνεται με την μείωση της θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον συντελεστή Ostwald ( $K_T$ ), ο οποίος δίνει τον λόγο συγκέντρωσης του Rn-222 στο νερό σε σχέση με την συγκέντρωση Rn-222 στον αέρα (Χαραλάμπου, 2008).

Ο συντελεστής Ostwald υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$K_T = 0.105 + 0.405 * e^{-0.0502 * T} \quad (2.1)$$

Όπου το T αντιστοιχεί στην θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου (°C) (Di Carlo et al., 2019).

Παρατηρεί ότι το ραδόνιο εκλύεται και μεταφέρεται πιο γρήγορα στις ζώνες διάρρηξης σε σύγκριση με την διάχυση ή τη μετακίνηση του στα υπόγεια ύδατα. Αυτή η θεωρία βασίζεται στα γεωαέρια (π.χ. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> και N<sub>2</sub>) τα οποία ανέρχονται από βαθύτερα τμήματα των υπόγειων στρωμάτων προς την επιφάνεια και κατά την κίνηση τους μεταφέρουν το Rn-222 προς την επιφάνεια. Στις ζώνες διάρρηξης η αυξημένη συγκέντρωση ραδονίου σχετίζεται με τις αυξημένες συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> και He. Παρόλο που το Rn-222 είναι ευγενές αέριο υποβοηθάτε από τα άλλα δύο αέρια για να διαφύγει στην ατμόσφαιρα, χωρίς να κάνει χημικούς δεσμούς (Οικονομόπουλος, 2008).

Σύμφωνα με ερευνητικές εργασίας οι οποίες δείχνουν ότι οι αυξημένες συγκεντρώσεις Rn-222 στον εδαφικό αέρα που μπορούν να διαμορφωθούν πέραν από τα περιβάλλοντα στρώματα του εδάφους, εμφανίζονται πάνω από ορισμένες ζώνες διάρρηξης. Στις ζώνες διάρρηξης η αυξημένη συγκέντρωση Rn-222 σχετίζεται με αυξημένες συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> και He (Virk & Walia, 2001).

### **2.6) Ραδιενέργεια σε υδάτινα περιβάλλοντα**

Τα ραδιονουκλίδια διασκορπίζονται στο περιβάλλον από μια πληθώρα πηγών με συστηματικό ή τυχαίο τρόπο. Δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας του πλανήτη καλύπτεται από νερό, δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος των εκλυόμενων ραδιονουκλιδίων καταλήγουν εκεί. Λόγω των διακυμάνσεων στις πηγές εκπομπής

ραδιονουκλιδίων και τη συνακόλουθη διασπορά, ανάμειξη και μεταφορά ραδιονουκλιδίων στους ωκεανούς, τις θάλασσες, στις λίμνες και στα υπόλοιπα υδάτινα σώματα με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις να διαφέρουν από μία περιοχή σε άλλη. Η κατανόηση του τρόπου μεταφοράς και συσσώρευσης των ραδιονουκλιδίων στο υδάτινο περιβάλλον αποτελεί την βάση για την αξιολόγηση των δυσμενών, πραγματικών ή ενδεχόμενων επιπτώσεων σε αυτό και την ανθρώπινη υγεία.

Το νερό αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας της Γης και συγκεκριμένα το 70% αποτελείται από νερό των ωκεανών και μόνο το 5% είναι το γλυκό νερό, ενώ από το σύνολο του γλυκού νερού πάνω από το 30% είναι υπόγειο. Το νερό λόγω της δύναμης της βαρύτητας, διαρρέει αργά από την επιφάνεια προς το υπέδαφος ή μέσω των υδροφόρων φορέων, τελικά απορρέει σε λίμνες, ποτάμια και παράκτιες θαλάσσιες περιοχές. Τελικός αποδέκτης, σε κάθε περίπτωση, είναι οι ωκεανοί και οι υδροφόροι ορίζοντες, ενώ μέσω του υδρολογικού κύκλου μέρος των ραδιονουκλιδίων μπορεί να αναδιανέμονται στα υδάτινα σώματα. Τελικά τα ραδιονουκλίδια εξαφανίζονται από το περιβάλλον λόγω της ραδιενεργού αποδιέγερσης, με ρυθμό που εξαρτάται από το ραδιενεργό χρόνο ημιζωής του εκάστοτε ραδιονουκλιδίου (Ελευθερίου, 2014).

Εκτός από τα πρωτογενή ραδιονουκλίδια και τα κοσμογενούς προέλευσης, πληθώρα ραδιονουκλιδίων καταλήγουν στα υδάτινα περιβάλλοντα από ανθρώπινες δραστηριότητες. Η εμφάνιση τους αποτελεί ως επί το πλείστον τυχαίες εκλύσεις ή απορρίψεις από όλα τα στάδια του κύκλου των πυρηνικών καυσίμων (FAO, 1996). Οι κυριότερες συστηματικές ή τυχαίες πηγές ραδιονουκλιδίων από ανθρωπογενή δραστηριότητες που επιβαρύνουν το υδάτινο περιβάλλον είναι:

α) Οι πυρηνικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια δοκιμών των πυρηνικών όπλων το διάστημα μεταξύ 1945 – 1951, αλλά και οι πρώτες χρήσης τους το 1952 από τις Η.Π.Α. και το 1953 από την πρώην Σοβιετική Ένωση.

β) Η επανεπεξεργασία πυρηνικών από εγκαταστάσεις που βρίσκονται σε ακτές θαλασσών ή λιμνών. Για παράδειγμα οι εγκαταστάσεις επανεπεξεργασίας στο Sellafield της Αγγλίας, στο Cap de La Hague της Γαλλίας και στο Tokai της Ιαπωνίας.

γ) Το ατύχημα στο πυρηνικό εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο Chernobyl της Ουκρανίας, τον Απρίλιο του 1986. Πρόκειται για την μεγαλύτερη συμβολή ραδιενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον που έχει προκληθεί από χερσαίες εγκαταστάσεις πυρηνικών.

δ) Η πόντιση πυρηνικών αποβλήτων που πραγματοποιήθηκε από τις δυτικές χώρες σε εθνικό επίπεδο, από τα τέλη του 1940 έως τα μέσα της δεκαετίας του 1960. Τα κύρια συμβάντα έλαβαν χώρα στον Ατλαντικό και Ειρηνικό Ωκεανό από τις ΗΠΑ και στον ΒΑ Ατλαντικό από το Ηνωμένο Βασίλειο (Ελευθερίου, 2014).

## Κεφάλαιο 3 - Εργαστηριακές μετρήσεις και μέθοδος συλλογής

Για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε λήψη δειγμάτων από διάφορα σημεία του Ελληνικού χώρου με συγκεκριμένες διαδικασίες δειγματοληψίας. Έχουν ληφθεί δείγματα νερού, χώματος και βρύων. Για κάθε τύπο δείγματος ακολουθήθηκε διαφορετική μέθοδος δειγματοληψίας, έτσι ώστε να αλλοιώνεται σε μικρότερο βαθμό το αποτέλεσμα της συγκέντρωσης των ραδιονουκλιδίων, αλλά και για να γίνει σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μεθόδων δειγματοληψίας.

### 3.1) Δειγματοληψία νερού και πειραματικές μέθοδοι

Τα πειραματικά δείγματα νερού λήφθηκαν με δύο τύπους δοχείων για την μεταφορά τους στο εργαστήριο. Ο πρώτος τύπος είναι αλουμινένιου δοχείου με πώμα που κλείνει ερμητικά για την μεταφορά νερού με ευγενή αέρια όπως το ραδόνιο (Εικ. 3.1). Ο δεύτερος τύπος για την μεταφορά των δειγμάτων νερού, είναι τα πλαστικά δοχεία με υλικό κατασκευής PET (polyethylene terephthalate), τα οποία είναι ευρέως διαδεδομένα για την αποθήκευση ανθρακούχων αναψυκτικών (Εικ. 3.2). Τα πλαστικά μπουκάλια τύπου PET είναι κατάλληλα για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ραδονίου σε δείγματα νερού αρκεί το πώμα τους να κλείνει ερμητικά (Lucchetti et al., 2016).



Εικόνα 3.1: Αλουμινένιο δοχείο για την μεταφορά δείγματος νερού



Εικόνα 3.2: Πλαστικό δοχείο τύπου PET για την μεταφορά δείγματος νερού

Τα σημεία λήψης των δειγμάτων νερού ήταν φυσικές πηγές, με συνεχόμενη, φυσική ροή νερού αλλά και βρύσες με βάνες σε δημόσιους χώρους.

Τα δείγματα νερού μετρήθηκαν στους ανιχνευτές του εργαστηρίου μια μέρα μετά την δειγματοληψία τους έως και δύο μέρες μετά την δειγματοληψία τους, ώστε να μην έχουν σβήσει ακόμα τα θυγατρικά του ραδονίου.

Ακόμη ακολουθήθηκε συγκεκριμένη διαδικασία για την τοποθέτηση των δειγμάτων ως προς μέτρηση. Τα δείγματα που προορίζονταν για μέτρηση στον ανιχνευτή γ-φασματοσκοπίας εισάγονταν σε πλαστικά δοχεία (Εικόνα 3.3) των οποίων οι διαστάσεις έχουν βαθμονομηθεί από το εργαστήριο πυρηνικής τεχνολογίας και έχουν όγκο 260ml. Τα δείγματα της μέτρησης με θάλαμο ιονισμού τύπου Electret, τοποθετούνταν σε γυάλινο ειδικό δοχείο για τον συγκεκριμένο ανιχνευτή (Εικόνα 3.4), όγκου 123ml. Τέλος τα δείγματα νερού που μετρήθηκαν

με την μέθοδο του θαλάμου ιονισμού του ανιχνευτή Alpha Guard μεταφέρθηκαν σε γυάλινο δοχείο του ανιχνευτή, όγκου 100ml μέχρι να ξεκινήσει η πειραματική μέτρηση.



Εικόνα 3.3: Δείγμα νερού τοποθετημένο σε πλαστικό δοχείο για μέτρηση στον ανιχνευτή HPGe



Εικόνα 3.4: Δείγμα νερού τοποθετημένο σε γυάλινο δοχείο για μέτρηση στον ανιχνευτή EIC

### **3.2) Δειγματοληψία χώματος και πειραματικές μέθοδοι**

Τα δείγματα χώματος – ιλύς λήφθηκαν από συγκεκριμένα υδάτινα περιβάλλοντα όπως ποτάμια, ρυάκια ή ακόμα και λίμνες. Λόγω των υψηλών ποσοτήτων νερού που περιείχαν όλα τα δείγματα αποφασίστηκε πριν την μέτρηση τους στον ανιχνευτή γ-φασματοσκοπίας, να τοποθετούνται στον εργαστηριακό φούρνο για μία μέρα σε θερμοκρασίας 105°C.

Αφού τα δείγματα ξηράθηκαν κονιορτοποιούνται σε μεταλλικό γουδί, ώστε να μπορούν να συμπυκνωθούν στα δοχεία μέτρησης, χωρίς να σχηματίζουν διάκενα στην πλήρωση. Πριν τοποθετηθούν στον ανιχνευτή γ-φασματοσκοπίας τοποθετούνταν σε πλαστικό δοχείο pbq-1 (Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5: Δείγμα χώματος τοποθετημένο σε πλαστικό δοχείο pbq1 για μέτρηση στον ανιχνευτή HPGe

### **3.3) Δειγματοληψία βρύων και πειραματικές μέθοδοι**

Τα δείγματα βρύων λήφθηκαν κυρίως από κορμούς δέντρων κοντά στα υδάτινα περιβάλλοντα στα οποία έχει γίνει και δειγματοληψία χώματος από το έδαφος κοντά στον κορμό τους. Δείγματα βρύων πάρθηκαν από το ίδιο δέντρο αλλά από διαφορετικό ύψος, έτσι ώστε να μπορούν μελλοντικά να συγκριθούν τα αποτελέσματα και να αναλυθούν οι διαφορές μεταξύ δειγμάτων από διαφορετικό ύψος.

Όπως και στα δείγματα χώματος, έτσι και στα βρύα ακολουθείται η διαδικασία αποξήρανσης στον εργαστηριακό φούρνο. Τα δείγματα παραμένουν στο φούρνο για 2 ώρες, στην θερμοκρασία των 105°C. Η θερμοκρασία αυτή αποφασίστηκε ώστε να αποβάλλεται η υγρασία, η οποία συκρατείται εντός των βρύων.

Μετά την αποξήρανσή τους τα δείγματα τοποθετούνται σε πλαστικά κυάθια για να μετρηθούν οι συγκεντρώσεις των τεχνητών ραδιονουκλιδίων στον ανιχνευτή γ-φασματοσκοπίας.



Εικόνα 3.6: Δείγμα βρύων τοποθετημένα σε βαθμονομημένο πλαστικό δοχείο για μέτρηση στον ανιχνευτή HPGe

### **3.4) Όργανα μέτρησης**

Οι μετρήσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Για την εκπλήρωση της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός του εργαστηρίου. Οι μέθοδοι μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση ραδιονουκλιδίων ήταν:

- α) ανιχνευτής γ-φασματοσκοπίας υπερκαθαρού γερμανίου (HPGe)
- β) Θάλαμος ιονισμού παθητικού τύπου μέσω του ανιχνευτή Electret (EIC)
- γ) Θάλαμος ιονισμού ανοιχτού παραθύρου μέσω του ανιχνευτή AlphaGuard

### **3.5) Πειραματική διαδικασία με ανιχνευτή γ-φασματοσκοπίας HPGe**

Για την υλοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ο σταθερός ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου EGPC 50-210-R της εταιρείας EURISYS MESURES με απόδοση 50% (σε σύγκριση με έναν ανιχνευτή NaI ίδιου μεγέθους και σχήματος). Αποτελείται από έναν κρύσταλλο γερμανίου διαμέτρου 66,9mm και ύψους 56,3mm με θωράκιση από χαλκό, τεφλόν και αλουμίνιο. Με τον ανιχνευτή HPGe υπολογίζονται οι συγκεντρώσεις των φυσικών και

τεχνητών ραδιονουκλιδίων σε δείγματα νερού, χόματος και βρύων. Ο ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου ανήκει στη κατηγορία των ημιαγωγών ανιχνευτών.



Εικόνα 3.7: Ανιχνευτής HPGe στο εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Α.Π.Θ

### Ηλεκτρονική δομή ημιαγωγών ανιχνευτών – θεωρία ζωνών

Στα ελεύθερα άτομα, που οι μεταξύ τους αποστάσεις είναι μεγάλες, όπως για παράδειγμα στην αέρια κατάσταση της ύλης, τα ηλεκτρόνια μπορούν να έχουν ενέργειες σε καλά διακριτές στάθμες. Στους κρυστάλλους (στερεά) εξαιτίας των αμοιβαίων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ατόμων κάθε ενεργειακή στάθμη διευρύνεται, με αποτέλεσμα αντί της διακριτής επιτρεπτής ενεργειακής στάθμης, να υπάρχει επιτρεπτή ενεργειακή ζώνη για τα ηλεκτρόνια. Στις ενεργειακές ζώνες παρατηρούνται επικαλύψεις. Υπάρχουν στερεά όπου οι επιτρεπόμενες ενεργειακές ζώνες διαχωρίζονται από μη-επιτρεπόμενες ενεργειακές ζώνες. Τα ηλεκτρόνια των καθαρών υλικών δεν μπορούν να έχουν ενέργειες εντός των μη-επιτρεπόμενων ενεργειακών ζωνών (Μ. Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2005)

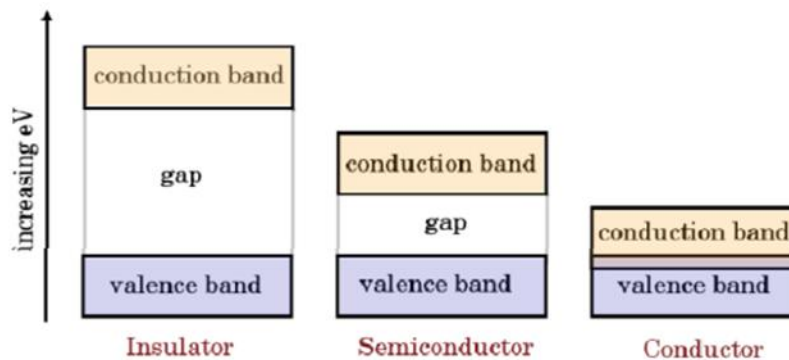
Οι ημιαγωγοί είναι κρυσταλλικά υλικά που μπορούν να θεωρηθούν ως το άθροισμα των ατόμων που αλληλοεπιδρούν. Τα άτομα έλκονται το ένα κοντά στο άλλο σχηματίζοντας ένα στερεό υλικό.

Οι ενεργειακές ζώνες των ηλεκτρονίων στους ημιαγωγούς αποτελούνται από τρεις περιοχές:

- η ζώνη σθένους
- το απαγορευμένο ενεργειακό χάσμα (απαγορευμένη περιοχή)
- η ζώνη αγωγιμότητας

Η ζώνη σθένους (valence band) αντιστοιχεί στις ενέργειες των ηλεκτρονίων του εξωτερικού κελύφους του ατόμου και καταλαμβάνεται πλήρως από ηλεκτρόνια. Η ζώνη αγωγιμότητας (conduction band) είναι η ενεργειακή περιοχή όπου τα ηλεκτρόνια αποσπώνται από τα μητρικά τους άτομα και είναι ελεύθερα να διασχίζουν τον κρύσταλλο, περνώντας ανάμεσα από τα άτομα. Ανάμεσα στη ζώνη σθένους και τη ζώνη αγωγιμότητας συγκαταλέγεται η απαγορευμένη περιοχή (band gap). Στη συγκεκριμένη περιοχή δεν υπάρχουν προκαθορισμένα ενεργειακά επίπεδα σε σύγκριση με τις δύο άλλες ζώνες σθένους, εκτός εάν υπάρχουν προσμίξεις – ακαθαρσίες στο κρυσταλλικό πλέγμα. Το ενεργειακό εύρος της απαγορευμένης περιοχής ορίζεται από το είδος του στερεού υλικού (Knoll Glenn, 2000). Για το Γερμάνιο το band gap είναι ίσο με 0,67eV ενώ για το Πυρίτιο είναι 1,106 eV(Gilmore, 2008).

Τα τρία είδη στερεών, οι μονωτές (insulator), οι ημιαγωγοί (semiconductor) και οι αγωγοί (conductor) με προφανείς διαφορές στις παραπάνω ζώνες παρουσιάζονται στην επομένη εικόνα (3.8).



Εικόνα 3.8: Το ενεργειακό εύρος των μονωτών, των ημιαγωγών και των αγωγών (Betsou Chrysoula, 2020)

Στους μονωτές η ζώνη σθένους είναι πλήρης ενώ η ζώνη αγωγιμότητας είναι κενή. Το ενεργειακό χάσμα μεταξύ των δύο αυτών ζωνών, η απαγορευμένη περιοχή, είναι αρκετά μεγάλο. Το μέγεθος του χάσματος εμποδίζει την μετακίνηση των ηλεκτρονίων από την ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας αφού δεν μπορούν να ξεπεράσουν το όριο ενέργειας με θερμική διέγερση. Ανεξάρτητα από το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται σε αυτό το είδος του υλικού, δεν μπορεί να επιτευχθεί η μετακίνηση των ηλεκτρονίων.

Στους αγωγούς (μέταλλα) η ζώνη σθένους δεν είναι πλήρης και το ενεργειακό εύρος της απαγορευμένης περιοχής είναι μηδαμινό, οπότε η ζώνη σθένους είναι σε άμεση επαφή με τη ζώνη αγωγιμότητας και μερικές φορές η μία «μπαίνει» μέσα στην άλλη. Με εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου, ανεξάρτητα από το μέγεθος του, παρουσιάζεται κίνηση των ηλεκτρονίων της ζώνης αγωγιμότητας (Ομήρου, 2019).

Στους ημιαγωγούς το ενεργειακό χάσμα μεταξύ των ζωνών σθένους και αγωγιμότητας είναι μικρό (της τάξης του 1eV). Για τους κρυστάλλους Γερμανίου, σε φυσιολογικές θερμοκρασίες θα υπάρχει πάντα ένας μικρός αριθμός ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας και το υλικό θα παρουσιάζει σε περιορισμένο βαθμό αγωγιμότητα. Στις χαμηλές θερμοκρασίες τα περισσότερα ηλεκτρόνια κάθονται στην ζώνη σθένους, σε αυτές τις θερμοκρασίες τα ηλεκτρόνια μεταπηδούν στην ζώνη αγωγιμότητας (και άγουν) αφού αποκτήσουν ενέργεια, για παράδειγμα με αλληλεπίδραση με ιονίζουσας ακτινοβολίας. Επομένως, ψύχοντας το υλικό μειώνεται ο αριθμός των ηλεκτρονίων που βρίσκονται στη ζώνη αγωγιμότητας. Η ενέργεια που προστίθεται λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας είναι ανάλογη της κίνησης των ηλεκτρονίων όπου τα αναγκάζει να



μεταπηδήσουν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας και να μπορούν να κινούνται ελεύθερα στο κρύσταλλο. Βάση αυτής της μεταπήδησης των ηλεκτρονίων δημιουργούνται οπές στη ζώνη σθένους. Υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών ταξιδεύουν προς τα ηλεκτρόδια που εφαρμόζουν την υψηλή τάση. Το φορτίο που επάγεται στα ηλεκτρόδια από την κίνηση των ηλεκτρονίων και των οπών σχηματίζει το σήμα, δηλαδή παλμό, και καταγράφεται στον πολυκάναλο αναλυτή (multi-channel analyzer). (Betsou Chrysoula, 2020)

### Τύποι Ημιαγωγών και Αρχή Λειτουργίας Ημιαγωγών Ανιχνευτών

Τα υλικά κατασκευής των ημιαγωγών ανιχνευτών είναι πολλά, μεταξύ των οποίων ξεχωρίζουν το πυρίτιο (Si) και το γερμάνιο (Ge). Τουλάχιστον θεωρητικά, υπάρχουν οι απολύτως καθαροί ημιαγωγοί, δηλαδή κρύσταλλοι οι οποίοι δεν έχουν καθόλου προσμίξεις, αυτοί ονομάζονται και ενδογενείς ημιαγωγοί (intrinsic semiconductors). Πρακτικά όμως οι κρύσταλλοι ημιαγωγών εμπεριέχουν προσμίξεις ή ακαθαρσίες, έστω και σε πολύ μικρή ποσότητα. Στους ενδογενείς ημιαγωγούς, ο αριθμός των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας είναι ίσος με τον αριθμό οπών στη ζώνη σθένους. Τα ηλεκτρόνια και οι οπές ονομάζονται και φορείς σήματος. Η ισορροπία αυτή μεταβάλλεται με την εισαγωγή, ατόμων από άλλο υλικό που έχουν ένα περισσότερο ή ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο και έτσι δημιουργούνται κρύσταλλοι n-τύπου ή p-τύπου.

Στους ενδογενείς ημιαγωγούς όλα τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας προκύπτουν από θερμική διέγερση, εφόσον δεν έχουν παραχθεί από αλληλεπίδραση με ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Όπως έχει αναφερθεί κάθε ηλεκτρόνιο που μεταπηδάει από την ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας δημιουργεί μια θετική οπή στη ζώνη σθένους. Η πυκνότητα των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας είναι ίση με τη πυκνότητα των θετικών οπών. Το ζεύγος ηλεκτρονίου – οπής στους ημιαγωγούς είναι περίπου ανάλογο του ζεύγους ιόντων στα αέρια. Τα ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών συμβάλουν στην αγωγιμότητα του κρυστάλλου. Στη παρακάτω σχέση εκφράζεται η ανά μονάδα χρόνου πιθανότητα θερμικού σχηματισμού ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής:

$$p(T) = CT^{\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \quad (3.1)$$

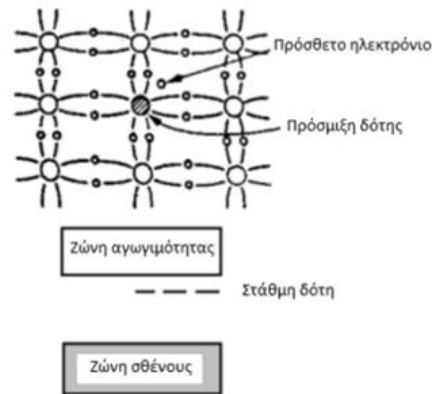
Όπου με T συμβολίζεται η απόλυτη θερμοκρασία του κρυστάλλου, k είναι η σταθερά του Boltzmann και C είναι σταθερά αναλογίας χαρακτηριστικής του υλικού. Στη ηλεκτρική αγωγιμότητα συμβάλουν τόσο τα ηλεκτρόνια όσο και οι οπές.

Πρακτικά είναι αδύνατον να παρασκευαστούν απολύτως καθαροί (ενδογενείς ημιαγωγοί). Σε όλες τις περιπτώσεις ενδογενών ανιχνευτών θα υπάρχουν πολύ μικρές προσμίξεις, που καθορίζουν τις ηλεκτρικές ιδιότητες των ημιαγωγών.

### Ημιαγωγοί τύπου – n

Τα άτομα του γερμανίου (Ge) και του πυριτίου (Si) στην ουδέτερη τους κατάσταση έχουν 4 ηλεκτρόνια σθένους. Στη συνήθη κρυσταλλική δομή, για παράδειγμα ένα άτομο Ge δημιουργεί δεσμούς με τα 4 πλησιέστερα προς αυτό άτομα. Τα άτομα γερμανίου είναι συνδεδεμένα με απλούς ομοιοπολικούς δεσμούς. Υποθέτοντας ότι ο κρύσταλλος του ανιχνευτή Ge περιέχει μικρή συγκέντρωση πρόσμιξης πεντασθενών ατόμων, για παράδειγμα αρσενικό ή φώσφορο (P). Βάση αυτού, στη κρυσταλλική δομή θα καταλαμβάνονται θέσεις τετρασθενών ατόμων Ge από πεντασθενή άτομα P. Επομένως το φωσφόρο θα έχει περίσσεια ηλεκτρονίων που απαιτείται για την ηλεκτρονική ομοιομορφία. Το άτομο που προέρχεται από προσμίξεις θα είναι ένα άτομο δότη που θα παραμένει στη κρυσταλλική δομή. Όπως φαίνεται και στη εικόνα (3.9), τα ηλεκτρόνια του ατόμου δότη έχουν επιτρεπόμενη ενέργεια πολύ κοντά στη στάθμη

αγωγιμότητας και με πολύ μικρό ποσοστό ενέργειας μπορούν να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας.



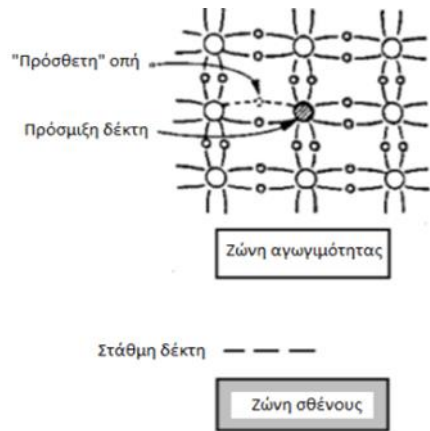
Εικόνα 3.9: Ενεργειακή Στάθμη Δότη (Ομήρου, 2019)

Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί τα ηλεκτρόνια των ατόμων δότες τα οποία προέρχονται από προσμίξεις μπορούν να μεταπηδήσουν ευκολότερα στη ζώνη αγωγιμότητας, αφού η ενεργειακή απόσταση της στάθμης τους από τη ζώνη αγωγιμότητας είναι μικρότερη. Συνεπακόλουθο αυτού, είναι ότι τα ηλεκτρόνια από άτομα δότες όταν εκτεθούν σε θερμική διέγερση θα καταφέρουν με μεγαλύτερη ευκολία να φτάσουν στη ζώνη αγωγιμότητας.

Κάθε ηλεκτρόνιο από άτομο πρόσμιξης που φτάνει στη ζώνη αγωγιμότητας αφήνει πίσω του στη θέση του ατόμου πρόσμιξης θετικό ηλεκτρικό φορτίο. Όπως έχει αναφερθεί το άτομο δότης αποτελεί μέρος της κρυσταλλικής δομής και δεν μπορεί να μετακινηθεί. Επίσης δεν μπορεί να μετακινηθεί με την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, λόγω των 4 δεσμών των ηλεκτρονίων του ατόμου που έχουν αναπτυχθεί με τα γειτονικά του άτομα είναι πλήρεις. Τα θετικά ηλεκτρικά φορτία του ατόμου έχουν ως αποτέλεσμα τη μη προσφορά στην ηλεκτρική αγωγιμότητα και δεν συνιστούν οπές. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα τέτοιων ημιαγωγών καθορίζεται σχεδόν αποκλειστικά από τα ηλεκτρόνια και σε πολύ μικρότερο βαθμό από τις οπές.

### Ημιαγωγοί τύπου – p

Σε συνέχεια όσων έχουν αναλυθεί πιο πριν, είναι φυσικά αδύνατη η δημιουργία κάποιου ανιχνευτή εντελώς απαλλαγμένου από προσμίξεις. Υποθέτοντας ότι διαταράσσεται η ισορροπία σε κρύσταλλο ένα Ge προσθέτοντας μικρή ποσότητα τρισθενούς ατόμου, για παράδειγμα γάλλιου ή βορίου. Τότε το άτομο της κρυσταλλικής δομής θα αντικατασταθεί με το άτομο της πρόσμιξης το οποίο θα έχει ένα ηλεκτρόνιο σθένους λιγότερο σε σύγκριση με τα γειτονικά άτομα. Το κενό που δημιουργείται από την απώλεια του ηλεκτρονίου βρίσκεται σε θέση μέσα στην απαγορευμένη περιοχή πολύ κοντά στη ζώνη σθένους (Εικ 3.10).



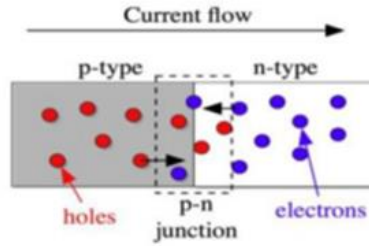
Εικόνα 3.10: Ενεργειακή Στάθμη Δέκτη (Ομήρου, 2019)

Τέτοιες προσμίξεις ονομάζονται προσμίξεις δέκτη. Η οπή που δημιουργείται από το άτομο της πρόσμιξης δέκτη συμπληρώνεται από θερμικά διεγερμένα ηλεκτρόνια. Είναι γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια που καλύπτουν τις οπές των προσμίξεων δέκτη προέρχονται από άλλες θέσεις της κρυσταλλικής δομής με αποτέλεσμα να αφήνουν πίσω τους οπές. Τέτοιοι ημιαγωγοί ονομάζονται ημιαγωγοί τύπου  $-p$  και σε αυτούς η ροή των οπών καθορίζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του κρυστάλλου (Gilmore, 2008; Ομήρου, 2019).

#### Αρχή λειτουργίας Ημιαγωγών Ανιχνευτών

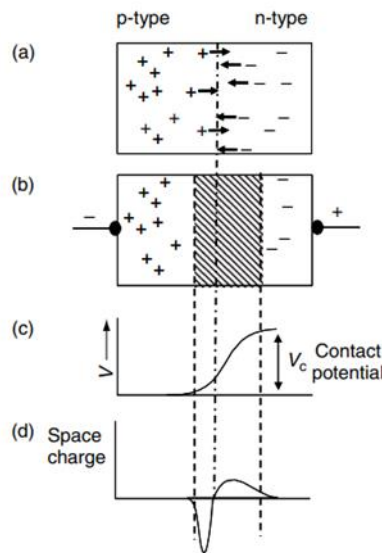
Για να ανιχνευτεί ικανοποιητικά το φορτίο που παράγεται κατά τη διέλευση ενός φωτονίου  $\gamma$  μέσα σε ένα ημιαγωγό ανιχνευτή είναι απαραίτητο να έχει μικρή συγκέντρωση ελευθέρων φορέων και να είναι ελεύθερο από παγίδες. Αυτό πραγματοποιείται εάν έρθουν σε τέλεια επαφή ημιαγωγός τύπου  $-n$  και ημιαγωγός τύπου  $-p$  και η διεπαφή αυτή πολωθεί ανάστροφα (reverse bias).

Η λειτουργία του ανιχνευτή βασίζεται στην ανακατανομή των φορτισμένων σωματιδίων που λαμβάνει χώρα στις 2 περιοχές διαφορετικού τύπου όταν έρθουν σε επαφή. Η αλληλεπίδραση μιας ακτίνας  $\gamma$  με το υλικό του ημιαγωγού θα παράγει πρωτεύοντα ηλεκτρόνια με ενέργειες πολύ μεγαλύτερες από τις θερμικές ενέργειες. Λόγω των διαφορετικών συγκεντρώσεων των ηλεκτρονίων και των οπών στις δύο περιοχές, παρατηρείται διάχυση οπών προς την περιοχή  $n$  καθώς και διάχυση ηλεκτρονίων αγωγιμότητας προς την περιοχή  $p$ . Με την έξοδο των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας από τον κρύσταλλο τύπου  $-n$  παραμένουν δεσμευμένα θετικά φορτία στις θέσεις των ιονισμένων δοτών. Από αυτούς τους θετικά φορτισμένους δότες, στο τμήμα του κρυστάλλου τύπου  $-n$  δημιουργείται στατικό μη μετακινήσιμο θετικό ηλεκτρικό φορτίο. Τα εισερχόμενα ηλεκτρόνια στην περιοχή  $p$  συνδυάζονται με οπές. Παρατηρείται μεγάλη κλίση ( $\frac{dp}{dx}$ ) της πυκνότητας  $p$  των οπών, από το τμήμα τύπου  $-p$  προς το τμήμα τύπου  $-n$  και συνεπακόλουθα εμφανίζεται διάχυση των οπών με αυτή την φορά. Βάση της κίνησης των ηλεκτρονίων, κάθε οπή που φεύγει έξω από τον κρύσταλλο τύπου  $-p$  αφήνει πίσω της μια θέση δέκτη που έχει συλλάβει ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο και κατά συνέπεια αποτελεί ένα μη μετακινήσιμο αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο. Κατά τη διάχυση των ηλεκτρονίων και των οπών αναπτύσσεται θετικό φορτίο στο τμήμα του κρυστάλλου τύπου  $-n$  και αρνητικό φορτίο στο τμήμα του κρυστάλλου τύπου  $-p$  (Μ. Αντωνόπουλος - Ντόμης, 2005).



Εικόνα 3.11: Ζεύξη p-n. Τα ηλεκτρόνια του τμήματος τύπου-n έλκονται στο τμήμα τύπου -p καθώς και οι οπές του τμήματος τύπου -p έλκονται προς το τμήμα τύπου -n (Μπέτσου, 2015)

Το τμήμα στο οποίο, σύμφωνα με την παραπάνω περιγραφή, δεν υπάρχουν φορείς σήματος (οπές και ηλεκτρόνια) ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης (depletion region). Το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται από τα φορτία χώρου της περιοχής απογύμνωσης ωθεί τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας και τις οπές στα τμήματα -n και -p αντίστοιχα. Στη περιοχή απογύμνωσης παρουσιάζονται τα αμετακίνητα φορτία του χώρου, αυτά τα φορτία δεν συμβάλουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του χώρου. Όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα (3.12) αναπτύσσεται δυναμικό  $V(x)$  στη περιοχή απογύμνωσης λόγω της αντίστασης που εμφανίζεται. Το δυναμικό της διεπαφής  $V_c$  στους ανιχνευτές γερμανίου είναι της τάξης των 0,4V. Η περιοχή απογύμνωσης μπορεί να επεκταθεί, αν εφαρμοστεί υψηλή τάση επιπλέον αυτού του δυναμικού, για παράδειγμα στον HPGGe εφαρμόζεται υψηλή τάση της τάξης των 3 έως 5kV και η περιοχή απογύμνωσης μπορεί να επεκταθεί μέχρι  $5.32 \text{ g} * \text{cm}^{-3}$ . Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται κατά πολύ ο ενεργός όγκος του ανιχνευτή μέχρι ένα όριο υψηλής τάσης, μετά το οποίο επέρχεται κατάρρευση της διεπαφής (depletion region) (Gilmore, 2008).



Εικόνα 3.12: α)Πριν την φόρτιση του ανιχνευτή, β)Μετά την φόρτιση του ανιχνευτή, γ) Διαφορά δυναμικού στις δύο πλευρές φόρτισης, δ) Δεσμευμένα ηλεκτρικά φορτία

Ένας άλλος λόγος εφαρμογής της υψηλής τάσης στα άκρα του ανιχνευτή είναι ο εξής. Όταν η  $\gamma$ -ακτινοβολία αλληλοεπιδράσει με το υλικό εντός της περιοχής απογύμνωσης θα παραχθούν ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών τα οποία ωθούνται από το ηλεκτρικό πεδίο έξω από την περιοχή απογύμνωσης. Η κίνηση των ζευγών μπορεί να αποτυπωθεί ως ηλεκτρικό σήμα. Το δυναμικό επαφής της ζεύξης (0,4V για Ge) είναι ανεπαρκές για να προκληθεί γρήγορη κίνηση των φορτίων, οπότε μπορεί εύκολα να αλλοιωθεί το αποτέλεσμα με επανασύνδεση ηλεκτρονίων

και οπών, έχοντας ως αποτέλεσμα το επαγόμενο ηλεκτρικό φορτίο από την αλληλεπίδραση της γ-ακτινοβολίας να μην επαρκεί για την διάκριση του υποβάθρου. Σύμφωνα με τα όσα έχουν αναφερθεί, εφαρμόζεται υψηλή τάση αντίστροφης πόλωσης. Η θετική τάση συνδέεται στο αρνητικό άκρο τύπου -n ενώ η αρνητική τάση συνδέεται στο θετικό άκρο τύπου -p. Η διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται στα δύο άκρα είναι από μερικές εκατοντάδες έως μερικές χιλιάδες Volts.

Το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης μπορεί να υπολογιστεί βάση του τύπου

$$d \approx [2\kappa\mu\rho (V_0 + V_b)]^{1/2} \quad (3.2)$$

Όπου με  $V_0$  και  $V_b$  συμβολίζονται οι τάσεις επαφής στα δύο άκρα, με  $\kappa$  συμβολίζεται η διηλεκτρική σταθερά,  $\rho$  ( $\Omega\text{m}$ ) είναι η ειδική αντίσταση του υλικού και  $\mu$  ( $\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) είναι η ευκινησία των φορτισμένων σωματιδίων στο υλικό. Συνεχίζοντας χρησιμοποιούμε τον τύπο ανάλυσης της διηλεκτρικής σταθεράς (Gilmore, 2008).

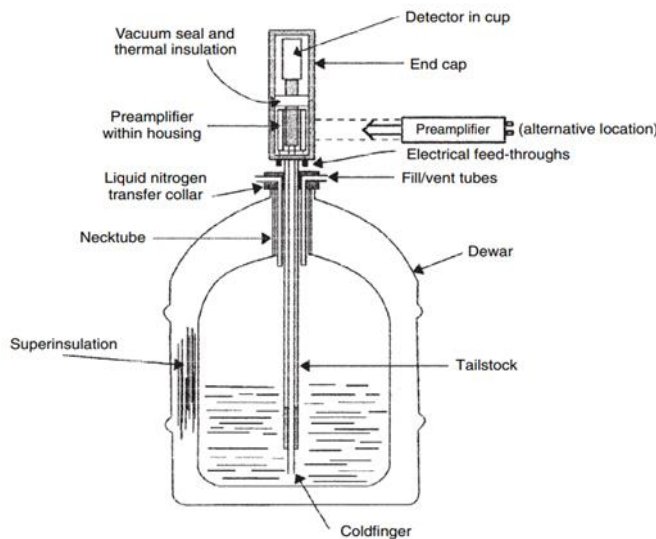
$$\rho = 1/(eN\mu) \quad (3.3)$$

Όπου με  $\rho$  συμβολίζεται η ειδική αντίσταση του υλικού,  $e$  συμβολίζεται το φορτίο του ηλεκτρονίου, με  $N$  συμβολίζεται η συγκέντρωση των προσμίξεων στον κρύσταλλο και με  $\mu$  η ευκινησία των φορτισμένων σωματιδίων μέσα στο υλικό (Gilmore, 2008).

Συμφώνα με τους πιο πάνω τύπους καταλήγουμε στον τύπο

$$d \approx \left(\frac{V}{N}\right)^{1/2} \quad (3.4)$$

Πολλοί ανιχνευτές λειτουργούν με αρκετά μεγάλες τάσεις αντίστροφης πόλωσης, ώστε η περιοχή απογύμνωσης να εκτείνεται σε μεγάλο μέρος του όγκου του κρυστάλλου. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο ανιχνευτής ονομάζεται πλήρως απογυμνωμένος. Στις περιπτώσεις που η τάση υπερβεί μια τιμή, δημιουργείται κατάρρευση της διόδου και διέλευση μεγάλων ρευμάτων που επιφέρουν καταστροφικά αποτελέσματα για τον ανιχνευτή (Αντωνόπουλος, 2005).



Εικόνα 3.13: Χαρακτηριστικά του ανιχνευτή HPGe (Gilmore, 2008)

### γ-Φασματοσκοπία

Η γ-φασματοσκοπία είναι μια μέθοδος ραδιοϊσοτοπικής ανάλυσης δειγμάτων. Βασίζεται στην ανίχνευση και την καταγραφή της γ-ακτινοβολίας, από την ενέργεια της οποίας ταυτοποιείται το αντίστοιχο ισότοπο άμεσα ή έμμεσα (από το θυγατρικό του) που την εξέπεμψε. Πιο συγκεκριμένα, αντικατοπτρίζει την μοναδική ενέργεια φωτονίων γ που εκπέμπει κάθε ραδιονουκλίδιο και μέσω αυτής γίνεται η ταυτοποίηση αυτού.

Οι ακτίνες γ αλληλεπιδρούν με την ύλη με τρεις βασικούς μηχανισμούς, όπως αναφέρθηκε στην θεωρία. Μέσω των φαινομένων αλληλεπίδρασης που λαμβάνουν χώρα (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, σκέδαση Compton και δίδυμη γένεση) η γ-ακτινοβολία ionίζει τα άτομα του υλικού του ανιχνευτή. Βάση των ανιχνευτικών διατάξεων, η ενέργεια των ηλεκτρονίων μετατρέπεται σε παλμό. Ο παλμός δημιουργείται από μια αλληλεπίδραση και καταγράφεται στο φάσμα ως γεγονός (count), συγκεκριμένου ύψους και επομένως συγκεκριμένης ενέργειας (Ομήρου, 2019).

### Πειραματική διάταξη ανιχνευτή HPGe

Η συλλογή του φορτίου του παλμού στην έξοδο του ανιχνευτή γίνεται από ένα φίλτρο αντίστασης και πυκνωτή με γρήγορη χρονική απόκριση. Το φορτίο οδηγείται σε κατάλληλο προενισχυτή (charge sensitive preamplifier), ο οποίος παράγει ηλεκτρικό παλμό ανάλογα με την ενέργεια της ακτινοβολίας που απορρόφησε ο κρύσταλλος. Στη συνέχεια το σήμα οδηγείται σε γραμμικό ενισχυτή φασματοσκοπίας, όπου ο παλμός διαμορφώνεται κατάλληλα ώστε να μπορεί να καταμετρηθεί από τον πολυκάναλο αναλυτή MCA (multi-channel analyzer), ο οποίος είναι ενσωματωμένος σε ειδική κάρτα στον υπολογιστή

### Κορυφές και μορφή φάσματος

Όπως έχει αναφερθεί το φάσμα σχηματίζεται από τη καταγραφή του πλήθους των φωτονίων που καταγράφονται από τον ανιχνευτή συναρτήσει της ενέργειας τους. Ανάλογα με τον τρόπο που αλληλεπιδρά η γ-ακτινοβολία με το υλικό του ανιχνευτή καταγράφεται διαφορετική μορφή φάσματος.

#### 1) Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Στις χαμηλές ενέργειες κυριαρχεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, όπου το διερχόμενο από το υλικό φωτόνιο αποθέτει τη πλήρη ενέργεια του στο υλικό του ανιχνευτή. Σε ένα «ιδανικό» ανιχνευτή το φάσμα θα ήταν μια κάθετη γραμμή στο σημείο που θα αντιστοιχούσε στην ενέργεια των φωτονίων της πηγής. Σε πραγματικά δεδομένα η φωτοκορυφή έχει ενεργειακό εύρος λόγω της πεπερασμένης διακριτικής ικανότητας του ανιχνευτή.

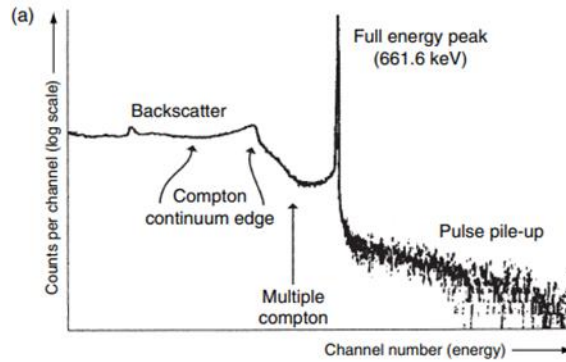
#### 2) Φαινόμενο Compton

Στις μεσαίες ενέργειες επικρατεί το φαινόμενο Compton. Κατά την σκέδαση η ενέργεια διανέμεται στο ηλεκτρόνιο και στο φωτόνιο. Το ποσοστό ενέργειας που θα ληφθεί από το ηλεκτρόνιο και το φωτόνιο εξαρτάται από την γωνία σκέδασης. Επομένως το ποσοστό της ενέργειας του προσπίπτοντος φωτονίου γ μεταφέρεται στον ανιχνευτή μέσω των ανακρουόμενων ηλεκτρονίων. Παράλληλα οι ενέργειες των σκεδαζόμενων δευτερογενών φωτονίων που έχουν απορριφθεί μέσα στον ανιχνευτή, χωρίς να υποστούν άλλη σκέδαση θα καταγραφούν στο φάσμα με την μορφή του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Η ενέργεια που αποδίδεται στον ανιχνευτή από τα ηλεκτρόνια της σκέδασης Compton έχει συνεχή κατανομή, με τιμές από το μηδέν έως ένα

μέγιστο που προκύπτει από την ακόλουθη εξίσωση, όταν το φωτόνιο σκεδάζεται κατά 180 μοιρών.

$$E_{e,max} = \frac{E_0}{1 + \frac{511}{2E_0}} \quad (3.5)$$

Ιδανικά στο φάσμα παρουσιάζεται μια κατανομή ενεργειών από την μηδενική ενέργεια μέχρι και την μέγιστη που αντιστοιχεί στην ενέργεια της παραπάνω σχέσης. Η μέγιστη ενέργεια που καταγράφεται στο φάσμα έχει την μορφή αιχμής όπως φαίνεται στην εικόνα 3.14. Τέλος το σκεδαζόμενο φωτόνιο είναι πιθανό στη συνέχεια να υποστεί πολλαπλές σκεδάσεις Compton.

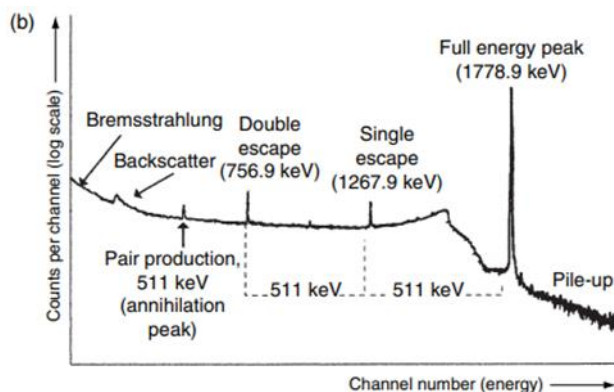


Εικόνα 3.14: Παράδειγμα φάσματος με κορυφή 661.6keV (Cs-137), όπου παρουσιάζεται η σκέδαση Compton (Gilmore, 2008)

Η κορυφή Backscatter αντιστοιχεί στην αλληλεπίδραση του φωτονίου με τα υλικά που περιβάλλουν τον ανιχνευτή και η γωνία σκέδασης του είναι μεγαλύτερη των 110° μοιρών (Knoll Glenn, 2000).

### 3) Δίδυμη γένεση

Στις υψηλές ενέργειες εάν η ενέργεια του φωτονίου  $\gamma$  που προσπίπτει στον ανιχνευτή ξεπερνά το ενεργειακό κατώφλι των 1022keV, τότε το φάσμα αλλάζει μορφή. Το ποζιτρόνιο που παράγεται κατά τη δίδυμη γένεση όταν χάσει μεγάλο ποσοστό της ενέργειας τους εξαυλώνεται με ταυτόχρονη παραγωγή δύο φωτονίων ίσης ενέργειας 511keV. Αν τα δύο φωτόνια αυτά απορροφηθούν από τον ανιχνευτή τότε οι ενέργειες τους θα καταγραφούν ως κορυφή. Στη περίπτωση όπου ένα από τα δύο φωτόνια της εξαύλωσης που ακολούθησε την δίδυμη γένεση απορροφηθεί από τον ανιχνευτή και το άλλο διαφύγει σχηματίζεται στο φάσμα με μία κορυφή ενέργειας ίσης με  $E_0 - 511keV$ , τότε ονομάζεται απλή διαφεύγουσα. Τέλος, στη περίπτωση όπου και τα δύο φωτόνια διαφύγουν διαγράφεται στο φάσμα κορυφή ενέργειας  $E_0 - 1022keV$ , και καλείται διπλή διαφεύγουσα.



Εικόνα 3.15: Παράδειγμα φάσματος με κορυφή 1778,9keV (Al-28), όπου παρουσιάζονται οι κορυφές της δίδυμης γένεσης

### Υπολογισμός συγκέντρωσης Rn-222 στα δείγματα νερού

Η μέθοδος προσδιορισμού της συγκέντρωσης Rn-222 μέσω του HPGe, βασίζεται στις μεταπτώσεις του Pb-214 και Bi-214, τα οποία είναι θυγατρικά του Rn-222 και εκπέμπουν γ ακτινοβολία. Οι συγκεντρώσεις ραδονίου προέρχονται από τις συγκεντρώσεις των θυγατρικών του στοιχείων και γι' αυτό το λόγο η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται ως έμμεση. Για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης Rn-222 υπολογίστηκαν οι συγκεντρώσεις των θυγατρικών του (Pb-214 και Bi-214), τα οποία βρίσκονται σε ραδιενεργό ισορροπία. Η ραδιενεργός ισορροπία του Rn-222 και των θυγατρικών του αποκαθίσταται μετά από 3 ώρες από την συλλογή του δείγματος, αφού ο χρόνος ημιζωής του Rn-222 είναι μεγαλύτερος από των θυγατρικών του. Συγκεκριμένα τα θυγατρικά που προκύπτουν από την διάσπαση του Rn-222 εκπέμπουν γ-ακτινοβολία σε συγκεκριμένες φωτοκορυφές με αντίστοιχη πιθανότητα εκπομπής ενός φωτονίου ανά διάσπαση (FY) (Jobbágy et al., 2017).

Το ραδιοϊσότοπο Pb-214 εκπέμπει ενέργεια στη φωτοκορυφή 242 keV με πιθανότητα 7,43% , στη φωτοκορυφή 295 keV με πιθανότητα 18,41% και στην φωτοκορυφή 352 keV με πιθανότητα 35,6%. Αντίστοιχα η σημαντικότερη φωτοκορυφή του ραδιοϊσοτόπου Bi-214 εμφανίζεται στα 609 keV με πιθανότητα 45,49%, ενώ υπάρχουν και φωτοκορυφές στα 1,12 MeV με πιθανότητα 15,1% και στα 1,764MeV με πιθανότητα 15,4%. Υπάρχουν αρκετές ακόμη φωτοκορυφές των δύο ραδιοϊσοτόπων αλλά οι πιθανότητα εκπομπής ενός φωτόνιο ανά διάσπαση σε αυτές τις ενέργειες είναι μικρότερες του 5%.



Parent radionuclide	Daughter radionuclide	Energy (keV)	Emission probability (%)
U	<sup>226</sup> Ra	186.21 (13)	3.56 (19)
	<sup>214</sup> Pb	295.22 (2)	18.41 (36)
		351.93 (2)	35.60 (7)
Th	<sup>214</sup> Bi	609.31 (7)	45.49 (19)
	<sup>228</sup> Ac	338.32 (6)	11.72 (41)
		911.21 (6)	26.5 (8)
		968.97 (5)	16.1 (5)
	<sup>212</sup> Pb	238.63 (2)	43.6 (5)
		300.09 (12)	3.18 (14)
	<sup>212</sup> Bi	727.33 (9)	6.65 (4)
<sup>208</sup> Tl	510.74 (2)	22.5 (2)	
	583.19 (2)	85.0 (3)	

Εικόνα 3.16: Σημαντικότερες φωτοκορυφές των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του U και Th

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση μόνο μιας φωτοκορυφής ανά ραδιονουκλίδιο, αυτής με την μεγαλύτερη πιθανότητα εκπομπής ενός φωτονίου ανά διάσπαση. Πιο συγκεκριμένα για το ισότοπο Bi-214 χρησιμοποιήθηκε η φωτοκορυφή των 609 keV, ενώ για το ισότοπο Pb-214 χρησιμοποιήθηκε η φωτοκορυφή των 352 keV.

Αρχικά για όλες τις μετρήσεις ραδονίου στο νερό χρησιμοποιείται σκεύος συγκεκριμένης γεωμετρίας, όγκου 260ml. Πάνω στην γεωμετρία του σκεύους έχουν γίνει σειρές πειραμάτων από το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Α.Π.Θ. Πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση της γεωμετρίας σκεύους - ανιχνευτή και εξήχθησαν οι αποδόσεις με σκοπό τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων των ραδιονουκλιδίων στα δείγματα που τοποθετούνται στο σκεύος. Πιο συγκεκριμένα, σε προηγούμενα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν πηγές γνωστής ενεργότητας και μέσω των κατάλληλων μετρήσεων προσδιορίστηκαν οι αποδόσεις της γεωμετρίας πρότυπης πηγής (σκεύους) – ανιχνευτή για διάφορες φωτοκορυφές. Διαιρώντας των ρυθμό κρούσεων που μετρήθηκαν σε κάθε φωτοκορυφή προς τα φωτόνια ανά δευτερόλεπτο που εκπέμπονταν από την πρότυπη πηγή, υπολογίστηκαν οι αποδόσεις της γεωμετρίας σκεύους -ανιχνευτή (efficiency) σε κάθε φωτοκορυφή. Με αποτέλεσμα να γίνεται γνωστό το efficiency της γεωμετρίας για κάθε φωτοκορυφή. Ακόμη εισάγεται ο όρος του σφάλματος κατά την εκπομπή φωτονίου ανά διάσπαση ( $\pm$  efficiency). Μια καλή προσέγγιση για την τιμή του σφάλματος προκύπτει από το ποσοστό του 5% του αρχικού efficiency.

Όπως έχει αναφερθεί και πριν όλα τα δείγματα νερού τοποθετούνται στον ανιχνευτή για χρονική διάρκεια 2000sec. Από το αποτέλεσμα της φασματοσκοπίας εξάγονται τα counts των δυο φωτοκορυφών, 352keV και 609keV, αντίστοιχα για Pb-214 και Bi-214. Ακολούθως υπολογίζονται τα counts ανά τον χρόνο (C/S) που ανιχνεύονται από τον HPGe. Επίσης μαζί με το αποτέλεσμα που εξάγεται από το λογισμικό του HPGe, εξάγουμε και το σφάλμα για την μέτρηση των παλμών ανά φωτοκορυφή. Το σφάλμα είναι η ρίζα των συνολικών counts και μετριέται προσθετικά ή αφαιρετικά πάνω στο αποτέλεσμα των counts ( $\pm \frac{C}{S}$ ). Ακολούθως υπολογίζεται το σφάλμα ανά τον χρόνο για τις δύο φωτοκορυφές που μελετάμε.

$$\frac{C}{S} = \frac{Count}{T} \quad (3.6)$$

Όπου ο όρος count αντιστοιχεί στους παλμούς της κάθε φωτοκορυφής που λαμβάνουμε από το αποτέλεσμα της φασματοσκοπίας, ενώ με τον όρο T αντιστοιχεί στον χρόνο μέτρησης.

Έχουμε μετρήσει για μεγάλο χρονικό διάστημα τις συγκεντρώσεις ενεργότητας του άδειου δοχείου του ανιχνευτή (Background) πριν την εκκίνηση της πειραματικής μέτρησης. Θεωρούμε δεδομένη την ύπαρξη του Background παρόλο που ο ανιχνευτής HPGe θεωράκιζεται στην εξωτερική περίμετρο με μόλυβδο, λόγω του ότι μπορεί να επηρεαστεί από εξωγενείς παράγοντες όπως τα οικοδομικά υλικά του κτιρίου ή κοσμική ακτινοβολία. Για τον λόγο αυτό η μέτρηση του Background πρέπει να αφαιρείται από το αποτέλεσμα της μέτρησης δείγματος. Διαιρώντας τις κρούσεις του Background που μετρήθηκαν με το συνολικό διάστημα μέτρησης προκύπτουν οι κρούσεις του Background ανά δευτερόλεπτο ( $\frac{BKG}{S}$ ). Παράλληλα εξάγουμε το σφάλμα ( $\pm \frac{BKG}{S}$ ), ακριβώς όπως και στην περίπτωση των counts ανά τον χρόνο. Το ποσοστό του σφάλματος είναι ελάχιστο, οπότε μας δίνεται η δυνατότητα να το θεωρήσουμε μηδέν.

$$\frac{BKG}{S} = \frac{Background}{T} \quad (3.7)$$

Ο όρος Background συμβολίζει τις κρούσεις της κάθε φωτοκορυφής στο άδειο δοχείο μέτρησης του ανιχνευτή. Με T σε sec συμβολίζεται ο χρόνος που διεξήχθη η μέτρηση του Background.

Ακολουθως έχοντας ως δεδομένες τις κρούσεις της κάθε φωτοκορυφής αλλά και δεδομένες παρεμβολές που προέρχονται από τα δομικά υλικά του χώρου, υπολογίζεται η διαφορά των δυο πιο πάνω σχέσεων. Βάση αυτού προκύπτει ο ρυθμός των κρούσεων που προέρχεται αποκλειστικά από το δείγμα για κάθε φωτοκορυφή ( $\frac{NET}{S}$ ), όπως φαίνεται και από την εξίσωση 3.8.

$$\frac{NET}{S} = \frac{C}{S} - \frac{BKG}{S} \quad (3.8)$$

Ακόμη εισάγεται ο όρος του σφάλματος – απόκλισης της τιμής των «καθαρών» κτύπων ( $\pm \frac{NET}{S}$ ) σε κάθε φωτοκορυφή. Το αποτέλεσμα του όρου αυτού εξάγεται μέσα από την εξίσωση 3.9.

$$\pm \frac{NET}{S} = \sqrt{\left(\pm \frac{C}{S}\right)^2 + \left(\pm \frac{BKG}{S}\right)^2} \quad (3.9)$$

Στην συνέχεια μετά τους πιο πάνω υπολογισμούς, έχοντας γνωστό το efficiency της γεωμετρίας του σκεύους-ανιχνευτή για την κάθε φωτοκορυφή και παράλληλα γνωρίζοντας την πιθανότητα εκπομπής ενός φωτονίου ανά διάσπαση για την κάθε φωτοκορυφή του Pb-214 και του Bi-214, υπολογίζουμε την συγκέντρωση ενεργότητας για το κάθε ραδιονουκλίδιο. Πιο συγκεκριμένα υπολογίζεται η συγκέντρωση ενεργότητας για του κάθε ραδιονουκλιδίου ανά την μονάδα μάζας με μονάδες μέτρησης τα  $\frac{Bq}{kg}$  του δείγματος, όπως φαίνεται και στον τύπο 3.10.

$$Ενεργότητα \ δείγματος \left(\frac{Bq}{kg}\right) = \frac{NET/S}{efficiency * FY * m} \quad (3.10)$$

Ο όρος  $NET/S$ , συμβολίζει τον ρυθμό των κρούσεων που προέρχονται αποκλειστικά από το δείγμα για κάθε φωτοκορυφή ανά τον χρόνο μέτρησης του δείγματος. Στον παρονομαστή παρουσιάζεται το γινόμενο μεταξύ του efficiency, της πιθανότητας FY και της μάζας m.

Επίσης υπολογίζεται το σφάλμα της συγκέντρωσης ενεργότητας ( $\pm A$ ) για το κάθε ραδιονουκλίδιο. Το αποτέλεσμα του σφάλματος προκύπτει μέσα από την εξίσωση 3.11

$$\pm A = \sqrt{\frac{\left(\frac{\pm NET}{S} * \frac{1}{efficiency}\right)^2 + \left[\frac{NET}{S} * \frac{1}{efficiency^2} * (\pm efficiency)\right]^2}{FY * m}} \quad (3.11)$$

Μετά τον αριθμητικό υπολογισμό του σφάλματος της συγκέντρωσης ενεργότητας υπολογίζεται το ποσοστό αυτού συγκριτικά με το αποτέλεσμα της ενεργότητας για κάθε ραδιονουκλίδιο.

Στο επόμενο βήμα υπολογίζουμε τον μέσο όρο των συγκεντρώσεων ανά μάζα (AV) για τα δύο ραδιονουκλίδια που λήφθηκαν υπόψιν. Βάση αυτού υπολογίζεται η συγκέντρωση ενεργότητας του Rn-222 την χρονική στιγμή της μέτρησης.

Επίσης υπολογίζουμε το σφάλμα της συγκέντρωσης ενεργότητας του Rn-222 ( $\pm A_{Rn-222}$ ) το οποίο προκύπτει μέσα από τον τύπο 3.12

$$\pm A_{Rn-222} = \frac{1}{2} * \sqrt{\pm A_{Pb-214}^2 + \pm A_{Bi-214}^2} \quad (3.12)$$

Όπως γνωρίζουμε, για την τιμή της συγκέντρωσης ενεργότητας του δείγματος κατά την χρονική στιγμή της δειγματοληψίας πρέπει να γίνει αναγωγή στον χρόνο. Αρχικά υπολογίζεται η διαφορά χρόνου (TD) ανάμεσα στην χρονική στιγμή της δειγματοληψίας (TC) και την χρονική στιγμή εκκίνησης της πειραματικής διαδικασίας (TP), με μονάδα μέτρησης τις ώρες.

$$TD = TC - TP \text{ (Hours)} \quad (3.13)$$

Τέλος με όλα τα στοιχεία που έχουμε συλλέξει μπορούμε να υπολογίσουμε την ανοιγμένη τιμή της συγκέντρωσης Rn-222 στο δείγμα μας. Η αναγωγή στο χρόνο γίνεται μέσω του τύπου 3.14

$$\text{Ανοιγμένη Ενεργότητα Rn - 222} = AV * e^{\frac{\ln 2 * TD}{\text{Day} * T_{1/2}}} \quad (3.14)$$

Η ανοιγμένη τιμή της συγκέντρωσης ενεργότητας του ραδονίου υπολογίζεται κάνοντας χρήση της μέσης τιμής AV των συγκεντρώσεων ενεργοτήτων των δύο θυγατρικών του στοιχείων και του ενδιάμεσου χρόνου TD από την στιγμή συλλογής μέχρι την στιγμή εκκίνησης του πειράματος. Επίσης με τον όρο Day συμβολίζονται οι 24 ώρες τις μέρας και με τον όρο  $T_{1/2}$  απεικονίζεται ο χρόνος ημιζωής του Rn-222, ο οποίος είναι σταθερός και ισούται με 3,82.

Ολοκληρώνοντας, κάνουμε αναγωγή στο συνολικό σφάλμα που υπολογίστηκε πριν στην χρονική στιγμή δειγματοληψίας. Η αναγωγή γίνεται εφικτή μέσα από τον τύπο 3.15

$$\text{Ανοιγμένο Σφάλμα Ενεργότητας Rn-222} = \pm E_{Rn-222} * e^{\frac{\ln 2 * TD}{\text{Day} * T_{1/2}}} \quad (3.15)$$

#### Υπολογισμός συγκέντρωσης φυσικών και τεχνητών ραδιονουκλιδίων στα δείγματα χώματος

Για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων των φυσικών και τεχνητών ραδιονουκλιδίων στα δείγματα χώματος ακολουθείται παρόμοια διαδικασία με αυτήν για την συγκέντρωση ραδονίου στα δείγματα νερού. Όπως και πριν, για κάθε μέτρηση καταγράφονται η μάζα του κάθε δείγματος ως προς μέτρηση και ο χρόνος στο οποίο το δείγμα παρέμεινε εντός το ανιχνευτή. Σε

αυτή την πειραματική διαδικασία ο χρόνος μέτρησης κάθε δείγματος διέφερε καθώς θεωρήθηκε προτιμότερο το κάθε δείγμα να παραμένει εντός του ανιχνευτή για περισσότερο από 24 ώρες.

Τα δείγματα χώματος τοποθετούνται στον ανιχνευτή HPGe σε σκεύος όγκου  $60\text{ cm}^3$ . Το σκεύος αυτό έχει διαφορετική γεωμετρία από το σκεύος που χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό της συγκέντρωσης ραδονίου στο νερό. Όπως και προηγούμενος, το συγκεκριμένο σκεύος έχει βαθμονομηθεί από το Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Α.Π.Θ. Η βαθμονόμηση του pbq-1 προέκυψε μετά από μετρήσεις πρότυπων ραδιενεργών πηγών των οποίων οι συγκεντρώσεις ήταν γνωστές.

Σε αυτή την πειραματική διαδικασία έγινε προσδιορισμός των συγκεντρώσεων ενεργότητας στα φυσικά ραδιοϊσότοπα του Ραδίου-226 (Ra-226), Θωρίου-232 (Th-232) και Κάλιου-40 (K-40). Παράλληλα γίνεται προσδιορισμός του τεχνητού ραδιονουκλιδίου του Καισίου-137 (Cs-137).

Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης Ra-226 προκύπτει από τις συγκεντρώσεις των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων Pb-214 και Bi-214 αλλά και από τις συγκεντρώσεις του ίδιου του Ra-226. Πιο συγκεκριμένα, κατά την διάσπαση του Rn-222 προκύπτουν τα θυγατρικά στοιχεία Pb-214 και Bi-214, τα οποία κατά την διαδικασία της διάσπασης εκπέμπουν γ-ακτινοβολία στις κορυφές 352 keV και 609 keV αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης της μέτρησης το Ra-226 δεν βρίσκεται σε ραδιενεργό ισορροπία με τα θυγατρικά του (Pb-214 και Bi-214), λόγω της διαφυγής του Rn-222 ως αέριο. Μέσω μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν από το εργαστήριο προέκυψε ο συντελεστής 1,3 με τον οποίο πολλαπλασιάζονται οι ενεργότητες των Pb-214 και Bi-214, ώστε να προκύψει η ενεργότητα του Ra-226. Παράλληλα κατά την διάσπαση του Ra-226 προκύπτει γ-ακτινοβολία ενέργειας 186keV με FY ίσο με 0,0355, θεωρώντας ότι όλοι οι κτύποι οφείλονται στο Ra-226. Στην πραγματικότητα όμως οι συνολικοί κτύποι στην ενέργεια των 186 keV προέρχονται από το Ra-226 αλλά και από το U-235. Σύμφωνα με τον Gilmore το 57,1% των κτύπων στην ενέργεια 186keV αντιστοιχεί στο Ra-226. Επομένως, η ενεργότητα της φωτοκορυφής των 186keV πολλαπλασιάζεται με 0,571 ώστε να μας δώσει την πραγματική ενεργότητα του Ra-226 (Gilmore, 2008).

Η συγκέντρωση ενεργότητας του Th-232 υπολογίζεται βάση της συγκέντρωσης ενεργότητας του Ακτίνιου-228 (Ac-228) και τα δύο ραδιονουκλίδια βρίσκονται σε ραδιενεργό ισορροπία. Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του Ac-228 χρησιμοποιείται η φωτοκορυφή των 911 keV. Θεωρώντας ότι το Ac-228 βρίσκεται σε ραδιενεργό ισορροπία με το Th-232 καταλήγουμε στην ισότητα μεταξύ των δύο συγκεντρώσεων, δηλαδή η μετρούμενη συγκέντρωση του Ac-228 είναι και η συγκέντρωση του Th-232.

Τα ραδιοϊσότοπα του K-40 και του Cs-137 υπολογίζονται κατευθείαν από την συγκέντρωση ενεργότητας που προκύπτει από το αποτέλεσμα του ανιχνευτή. Οι φωτοκορυφές που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων του K-40 και Cs-137 είναι οι 1461 keV και 661,6 keV αντίστοιχα.

Η διαδικασία υπολογισμού των συγκεντρώσεων ενεργότητας των ραδιοϊσοτόπων που έχουν αναφερθεί είναι παρόμοια με την διαδικασία υπολογισμού της συγκέντρωσης του Rn-222 στα δείγματα νερού. Αντίστοιχα για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων των φυσικών και τεχνητών ραδιονουκλιδίων στο χώμα γίνεται χρήση των τύπων 3.6 – 3.12, οι οποίοι έχουν αναλυθεί στην πιο πάνω ενότητα. Όπως αναφέρθηκε, είχαμε διαφορετικό σκεύος συγκριτικά με

την ανάλυση της προηγούμενης ενότητας, με αποτέλεσμα οι τιμές του efficiency να διαφέρουν για κάθε φωτοκορυφή που μελετάμε.

#### Υπολογισμός συγκέντρωσης Cs-137 στα δείγματα βρύων

Όπως και στα δείγματα νερού και χώματος, έτσι και στα δείγματα των βρύων ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης ενεργότητας του Cs-137. Αναλυτικότερα, για την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας μετριέται η μάζα του δείγματος και καταγράφεται ο χρόνος μέτρησης εντός του HPGe. Όπως και στα δείγματα χώματος, τα δείγματα των βρύων παρέμεναν εντός του ανιχνευτή για περισσότερο από μια μέρα.

Τα δείγματα των βρύων τοποθετούνται σε σκεύος το οποίο είναι αντίστοιχης γεωμετρίας με αυτό που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της συγκέντρωσης του Rn-222 στο νερό. Το σκεύος έχει όγκο 260 ml και έχει γίνει αντίστοιχη βαθμονόμηση απόδοσης της γεωμετρίας σκεύους – ανιχνευτή με την χρήση πρότυπης πηγής Cs-137.

Το τεχνητό ραδιονουκίδιο που μελετάμε από τα βρύα είναι το Cs-137 και εκπέμπει ενέργεια γ-ακτινοβολίας στην φωτοκορυφή των 661,6 keV. Ο υπολογισμός της συγκέντρωσης του ραδιοϊσοτόπου γίνεται μέσω αντίστοιχης διαδικασίας όπως ακολουθείται στην περίπτωση του Rn-222 στα δείγματα νερού και γίνεται χρήση των τύπων 3.6 – 3.12

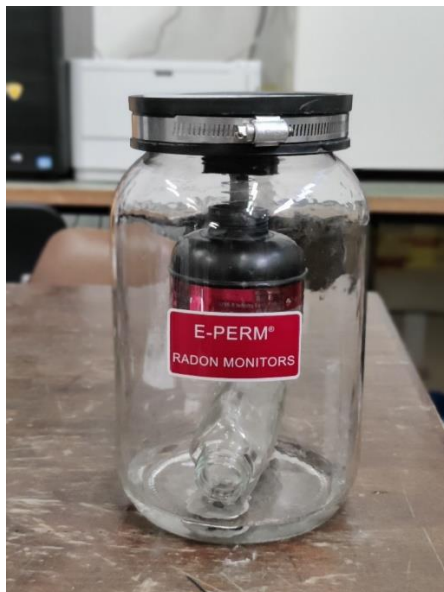
### **3.6) Θάλαμος ιονισμού Electret Ion Chamber (EIC)**

Το σύστημα EIC χρησιμοποιείται κυρίως για τη μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου στη ατμόσφαιρά. Στη παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση του θαλάμου ιονισμού για να μελετηθούν οι συγκεντρώσεις ραδονίου στο νερό. Το σύστημα EIC αποτελείται από 4 μέρη: 1) τα ηλεκτροστατικά φορτισμένα δισκία από Teflon (electret), 2) ένα θάλαμο ιονισμού φτιαγμένο από αγώγιμο πλαστικό στον οποίο τοποθετείται το electret, 3) ένα γυάλινο δοχείο ερμητικά κλειστό, το οποίο είναι σφραγισμένο ώστε όταν τοποθετείται το δείγμα νερού να μην απελευθερώνεται ραδόνιο, 4) ένα όργανο μέτρησης του επιφανειακού ηλεκτρικού δυναμικού των electret (electret voltage reader).

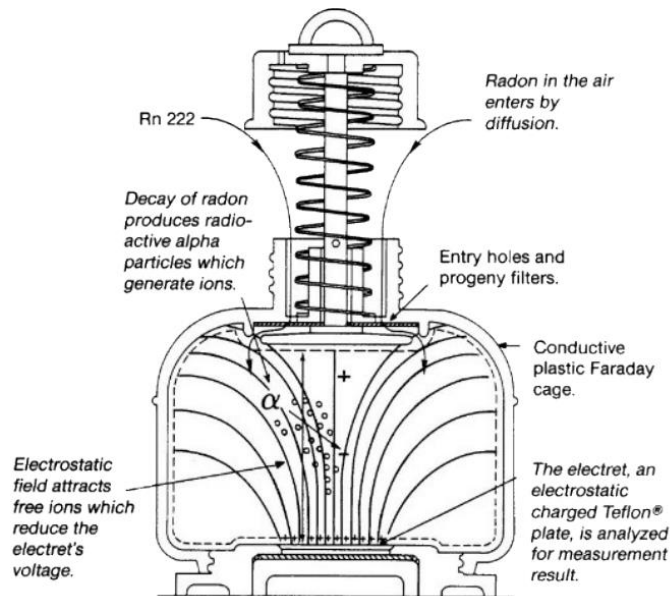
#### **Electret**

Τα Electret είναι δισκία από Teflon (PTFE ή FEP), τα οποία είναι ηλεκτρικά φορτισμένα έτσι ώστε να διατηρούν σταθερή την ηλεκτρική τους φόρτιση ακόμα και σε χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες με υψηλή υγρασία. Αρχικά στο δισκίο υπάρχουν τυχαία προσανατολισμένα δίπολα, κατά την ταυτόχρονη εφαρμογή υψηλής θερμοκρασίας (150-200 °C) και ηλεκτρικού πεδίου (περίπου  $10 \text{ kV/cm}$ ). Έπειτα ακολουθείται αργή ψύξη του δισκίου για να παραμείνουν τα δίπολα στις θέσεις τους.

Τα τοιχώματα στο εξωτερικό περίβλημα του θαλάμου ιονισμού είναι κατασκευασμένα από ηλεκτρικά αγώγιμο πλαστικό, το οποίο έχει μηδενικό φορτίο. Τα electret είναι θετικά φορτισμένα. Τα electret διατηρούν ένα ηλεκτροστατικό πεδίο εντός του θαλάμου ιονισμού, λόγω των προσανατολισμένων διπόλων, ικανό να έλκει τα ιόντα με αντίθετο ηλεκτρικό πρόσημο που παράγονται κατά τη διάσπαση του ραδονίου και των θυγατρικών του στοιχείων μέσα στον θάλαμο ιονισμού. Το επιφανειακό φορτίο των δισκίων εξουδετερώνεται από τη συλλογή ιόντων από την α-διάσπαση του ραδονίου και η επιφανειακή τάση των δισκίων μειώνεται ανάλογα με τη συγκέντρωση ραδονίου και τον χρόνο έκθεσης σε αυτή. Η μείωση του ηλεκτρικού δυναμικού που χαρακτηρίζει τα electret είναι ανάλογη με την συγκέντρωση ραδονίου και του χρόνου έκθεσης του δισκίου σε αυτό (Elec Inc, 1998).



Εικόνα 3.17: Ανιχνευτής EIC για την μέτρηση συγκέντρωσης ραδονίου στο νερό



Εικόνα 3.18: Θάλαμος ιονισμού τύπου S (S Chamber)(Elec Inc, 1998)

Η εταιρεία κατασκευής παράγει δύο διαφορετικούς τύπους electret με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Τα electret διαχωρίζονται σε βραχυπρόθεσμα (Short Term), τα οποία έχουν υψηλότερη ευαισθησία, χρησιμοποιούνται κυρίως για βραχυπρόθεσμες μετρήσεις και έχουν μπλε ετικέτα. Για μακροπρόθεσμες μετρήσεις χρησιμοποιούνται τα electret με κόκκινη ετικέτα (Long Term), τα οποία έχουν λιγότερη ευαισθησία και αποφορτίζουν πιο δύσκολα.

Τα καινούργια electret είναι φορτισμένα με ηλεκτροστατικό πεδίο 700-780V και επιτρέπουν 500V προς χρήση. Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση των electret τόσο πιο ισχυρό είναι το ηλεκτροστατικό πεδίο που τα αποτελεί ώστε να είναι πιο αποδοτικά στη συλλογή των ηλεκτρονίων που παράγονται κατά τους ιονισμούς εντός του θαλάμου. Σε περίπτωση όπου τα πλακίδια αποφορτιστούν κάτω από τα 100V προτείνεται η μη χρήση τους καθώς το ασθενές ηλεκτροστατικό πεδίο δεν μπορεί να συγκρατήσει με ακρίβεια τα ιόντα (Elec Inc, 1998).

#### Μέθοδος υπολογισμού των περιεκτικότητας ραδονίου

Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης Rn-222 στα δείγματα που μετρήθηκαν με την μέθοδο EIC έγινε χρήση της υπολογιστικής σελίδας της κατασκευάστριας εταιρείας (Quick Calculator). Στη συγκεκριμένη ιστοσελίδα εισάγονται δεδομένα όπως ο τύπος του θαλάμου ιονισμού που τοποθετείται το Teflon δισκίο, οι μονάδες μέτρησης του συστήματος, τα χαρακτηριστικά του δισκίου, η συγκέντρωση ραδονίου στο χώρο που διεξάγεται το πείραμα και το υψόμετρο. Παράλληλα εισάγεται η τάση του δισκίου πριν την εκκίνηση του πειράματος καθώς και η τάση του δισκίου κατά την ολοκλήρωση του πειράματος. Σύμφωνα με την διαφορά του χρόνου ανάμεσα στην εκκίνηση και στο τέλος του πειράματος (TA) εξάγεται το αποτέλεσμα της συγκέντρωσης ραδονίου σε Becquerel ανά κυβικό μέτρο ( $Bq/m^3$ ) και το ποσοστό απόκλισης από το αποτέλεσμα.

Όπως έχει αναφερθεί και στην αρχή της ενότητας αυτή η μέθοδος μέτρησης χρησιμοποιείται κυρίως για την μέτρηση ραδονίου στην ατμόσφαιρα. Καθώς ενδιαφερόμαστε για την μέτρηση του ραδονίου στο νερό και γνωρίζοντας την χωρητικότητα του γυάλινου δοχείου και την μάζα του δείγματος που τοποθετείται εντός του γίνεται αναγωγή του αποτελέσματος σε  $Bq/L$ .

Στο επόμενο βήμα έγινε προσδιορισμός της συγκέντρωσης ραδονίου στην χρονική στιγμή της συλλογής του δείγματος. Αναλυτικότερα, βάση της διαφοράς χρόνου (Time Delay, TD) μεταξύ της συλλογής των δειγμάτων και την χρονική στιγμή της έναρξης του πειράματος υπολογίζεται η ανοιγμένη τιμή της συγκέντρωσης ραδονίου στο χρόνο συλλογής τους δείγματος. Η τιμή της διαφοράς χρόνου πρέπει να είναι σε μέρες, για παράδειγμα αν υπήρξε χρονική καθυστέρηση τριών ωρών ανάμεσα στη συλλογή και την μέτρηση τότε η τιμή θα είναι 0,125.

Χρησιμοποιώντας την χρονική περίοδο που μεσολαβεί από την συλλογή μέχρι την έναρξη του πειράματος προσδιορίζεται η σταθερά C1. Η τιμή του 0,1814 αντιστοιχεί στην σταθερά διάσπασης του ραδονίου ανά ημέρα. Η σταθερά C1 υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$C1 = e^{0.1814*TD} \quad (3.16)$$

Έχοντας ως δεδομένο τον όγκο της γεωμετρίας του γυάλινου δοχείου σε λίτρα (4,044L) αφαιρούμε από αυτόν ότι τοποθετούμε εντός του. Πιο συγκεκριμένα εντός του ερμητικά κλειστού γυάλινου δοχείου τοποθετείται το γυάλινο δοχείο ( $V_{glass}$ ), (ο όγκος του υλικού του είναι 0,054L), γεμάτο με το δείγμα νερού ( $V_{H2O}$ ), όγκου 0,123L και το δισκίο E-Perm εγκατεστημένο πάνω στο θάλαμο ιονισμού τύπου S, (ο όγκος του υλικού του είναι 0,224L). Σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση 3.17 υπολογίζεται ο όγκος του αέρα εντός του θαλάμου ιονισμού ( $V_{corr}$ ).

$$V_{corr} = 4.044 - 0.123 - 0.054 - 0.224 = 3.643L \quad (3.17)$$

Ακολούθως υπολογίζεται ο συντελεστής Ostwald (L), βάση του τύπου 3.18, ο οποίος αντιπροσωπεύει την διαλυτότητα του ραδονίου στο νερό ανάλογα της θερμοκρασίας. Θεωρούμε ότι η θερμοκρασία στην οποία διεξάγεται το πείραμα κυμαίνεται μεταξύ των 18~21°C.

$$L = 0,105 + 0,405 * e^{-0.0502*°C_{H2O}} \quad (3.18)$$

Σύμφωνα με όσα έχουν υπολογιστεί μέχρι στιγμής καταλήγουμε στον υπολογισμό της μεταβλητής C2 από τον τύπο 3.19. Η μεταβλητή εξαρτάται από τον TA,  $V_{corr}$ ,  $V_{H2O}$  και τον συντελεστή L.

$$C2 = \left( \frac{V_{corr}}{V_{H2O}} + L \right) * 0.1814 * TA / (1 - e^{-0.1814*TA}) \quad (3.19)$$

Με όσα έχουμε υπολογίσει μέχρι στιγμής και με το αποτέλεσμα που εξάγουμε από το Quick Calculation ( $Rn_{AIR}$ ) μπορούμε να υπολογίσουμε την συγκέντρωση ραδονίου στο νερό ( $Rn_{WATER}$ ). Οι μονάδες μέτρησης είναι τα pCi/L και το αποτέλεσμα μας είναι ανοιγμένο στον χρόνο συλλογής χρησιμοποιώντας τον τύπο 3.20.

$$Rn_{WATER} \left( \frac{pCi}{L} \right) = Rn_{AIR} * C1 * C2 * 1.15 \quad (3.20)$$

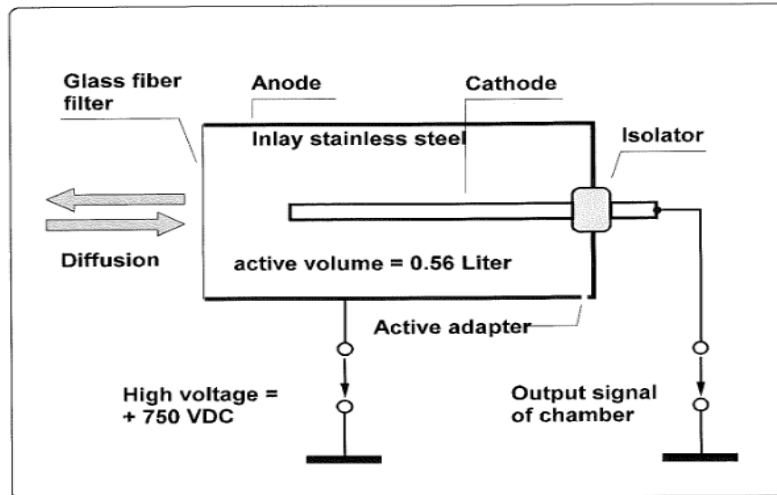
Για την μετατροπή του αποτελέσματος σε Becquerels ανά λίτρο γίνεται πολλαπλασιασμός του πιο πάνω αποτελέσματος με την σταθερά 0,037 (Elec Inc, 1998)

$$Rn'_{WATER} \left( \frac{Bq}{L} \right) = Rn_{WATER} \left( \frac{pCi}{L} \right) * 0.037 \quad (3.21)$$



### 3.7) Πειραματική διαδικασία μέσω θαλάμου ιονισμού του ανιχνευτή AlphaGuard

Η τελευταία μέθοδος που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων ραδονίου στα δείγματα νερού της παρούσας διπλωματικής ήταν μέσω του θαλάμου ιονισμού ανοικτού παραθύρου του ανιχνευτή AlphaGuard και συγκεκριμένα το AquaKit της κατασκευάστριας εταιρείας Genitron. Το σύστημα επιλέχθηκε, για την πρωτεύουσα μέθοδο μέτρησης, λόγω της σταθερότητας της βαθμονόμησης αλλά και των μετρήσεων ακριβείας που έχουν επιβεβαιωθεί σε προηγούμενες μελέτες που έχουν λάβει χώρα στο εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του Α.Π.Θ. Ο ανιχνευτής περιλαμβάνει ένα κυλινδρικό θάλαμο ιονισμού ανοικτού τύπου ικανό να μετρήσει τα α-σωματίδια του ραδονίου του αέρα, ο οποίος έχει ενεργό όγκο 560ml με εύρος μέτρησης από 2 έως  $2 \cdot 10^6 \text{ Bq/m}^3$  (Saphymo GmbH, 2010).



Εικόνα 3.19: Θάλαμος ιονισμού εντός του Alpha Guard ( Saphymo, 2010)

Η λειτουργία του ανιχνευτή ραδονίου AlphaGuard βασίζεται στον σχεδιασμό ενός θαλάμου ιονισμού που λειτουργεί μέσω παλμών. Σε κανονική λειτουργία οι μετρούμενες ποσότητες ραδονίου εισέρχονται στον θάλαμο μέσω μιας μεγάλης γυάλινης επιφάνειας (Glass fiber filter), η οποία δρα σαν φίλτρο. Διαμέσου της συγκεκριμένης επιφάνειας περνάει μόνο το Ραδόνιο-222, καθώς τα θυγατρικά του στοιχεία εμποδίζονται να εισέλθουν εντός του θαλάμου ιονισμού. Την ίδια στιγμή το φίλτρο προστατεύει το εσωτερικό του θαλάμου ιονισμού από μη επιθυμητά στοιχεία (Mas et al., 2021; Saphymo GmbH, 2010).

Όταν ενεργοποιείται η συσκευή η εξωτερική μεταλλική επιφάνεια του θαλάμου ιονισμού τροφοδοτείται με συνεχή τάση 750V (άνοδος). Παράλληλα με τον μεταλλικό άξονα τροφοδοσίας υπάρχει μια ηλεκτρικά απομονωμένη ράβδος με σταθερή συνεχή τάση των 0V (κάθοδος). Με την διάσπαση του ραδιενεργού αερίου τα σωματίδια άλφα ιονίζουν τον αέρα εντός του θαλάμου ιονισμού. Τα θετικά φορτισμένα σωματίδια έλκονται από την κάθοδο που παραμένει σε μηδενικό δυναμικό, ενώ στην άνοδο έλκονται τα αρνητικά φορτισμένα σωματίδια. Στη συνέχεια όλο το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα το οποίο είναι ανάλογο της ποσότητας των διασπώμενων πυρήνων του ραδονίου. Η άκρη της καθόδου είναι ενωμένη με έναν ευαίσθητο προενισχυτή, με αποτέλεσμα οι τιμές που λαμβάνει από την δίοδο να μετατρέπονται στο ακόλουθο ψηφιακό δίκτυο .

Για την διαδικασία παραγωγής σημάτων (Digital Signal Processing - DSP) εντός της συσκευής υπάρχουν τρία διαφορετικά κανάλια . Το κάθε ένα από αυτά τα κανάλια χρησιμοποιεί

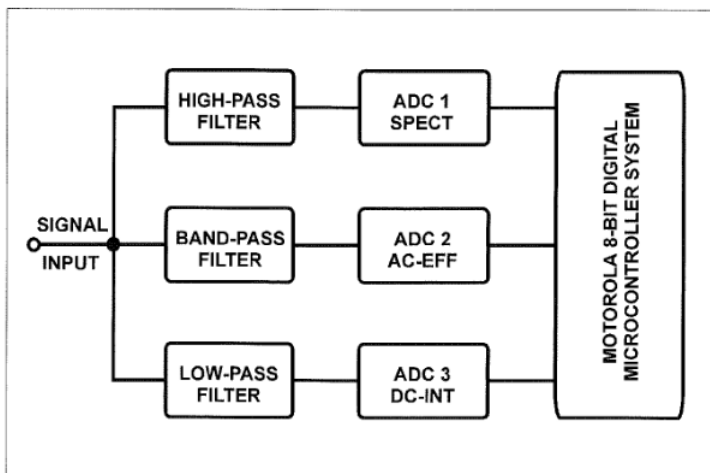
ένα ξεχωριστό αναλογικό ή ψηφιακό μετατροπέα. Αυτή η δομή του δικτύου μας επιτρέπει την ανάλυση των σημάτων που εξάγει ο προενισχυτής μέσω τριών μεθόδων (Saphymo GmbH, 2010).

Στο πρώτο κανάλι λαμβάνει χώρα η φασματοσκοπία (SPEC) του ανιχνευτή AlphaGuard. Το σήμα που διαρρέει αυτό το κανάλι δεν χαρακτηρίζεται μόνο από το μέγεθος του παλμού, αλλά και από την μορφή ενός τρισδιάστατου φάσματος που αντιστοιχεί στον κάθε παλμό. Ο κάθε άξονας του φάσματος αντιστοιχεί σε μια διαφορετική μονάδα μέτρησης. Πιο συγκεκριμένα, ο άξονας X αντικατοπτρίζει το ύψος του παλμού, δηλαδή την ενέργεια των σωματιδίων άλφα. Στον άξονα Y περιγράφεται το πλήθος των παλμών ανά μονάδα χρόνου και στον άξονα Z απεικονίζονται οι κατηγορίες των παλμών ανάλογα με την προέλευση τους (Προερχόμενοι από α, προερχόμενοι από γ των θυγατρικών κτλ). Λόγω της πολυπλοκότητας του πρώτου καναλιού μας δίνεται η δυνατότητα να χαρακτηρίζουμε με μεγάλη ακρίβεια τις συγκεντρώσεις ραδονίου. Παράλληλα μέσω αυτού του καναλιού γίνεται έντονα διακριτό ένα πραγματικό γεγονός α σωματιδίου από ένα ψευδές γεγονός (Saphymo GmbH, 2010) .

Στο δεύτερο κανάλι μεταφοράς των σημάτων (AC-EFF) εμφανίζονται οι υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου. Επιλέγεται το εύρος του ζωνοπερατού φίλτρου ώστε να αποκόπτονται οι παρασιτικοί θόρυβοι στους υψηλούς παλμούς. Το εύρος του φίλτρου πρέπει να αφήνει να περάσει ο τετραγωνικός παλμός που προκύπτει από ένα α σωματίο του ραδονίου. Το μέγεθος της τιμής του ρεύματος είναι σχετικά μικρό ( $10^{-12} A$ ). Ωστόσο λαμβάνοντας υπόψη ότι ο θόρυβος είναι η τετραγωνική ρίζα του πλήθους των παλμών, η μέτρηση μπορεί να γίνει με εξαιρετικά υψηλή ακρίβεια. Ταυτόχρονα εξαλείφονται τα σφάλματα που προκύπτουν από τον προενισχυτή (Saphymo GmbH, 2010).

Μέσω του τρίτου καναλιού μεταφέρονται οι «κλασσικές» μετρήσεις του συνεχόμενου ρεύματος (DC-INT). Σε αυτό το εύρος των μετρήσεων εμφανίζονται οι ακραίες τιμές από τις συγκεντρώσεις ραδονίου στα δείγματα. Παράλληλα προσδίδει ένα επίπεδο εμπιστοσύνης και ακρίβειας προς τις ακραίες τιμές που μπορούν να μετρηθούν μέσω της συσκευής. (Saphymo GmbH, 2010)

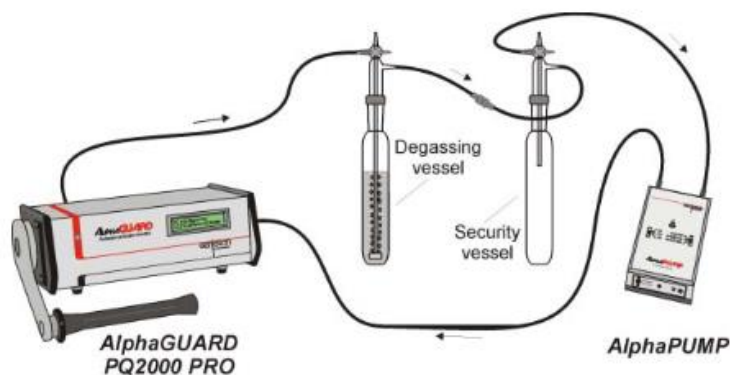
Τέλος γίνεται συνδυασμός των δεδομένων που προκύπτουν από τα τρία κανάλια, σύμφωνα με έξι διαφορετικούς αλγόριθμους που χρησιμοποιεί η συσκευή. Το τελικό αποτέλεσμα της συγκέντρωσης ραδονίου αναγράφεται στην οθόνη της συσκευής μετά από 50 εκατομμύρια υπολογισμούς. Για να γίνει εφικτό το ρεύμα διαρροής να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, κάτω από 3mA, ώστε να μην αλλοιώνεται το αποτέλεσμα χρησιμοποιούνται προηγμένης τεχνολογίας ημιαγωγοί (Saphymo GmbH, 2010).



Εικόνα 3.20: Το διάγραμμα της επεξεργασίας των ψηφιακών σημάτων (Saphymo GmbH, 2010)

### Δομή του συστήματος μέτρησης και πειραματική διαδικασία με τον ανιχνευτή Alpha Guard

Το σύστημα του ανιχνευτή αποτελεί ένα αεροστεγώς κλειστό βρόχο ο οποίος όταν τοποθετηθεί το δείγμα σε αυτόν, δεν έρχεται σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα, ώστε να μπορούν να μετρηθούν οι συγκεντρώσεις ραδονίου του δείγματος, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.21. Αρχικά το σύστημα απαρτίζεται από δύο γυάλινα δοχεία στα οποία υπάρχει «επικοινωνία» του αέρα μεταξύ τους, στο πρώτο δοχείο τοποθετείται το δείγμα νερού (degassing vessel) ενώ το δεύτερο λειτουργεί ως δοχείο ασφαλείας (security vessel) ώστε σε περίπτωση λάθους πλήρωσης του πρώτου να μην φτάσει το νερό στον ανιχνευτή. Επίσης χρησιμοποιείται μια αντλία αέρα (Alpha Pump) η οποία διατρέχει τον αέρα του κλειστού κυκλώματος μέσα από το δείγμα νερού δημιουργώντας φυσαλίδες με αποτέλεσμα το ραδόνιο νερό να περνάει και στον αέρα του κλειστού κυκλώματος. Τέλος το σύστημα ολοκληρώνεται με τον ανιχνευτή ραδονίου (Alpha Guard PQ2000 Pro), ο οποίος ανά δέκα λεπτά υπολογίζει την περιεκτικότητα ραδονίου του αέρα του κλειστού κυκλώματος που περιλαμβάνει και τον θάλαμο ιονισμού ανοιχτού τύπου (Mas et al., 2021).



Εικόνα 3.21: Δομή συστήματος AquaKit απόκρισης συγκεντρώσεων ραδονίου με τον ανιχνευτή AlphaGuard (Saphymo GmbH, 2010)

Αρχικά πριν την τοποθέτηση του δείγματος στον ανιχνευτή λαμβάνεται η τιμή της συγκέντρωσης ραδονίου στο άδειο σύστημα  $C_0$ , η οποία θα χρησιμοποιηθεί σε ακόλουθο υπολογισμό.

Έπειτα τοποθετείται το δείγμα νερού ποσότητας 100ml εντός του δοχείου δείγματος και στη συνέχεια κλείνει το σύστημα ώστε να μην έχουμε απώλειες ραδονίου στην ατμόσφαιρα. Μετά ενεργοποιείται η αντλία με ρυθμό παροχής αέρα 0.3 l/min, για 10 λεπτά. Η ανάδευση του δείγματος με τον αέρα του κλειστού κυκλώματος απελευθερώνει άτομα ραδονίου από το νερό στον αέρα. Όλες οι σταγόνες που παράγονται κατά την ανάδευση του δείγματος καταλήγουν στο δοχείο ασφαλείας για την προστασία του ανιχνευτή (Mas et al., 2021).

Στην συνέχεια απενεργοποιείται η αντλία ανάδευσης και καταγράφονται οι μετρήσεις που εξάγει ο ανιχνευτής AlphaGuard. Το δείγμα παραμένει εντός του ανιχνευτή για 70 λεπτά. Σε αυτή την διάρκεια ο ανιχνευτής παρουσιάζει 7 τιμές συγκεντρώσεων ραδονίου στον αέρα ανά 10λεπτο. Η μονάδα μέτρησης του αποτελέσματος είναι τα Becquerels ανά κυβικό μέτρο ( $\frac{Bq}{m^3}$ ).

Η πρώτη τιμή μέτρησης του ανιχνευτή απορρίπτεται καθώς μπορεί να περιέχει τιμές μέτρησης πριν την εκκίνηση της πειραματικής διαδικασίας αλλά και κατά την διάρκεια ανάδευσης του δείγματος.

Αφού καταγραφούν οι 6 μετρήσεις της συγκέντρωσης ραδονίου στον αέρα υπολογίζεται η μέση τιμή τους. Ακολούθως σύμφωνα με τον τύπο 3.22 υπολογίζεται η συγκέντρωση ραδονίου στο νερό.

$$C_{Water} = \frac{C_{Air} * \left( \frac{V_{System} - V_{Sample}}{V_{System}} + k \right) - C_0}{1000} \quad (3.22)$$

Όπου με το σύμβολο  $C_{Water}$  απεικονίζεται η συγκέντρωση Rn-222 στο νερό με μονάδα μέτρησης  $\frac{Bq}{L}$ . Το σύμβολο  $C_{Air}$  ( $\frac{Bq}{m^3}$ ) αντιστοιχεί στην τιμή που υπολογίζεται από την μέση τιμή των 6 ενδείξεων του ανιχνευτή. Με  $V_{System}$  και  $V_{Sample}$  συμβολίζεται ο εσωτερικός όγκος του συστήματος μέτρησης και ο όγκος του δείγματος νερού αντίστοιχα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, τα δύο αυτά μεγέθη θεωρήθηκαν σταθερά καθώς ο όγκος κάθε δείγματος παρέμενε σταθερός στα 100ml και ο όγκος του συστήματος του ανιχνευτή χωρίς το δείγμα νερού ισούται με 1102mL. Το σύμβολο  $C_0$  ( $\frac{Bq}{m^3}$ ) συμβολίζει την τιμή της μέτρησης ραδονίου στο σύστημα πριν την εισαγωγή του δείγματος, δηλαδή το υπόβαθρο του αέρα του κλειστού κυκλώματος. Με τον χαρακτήρα  $k$  συμβολίζεται ο συντελεστής διαλυτότητας (Ostwald) του Rn-222 στο νερό, οποίος μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα της θερμοκρασίας (T) σύμφωνα με τον τύπο 3.23. (Saphymo GmbH, 2010)

$$k = 0,105 + 0,405 * e^{-0.0502T} \quad (3.23)$$

Τέλος γνωρίζοντας την συγκέντρωση ραδονίου του δείγματος κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας γίνεται αναγωγή στην συγκέντρωση του ραδονίου κατά την χρονική στιγμή της δειγματοληψίας. Η ανοιγμένη τιμή ως προς την χρονική στιγμή συλλογής ( $C'_{Water}$ ) προκύπτει από τον τύπο 3.24.

$$C'_{Water} = \frac{C_{Water} * e^{\ln 2 * \Delta t}}{D * T_{1/2}} \quad (3.24)$$

Σύμφωνα με τον πιο πάνω τύπο με τον όρο  $C_{Water}$  συμβολίζεται το αποτέλεσμα της μετρούμενης συγκέντρωσης ραδονίου. Ο όρος  $\Delta t$  συμβολίζει την διαφορά χρόνου σε ώρες

ανάμεσα στη χρονική στιγμή της συλλογής του δείγματος και την χρονική στιγμή της εκκίνησης της πειραματικής διαδικασίας. Ακολούθως με τον όρο  $D$  συμβολίζεται η χρονική διάρκεια της μέρας σε ώρες (24 ώρες) και με τον όρο  $T_{1/2}$  απεικονίζεται ο σταθερός χρόνος ημιζωής για το ραδόνιο (3,82 ημέρες). Βάση των πιο πάνω υπολογισμών εξάγεται το αποτέλεσμα της συγκέντρωσης ραδονίου στην ανοιγμένη χρονική στιγμή της συλλογής του δείγματος. (Saphymo GmbH, 2010)

## Κεφάλαιο 4 – Αποτελέσματα μετρήσεων

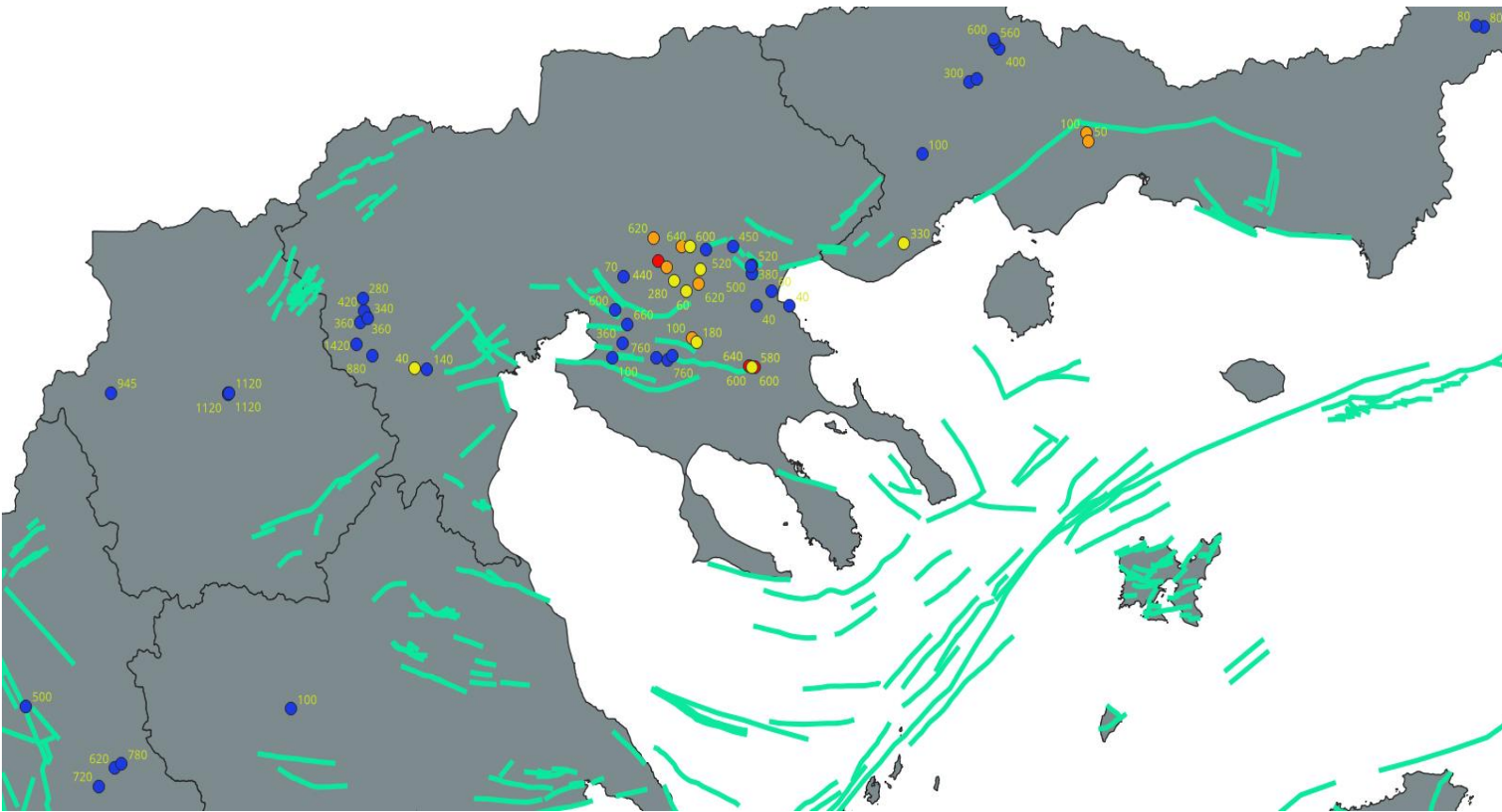
### 4.1) Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων στα δείγματα νερού

#### 4.1.1) Σημεία συλλογής δειγμάτων νερού και γεωλογικά ρήγματα

Αρχικά γίνεται παρουσίαση σημείων δειγματοληψίας νερού συγκριτικά με τα σεισμολογικά ρήγματα.

Γίνεται παρουσίαση των σημείων δειγματοληψίας νερού για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης Rn-222 και παράλληλα γίνεται συσχέτιση της θέσης τους συγκριτικά με τα γεωλογικά ρήγματα. Τα ρήγματα παρουσιάζονται στην εικόνα με πράσινο χρώμα και έχουν μορφή ευθείων γραμμών και μπορεί να είναι ενεργά, πιθανά και μη ενεργά ρήγματα.

Με την μορφή κουκίδων παρουσιάζονται τα σημεία δειγματοληψίας νερού και γίνεται ταξινόμηση μέσω χρωματικού κώδικα ανάλογα με τη συγκέντρωση του κάθε δείγματος.



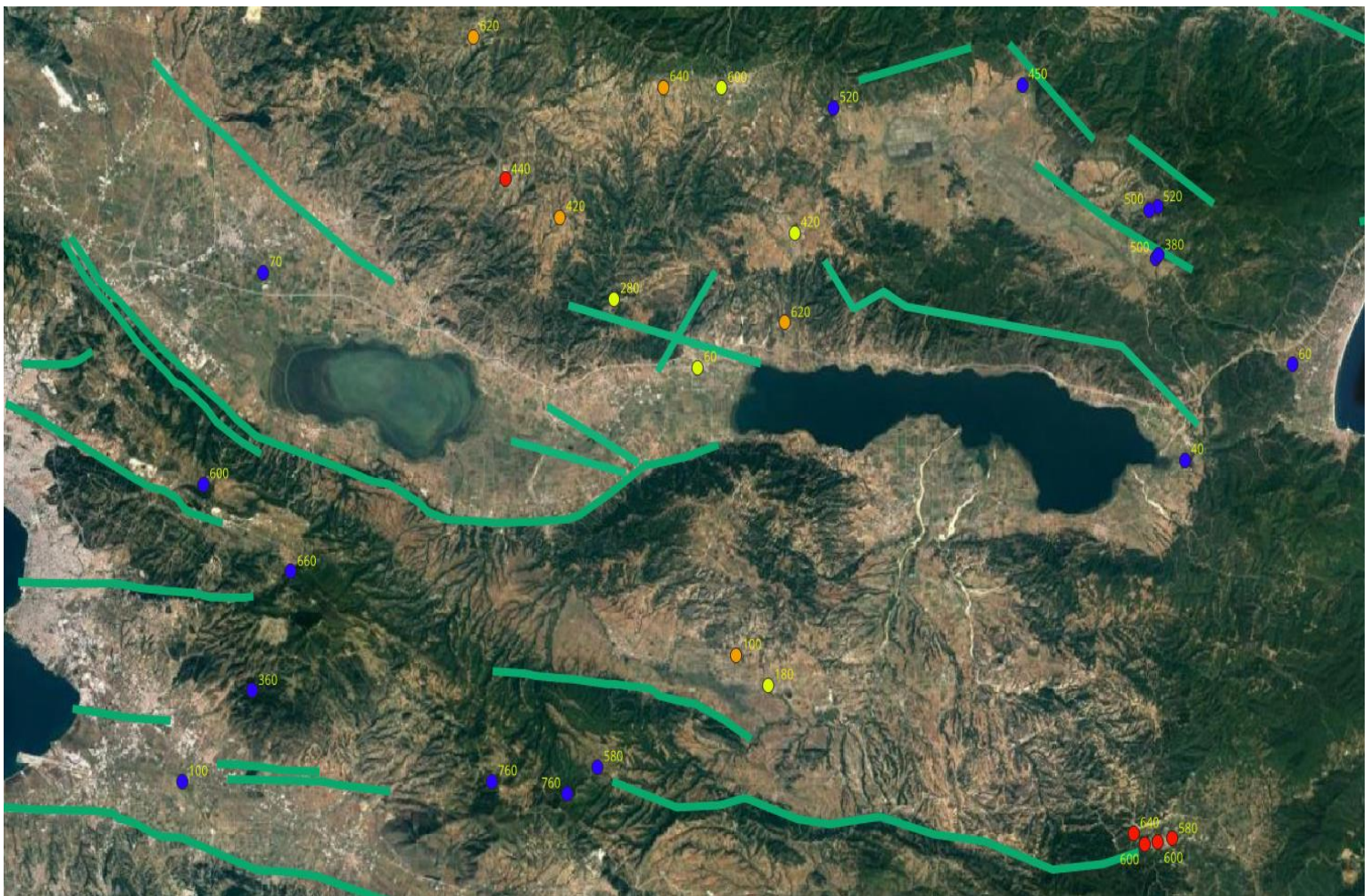
Εικόνα 4.1: Σημεία συλλογής νερού βαθμονομημένα ανάλογα την συγκέντρωση Rn-222 (Μπλέ = 0 - 25 Bq/L, Κίτρινο = 25 - 50 Bq/L, Πορτοκαλί = 50 - 100 Bq/L, Κόκκινο = 100 - 1000 Bq/L)

Στη πιο πάνω εικόνα παρουσιάζονται τα σημεία συλλογής νερού και γίνεται ταξινόμηση ανάλογα με την συγκέντρωση Rn-222 που μετρήθηκε σε αυτά. Αναλυτικότερα, στα σημεία με μπλε χρώμα η συγκέντρωση του Rn-222 κυμαινόταν μεταξύ των  $0 - 25 \frac{Bq}{L}$ , στα σημεία με κίτρινο χρώμα παρουσιάζονται τα δείγματα με συγκέντρωση στις τιμές των  $25 - 50 \frac{Bq}{L}$ . Με πορτοκαλί χρώμα εμφανίζονται τα σημεία με συγκέντρωση  $50 - 100 \frac{Bq}{L}$ . Με κόκκινο χρώμα

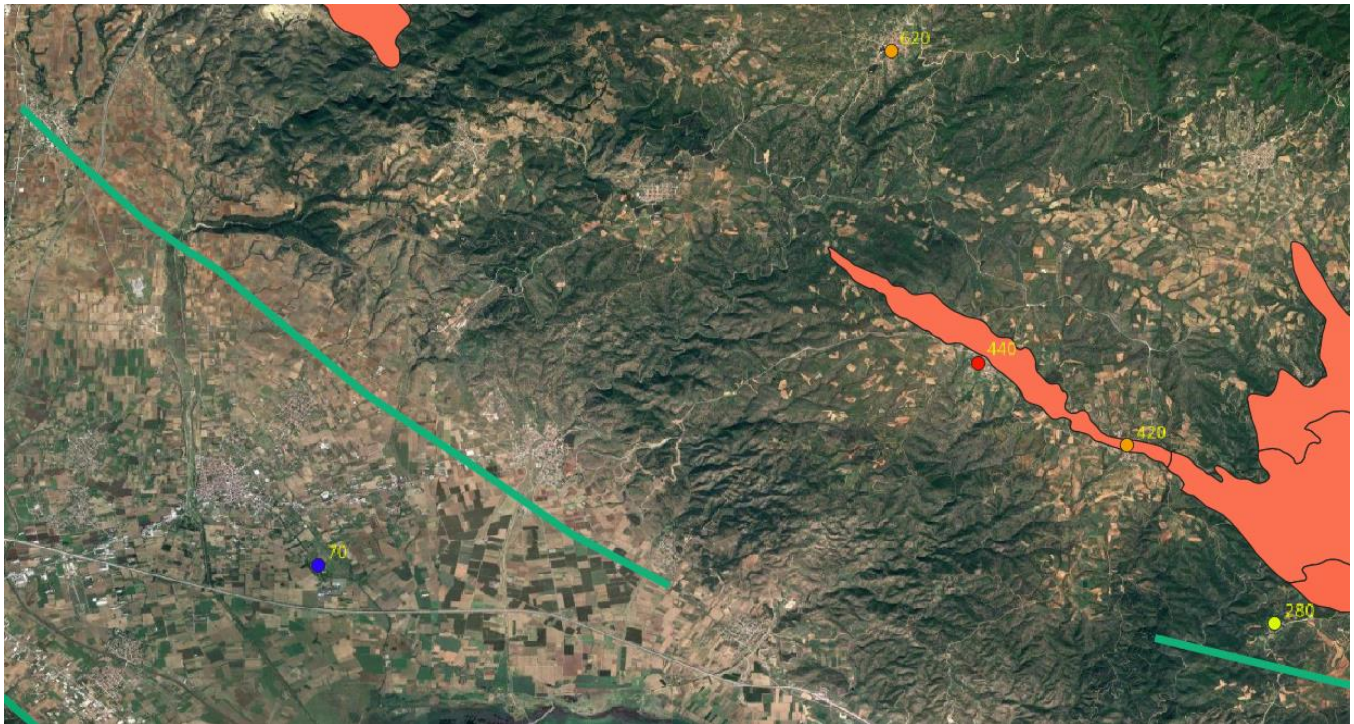
παρουσιάζονται τα σημεία όπου η τιμή της συγκέντρωσης είναι στο εύρος των τιμών τα  $100 - 1000 \frac{Bq}{L}$ . Η κόκκινη κατηγορία αποτελεί το προκαθορισμένο όριο της ευρωπαϊκής νομοθεσίας μέσω του συμβουλίου Euratom μεταξύ των τιμών 100-1000 Bq/L για το πόσιμο νερό (Council Directive 51/ Euratom, 2013).

Επίσης δίπλα από κάθε σημείο αναγράφεται το υψόμετρο του σημείου δειγματοληψίας από το επίπεδο της θάλασσας.

Στην συνέχεια γίνεται παρουσίαση συγκεκριμένων σεισμολογικών ρηγματίων που μελετήθηκαν, σε συνδυασμό με τα πετρώματα γρανίτη που εμφανίζονται στην εν λόγω περιοχή και τα σημεία δειγματοληψίας νερού. Τα πετρώματα γρανίτη εμφανίζονται με κόκκινο ενιαίο χρώμα και για τα δείγματα που μετρήθηκαν από το κάθε σημείο ισχύει ο πιο πάνω χρωματικός κώδικας.



Εικόνα 4.2: Σημεία δειγματοληψίας στην περιοχή της Μυγδόνας λεκάνης  
(Μπλέ = 0 - 25 Bq/L, Κίτρινο = 25 - 50 Bq/L, Πορτοκαλί = 50 - 100 Bq/L, Κόκκινο = 100 - 1000 Bq/L)



Εικόνα 4.3: Ρήγμα Ασσίρου

(Μπλέ = 0 - 25 Bq/L, Κίτρινο = 25 - 50 Bq/L, Πορτοκαλί = 50 - 100 Bq/L, Κόκκινο = 100 - 1000 Bq/L)

Ενιαίο Κόκκινο = Γρανιτικά Πετρώματα

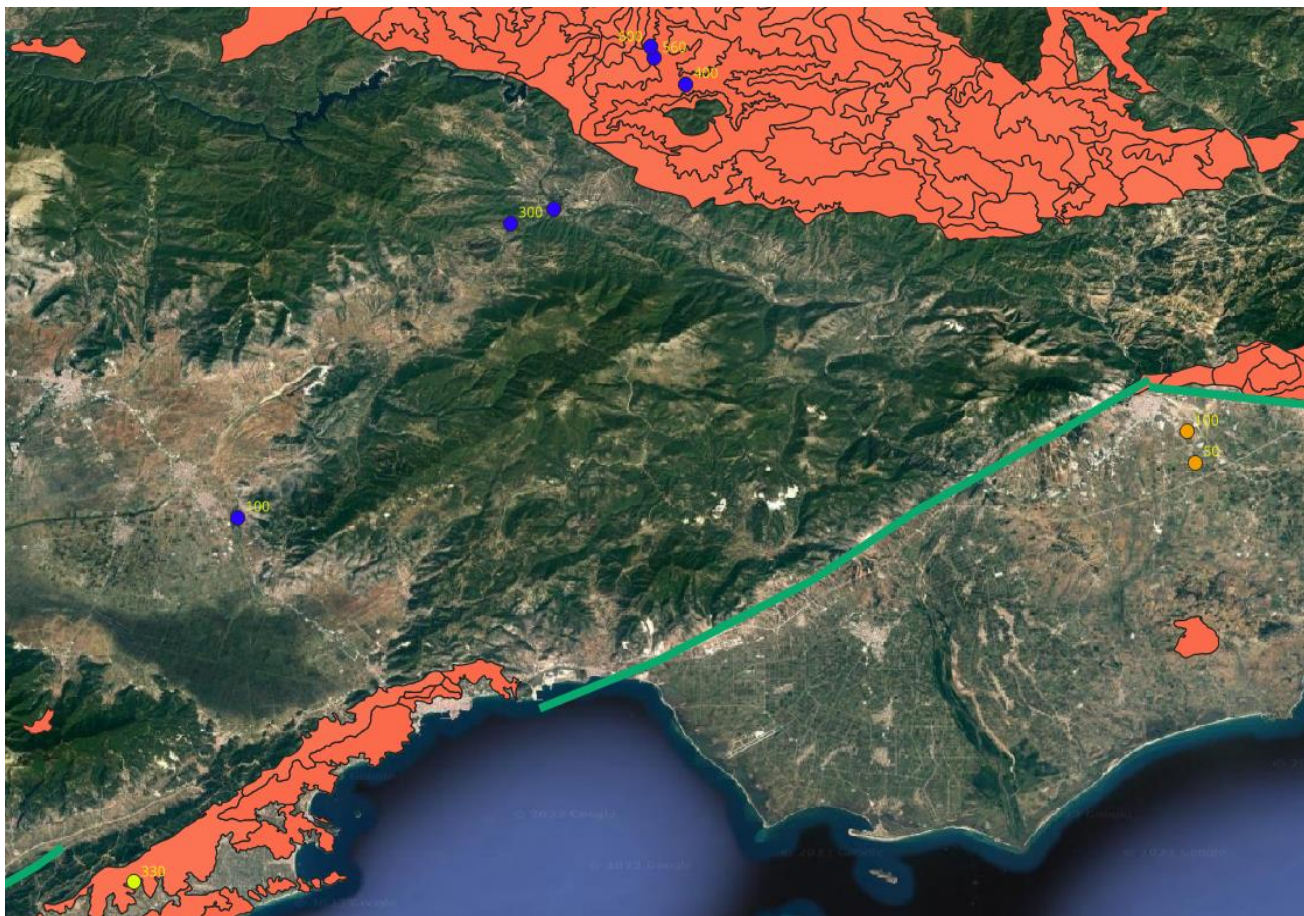


Εικόνα 4.4: Ρήγμα Γεροπλάτανου στο χωριό Αρναίας

(Μπλέ = 0 - 25 Bq/L, Κίτρινο = 25 - 50 Bq/L, Πορτοκαλί = 50 - 100 Bq/L, Κόκκινο = 100 - 1000 Bq/L)

Ενιαίο Κόκκινο = Γρανιτικά Πετρώματα



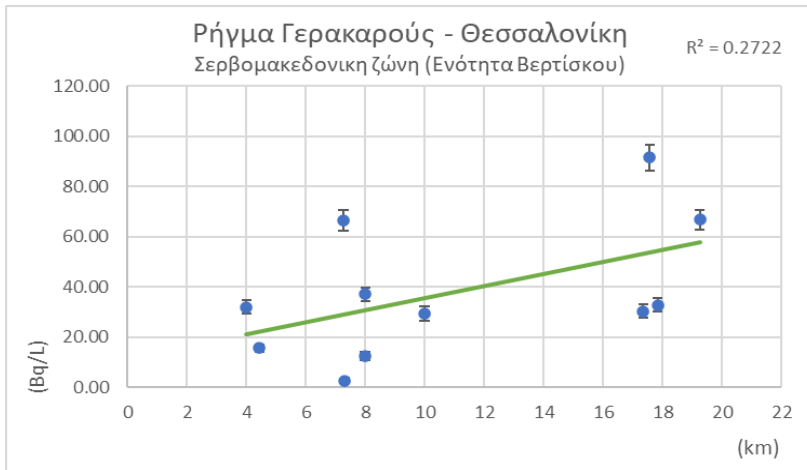


Εικόνα 4.5: Το ρήγμα Καβάλας – Ξάνθης

(Μπλέ = 0 - 25 Bq/L, Κίτρινο = 25 – 50 Bq/L, Πορτοκαλί = 50 – 100 Bq/L, Κόκκινο = 100 - 1000 Bq/L)

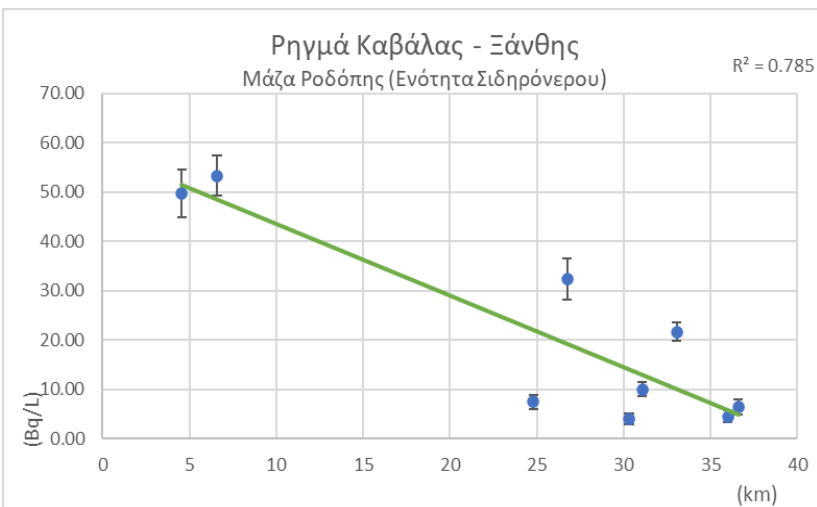
Ενιαίο Κόκκινο = Γρανιτικά Πετρώματα

Ακολούθως γίνεται επιλογή συγκεκριμένων γεωλογικών ρηγμάτων και σε συνδυασμό με τις συγκεντρώσεις Rn-222 των κοντινότερων σημείων δειγματοληψίας. Λαμβάνεται υπόψη η κάθετη επιφανειακή ελλειψοειδής απόσταση του σημείου δειγματοληψίας από το γεωλογικό ρήγμα, σε συνδυασμό με την συγκέντρωση Rn-222 στο κάθε σημείο και προκύπτουν οι εξής πίνακες:



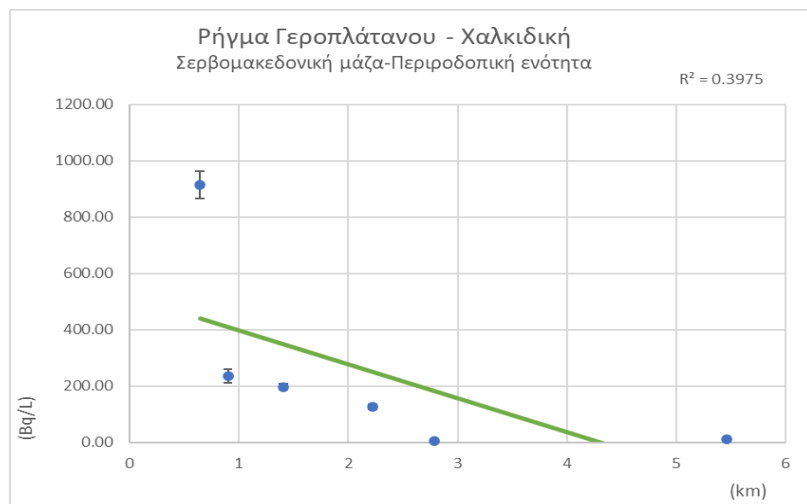
Πίνακας 4.1

Δείγμα	Απόσταση (km)	Συγκέντρωση (Bq/L)	Υφ. Πέτρωμα
Νυμφόπετρα	4	32	Τριτογ.
Ασβεστοχώρι	4,43	15,59	Σχιστόλιθοι
Βαγιοχώριο	7,26	66,38	Τριτογ.
Χορτιάτης	7,31	2,63	Σχιστόλιθοι
Λαγκαδάς	7,98	12,45	Αλλούβια
Μικροκόμη	8	37	Γνεύσιοι
Νέα Καλίνδοια	9,98	29,5	Σχιστόλιθοι
Ασκός	17,34	30,35	Τριτογ.
Αυγή	17,56	91,5	Τριτογ.
Σοχός	17,83	32,82	Τριτογ.
Αρετή	19,25	66,74	Γρανίτης



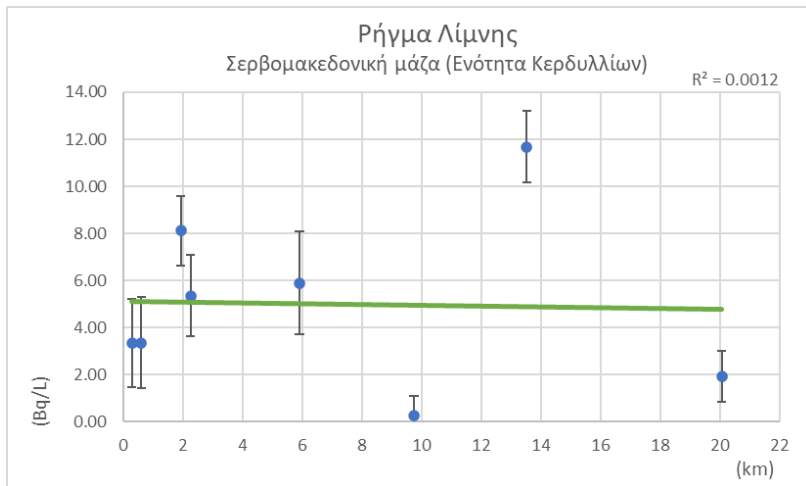
Πίνακας 4.2

Δείγμα	Απόσταση (km)	Συγκέντρωση (Bq/L)	Υφ. Πέτρωμα
Νέος Ζυγός	4,556	49,7	Αλλούβια
Φελώνη	6,58	53,3	Αλλούβια
Κεφαλάρι	22,8	7,38	Σκλ. Ασβεστόλιθοι
Μυρτόφυτο	26,74	32,3	Γρανίτης
Μεσοχώρι	30,3	3,93	Αλλούβια
Αγ. Παρασκευή	31,06	9,97	Αλλούβια
Αρκουδόρεμα	33,056	21,63	Γρανίτης
Σίλη 1	35,99	4,5	Γρανίτης
Σίλη 2	36,59	6,47	Γρανίτης

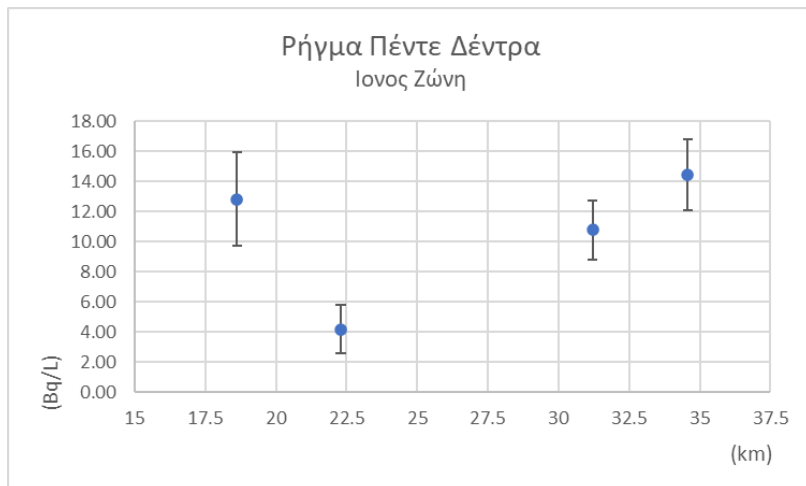


Πίνακας 4.3

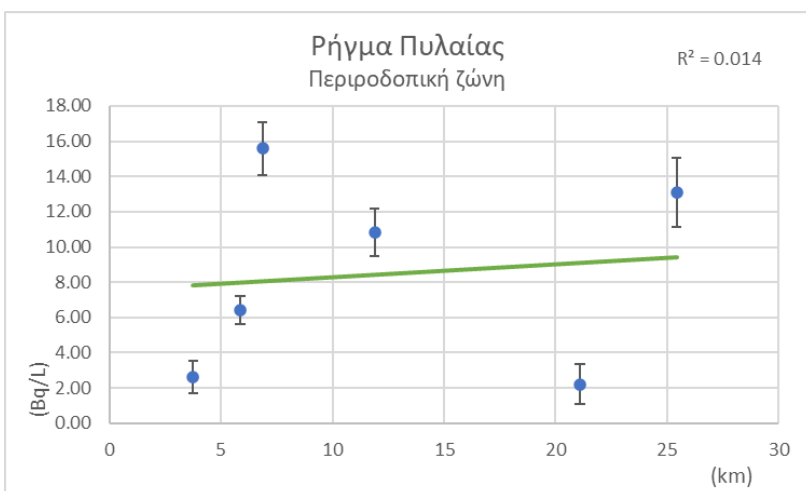
Δείγμα	Απόσταση (km)	Συγκέντρωση (Bq/L)	Υφ. Πέτρωμα
Αρναία Μνημείο	0,643	914,04	Γρανίτης
Αρναία Πρασ.	0,9	236	Γρανίτης
Αρναία Μέλι	1,4	198	Τριτογ.
Αρναία Βενζ.	2,22	128	Γρανίτης
Πετροκέρασα	2,79	6,76	Σχιστόλιθοι
Μακροκοπάνια	5,46	13,09	Σχιστόλιθοι



Πίνακας 4.4



Πίνακας 4.5

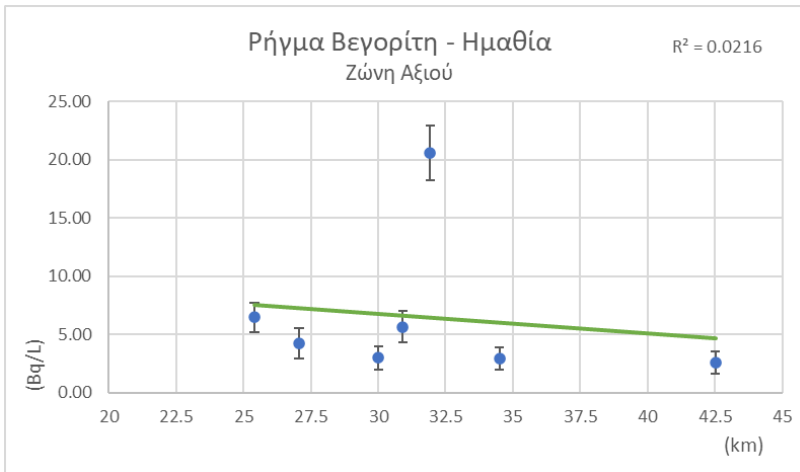


Πίνακας 4.6

Δείγμα	Απόσταση (km)	Συγκέντρωση (Bq/L)	Υφ. Πέτρωμα
Αρεθούσα Ρυάκι	0,29	3,35	Γνεύσιοι
Αρεθούσα Κέντρο	0,6	3,36	Τριτογ.
Στεφανινά Κέντρο	1,92	8,12	Κώνιοι Αποθέσεων
Στεφανινά Ρυάκι	2,25	5,35	Κώνιοι Αποθέσεων
Σκεπαστό	5,91	5,9	Τριτογ.
Βρασνά	9,74	0,27	Κώνιοι Αποθέσεων
Αγ. Μαρίνα	13,52	11,68	Σχιστόλιθοι
Ολυμπιάδα	20,06	1,94	Γνεύσιοι

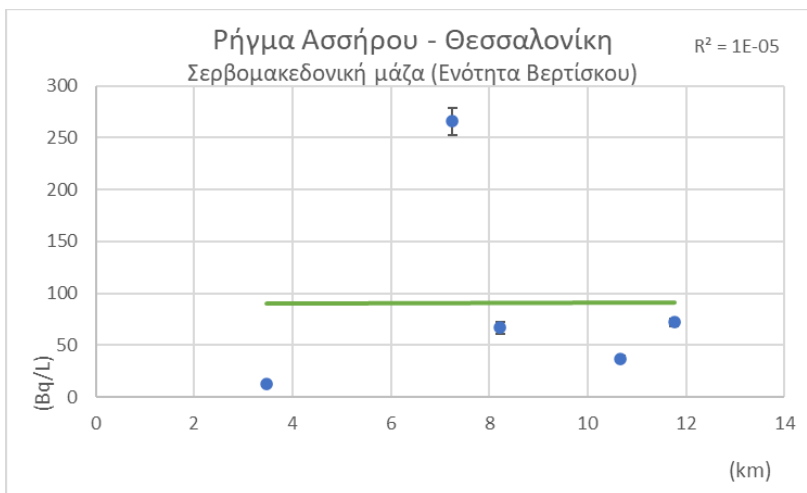
Δείγμα	Απόσταση (km)	Συγκέντρωση (Bq/L)	Υφ. Πέτρωμα
Δωδώνη	18,62	12,83	Μικτός φλύσχης
Κακολάγκαδο	22,3	4,2	Μικτός φλύσχης
Βρύσες Ραμίας	31,2	10,78	Μικτός φλύσχης
Γερόβρυση	34,57	14,44	Μικτός φλύσχης

Δείγμα	Απόσταση (km)	Συγκέντρωση (Bq/L)	Υφ. Πέτρωμα
Χορτιάτης	3,75	2,63	Σχιστόλιθοι
Τριάδι	5,87	6,41	Τριτογ.
Ασβεστοχώρι	6,86	15,59	Σχιστόλιθοι
Νέα Ραιδεστός	11,88	10,82	Τριτογ.
Λιθάδι	21,08	2,21	Σχιστόλιθοι
Μακροκόπανα	25,42	13,09	Σχιστόλιθοι



Πίνακας 4.7

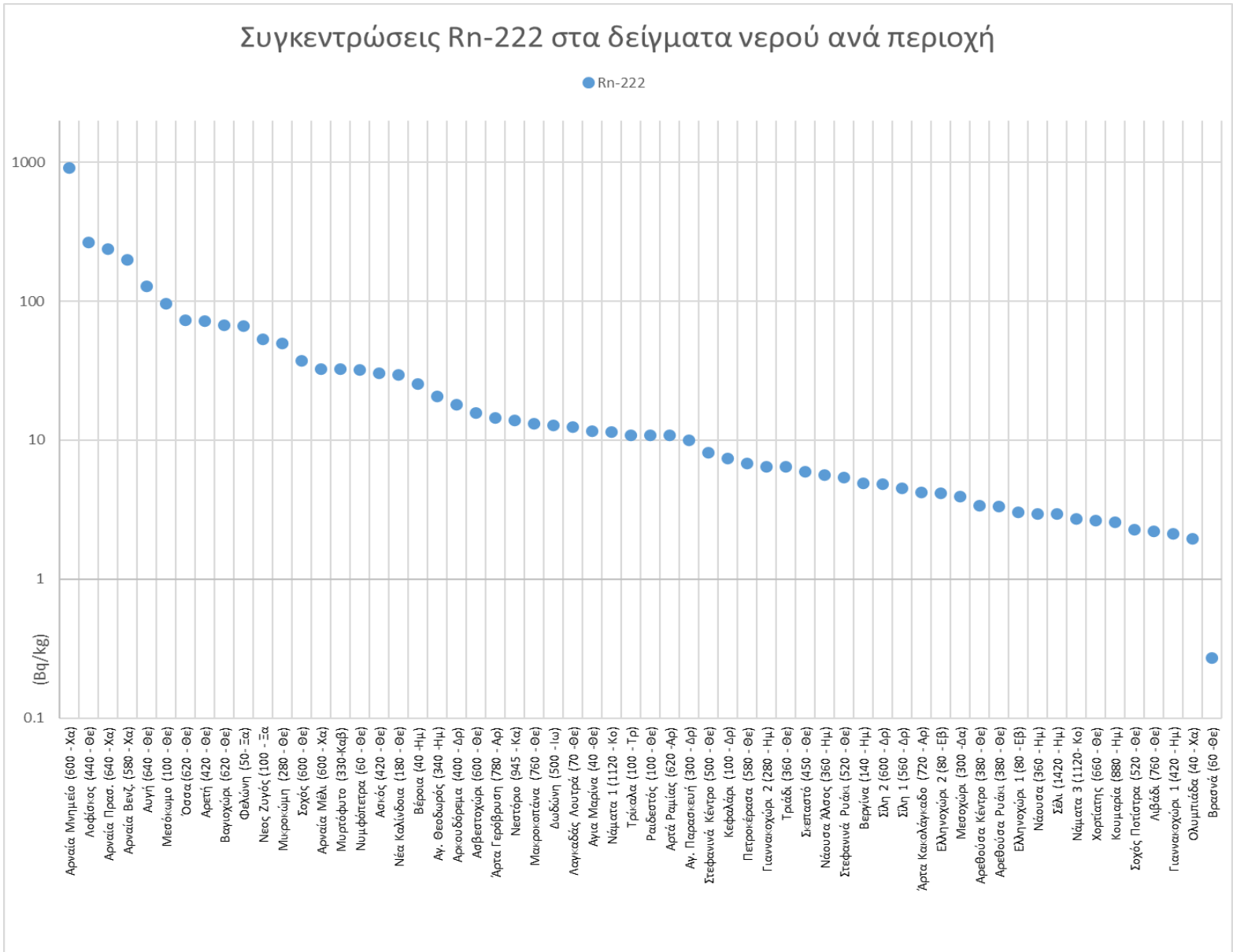
Δείγμα	Απόσταση (km)	Συγκέντρωση	Υφ. Πέτρωμα
Γιαννακχωρι 2	25,41	6,45	Τριτογ.
Γιαννακχωρι 1	27,07	4,22	Τριτογ.
Νάουσα	30,01	2,96	Τριτογ.
Αγ. Νικόλαος	30,91	5,64	Σκλ. Ασβεστόλιθοι
Αγ. Θεόδωροι	31,93	20,54	Σχιστόλιθοι
Σέλι	34,5	2,94	Σκλ. Ασβεστόλιθοι
Κουμαρία	42,52	2,58	Σκλ. Ασβεστόλιθοι



Πίνακας 4.8

Δείγμα	Απόσταση (km)	Συγκέντρωση	Υφ. Πέτρωμα
Λαγκαδάς	3,47	12,45	Αλλούθια
Λοφίσκος	7,25	265,6	Γρανίτης
Αρετή	8,22	66,74	Γρανίτης
Μικροκώμη	10,67	37	Γνεύσιοι
Όσσα	11,76	72	Γνεύσιοι

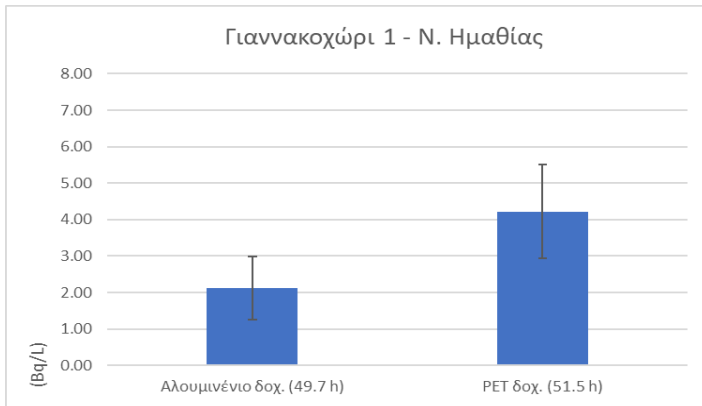
4.1.2) Παρουσίαση συγκέντρωσης ενεργότητας ραδονίου στα δείγματα νερού



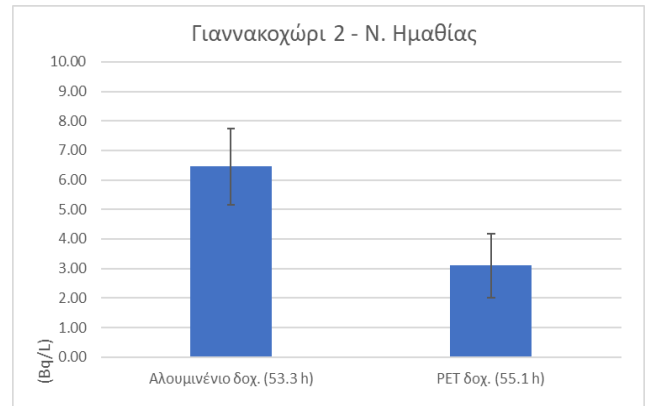
Πίνακας 4.9: Αναλυτική συγκέντρωση Rn-222 στα δείγματα νερού  
Αναφέρεται το επίπεδο δειγματοληψίας από την στάθμη της θάλασσα και ο νομός της κάθε περιοχής.

Στον πιο πάνω πίνακα 4.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις συγκεντρώσεις Rn-222 στα δείγματα νερού. Επίσης εντός της παρένθεσης για κάθε αποτέλεσμα γίνεται αναφορά της υψομετρικής διαφοράς από το επίπεδο της θάλασσας αλλά και του νομού στον οποίο ανήκει το σημείο δειγματοληψίας.

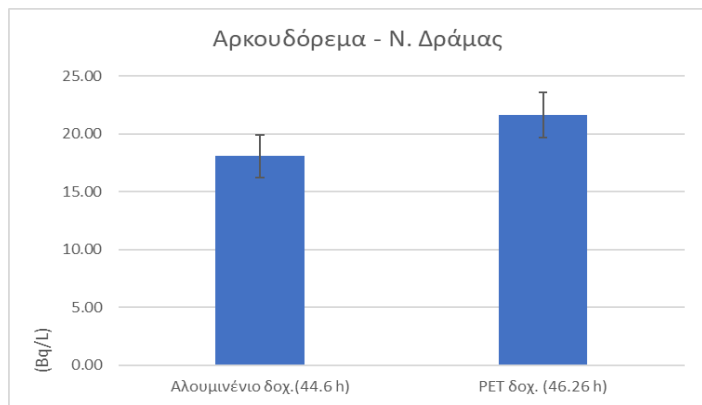
### 4.1.3) Συγκέντρωση Rn-222 ανάλογα με το δοχείο δειγματοληψίας



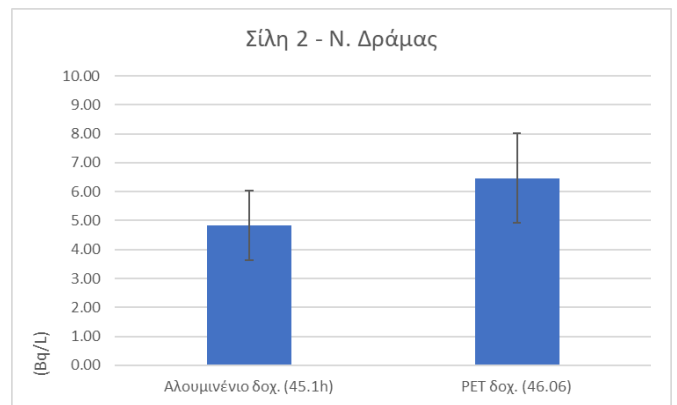
Πίνακας 4.10



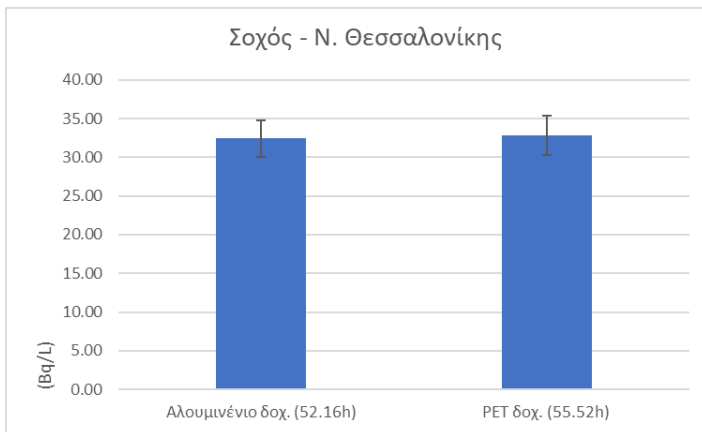
Πίνακας 4.11



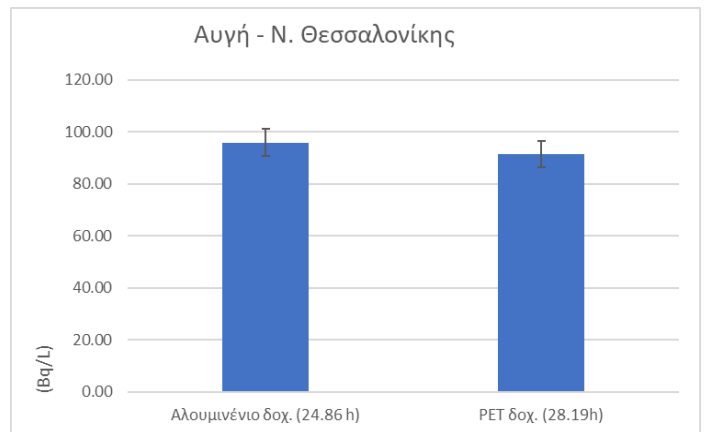
Πίνακας 4.12



Πίνακας 4.13



Πίνακας 4.14

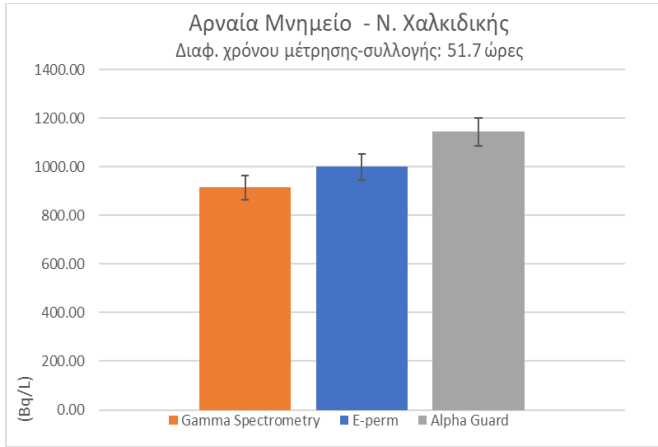


Πίνακας 4.15

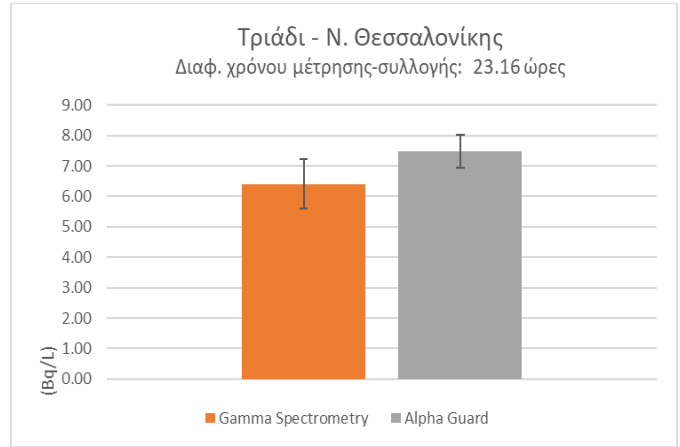
Στους πιο πάνω πίνακες παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των συγκεντρώσεων του ραδιονουκλιδίου Rn-222 ανάλογα με την μέθοδο δειγματοληψίας του νερού. Αναλυτικότερα με την πρώτη μέθοδο δειγματοληψίας τα δείγματα συλλέγονται σε αλουμινένιο δοχείο το οποίο δεν επιτρέπει την απελευθέρωση του αερίου Rn-222 στην ατμόσφαιρα. Παράλληλα, στα ίδια σημεία δειγματοληψίας συλλέγονται δείγματα σε δοχείο τύπου PET, το οποίο κατασκευάζεται για την αποθήκευση αεριούχων αναφυκτικών. Στους πιο πάνω πίνακες εμφανίζονται τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων από 6 σημεία όπου ακολουθήθηκε αυτή η

διαδικασία. Ακόμη παρουσιάζεται η διαφορά χρόνου ανάμεσα στην μέτρηση του δείγματος και την δειγματοληψία αυτού και ο νομός που συλλέχθηκε το δείγμα.

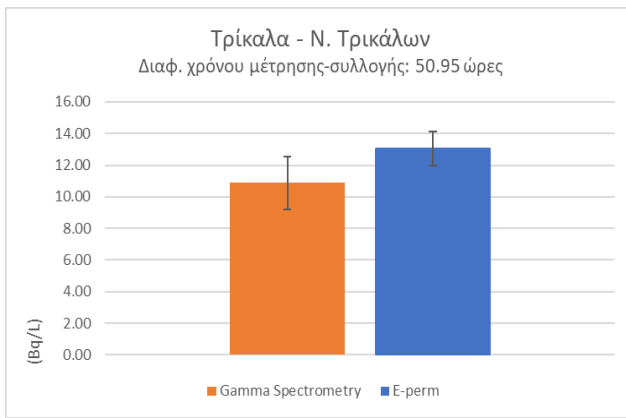
4.1.4) Συγκέντρωσης Rn-222 με διαφορετικές μεθόδους μέτρησης



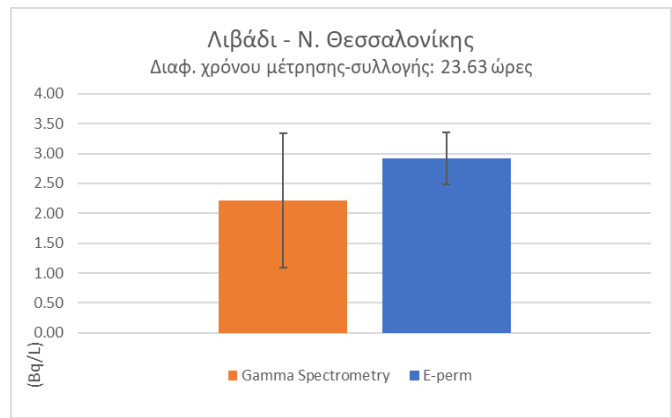
Πίνακας 4.16



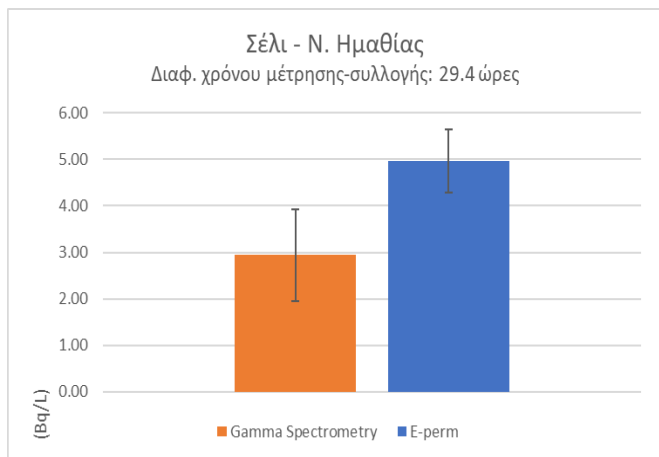
Πίνακας 4.17



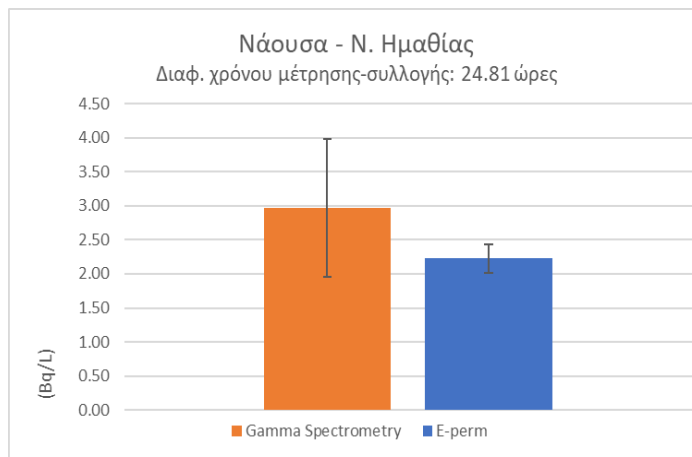
Πίνακας 4.18



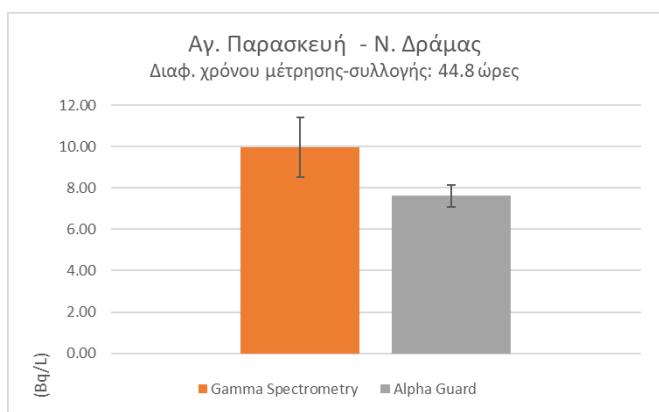
Πίνακας 4.19



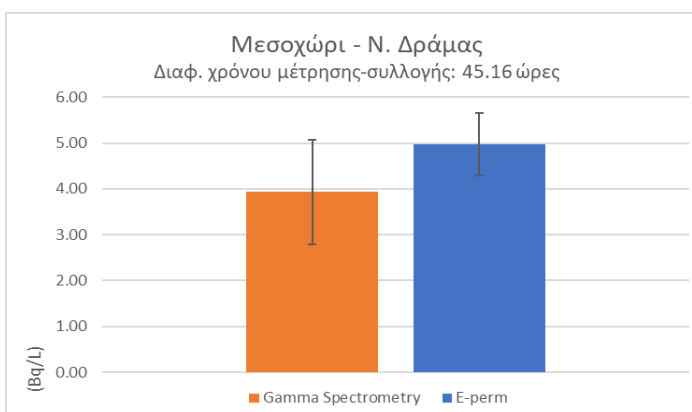
Πίνακας 4.22



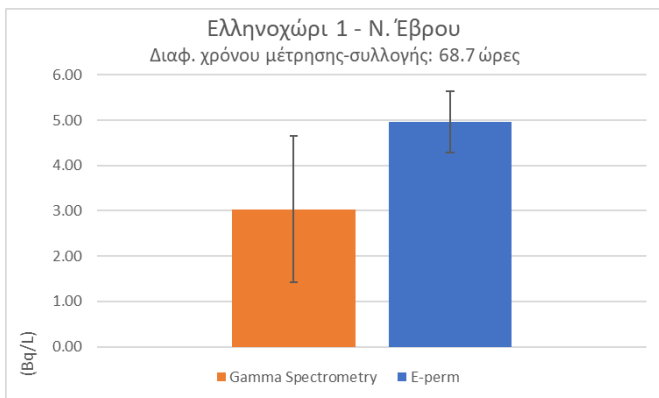
Πίνακας 4.23



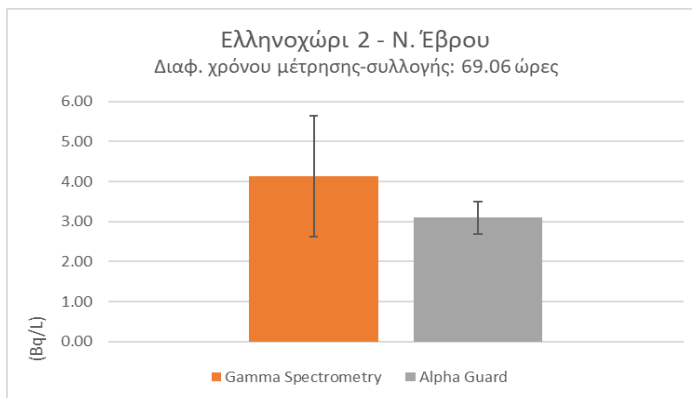
Πίνακας 4.24



Πίνακας 4.25



Πίνακας 4.26



Πίνακας 4.27

Στους πιο πάνω πίνακες παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα από των συγκεντρώσεων Rn-222 με την μέτρηση των ίδιων δειγμάτων με διαφορετικές μεθόδους μέτρησης. Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά σε 12 δείγματα τα οποία μετρήθηκαν με τις μεθόδους της γ-φασματοσκοπίας, IEC και μέσω του AlphaGuard. Όπως φαίνεται και στους πιο πάνω πίνακες τα αποτελέσματα με πορτοκαλί χρώμα αντιστοιχούν στις συγκεντρώσεις Rn-222 που μετρήθηκαν μέσω του ανιχνευτή γ-φασματοσκοπίας, τα αποτελέσματα με μπλε χρώμα αντιστοιχούν τις μετρήσεις που έγιναν μέσω του IEC και τα αποτελέσματα με γκρι χρώμα απεικονίζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν μέσω του AlphaGuard. Όλα τα



δείγματα μετρήθηκαν μέσω της γ φασματοσκοπίας και γίνεται σύγκριση του αποτελέσματος με μία άλλη από τις δύο μεθόδους.

Τέλος παρατίθενται οι ακριβείς συντεταγμένες των σημείων δειγματοληψίας νερού, ο νομός στον οποίο ανήκει το σημείο δειγματοληψίας, το υψόμετρο και το υφιστάμενο πέτρωμα για το κάθε σημείο.

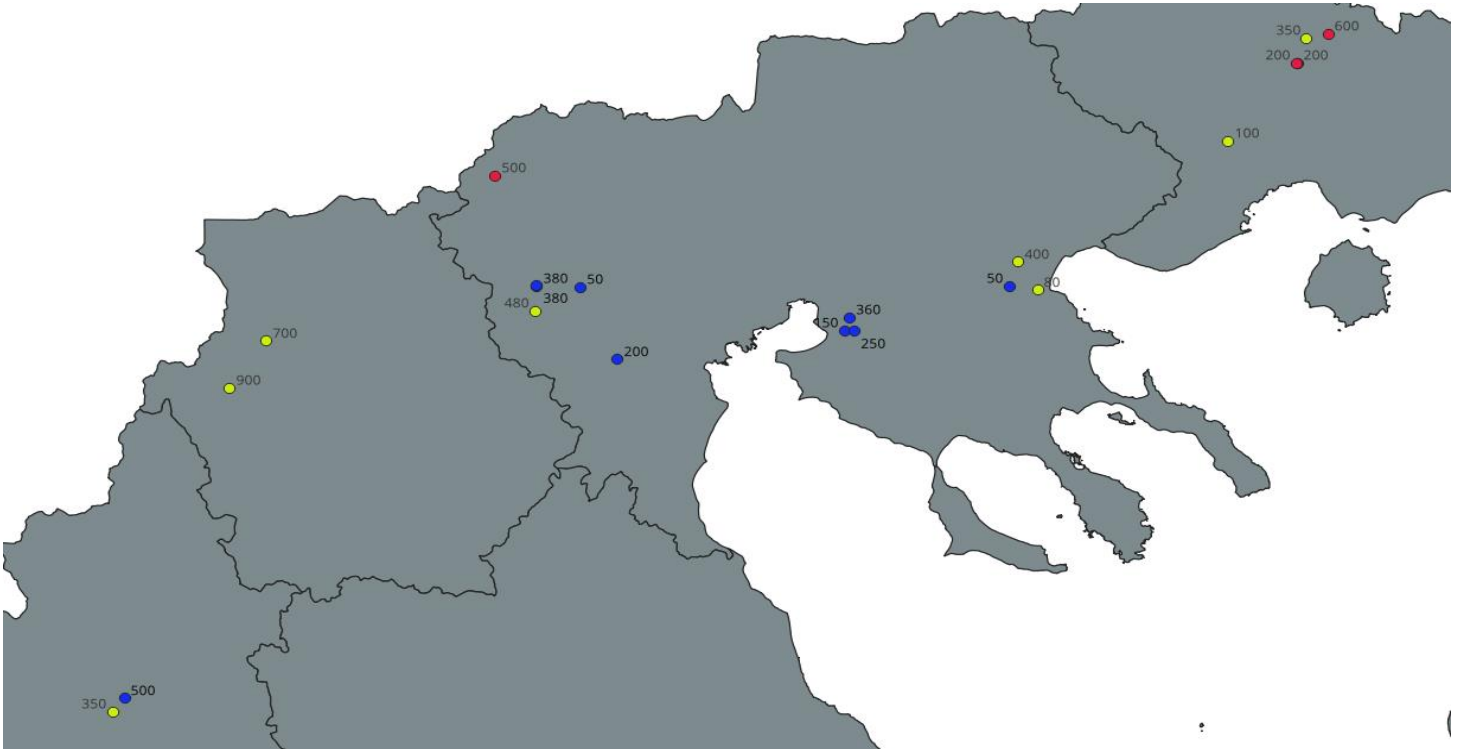
Σημείο δειγματοληψίας	Νομός	Γεωγραφικό ύψος	Γεωγραφικό μήκος	Υψόμετρο	Υφιστάμενο Πέτρωμα
Νεστόριο	Καστορίας	40°25'5.36"N	21° 3'25.06"E	945	Τριτογενείς αποθέσεις
Δωδώνη	Ιωαννίνων	39°33'47.04"N	20°43'12.60"E	500	Μικτός φλσσχης
Νάματα 1	Κοζάνης	40°25'2.03"N	21°31'12.32"E	1120	Σχιστολίθοι
Νάματα 2	Κοζάνης	40°24'48.52"N	21°31'6.09"E	1120	Σχιστολίθοι
Νάματα 3	Κοζάνης	40°25'4.74"N	21°31'22.13"E	1120	Σχιστολίθοι
Αρναία	Χαλκιδικής	40°29'9.53"N	23°35'11.27"E	600	Γρανίτης
Τρίκαλα	Τρικάλων	39°33'17.95"N	21°46'9.40"E	360	Αλλούβια
Ραιδεστός	Θεσσαλονίκης	40°30'47.20"N	23° 2'20.13"E	100	Τριτογενείς αποθέσεις
Ασβεστοχώρι	Θεσσαλονίκης	40°38'31.79"N	23° 3'4.23"E	600	Σχιστολίθοι
Χορτιάτης	Θεσσαλονίκης	40°36'15.07"N	23° 6'2.48"E	660	Σχιστολίθοι
Τριάδι	Θεσσαλονίκης	40°33'9.19"N	23° 4'43.83"E	360	Τριτογενείς αποθέσεις
Λιβάδι	Θεσσαλονίκης	40°30'47.53"N	23°12'53.70"E	760	Σχιστολίθοι
Μακροκοπάνια	Θεσσαλονίκης	40°30'28.25"N	23°15'28.17"E	760	Σχιστολίθοι
Πετροκέρασα	Θεσσαλονίκης	40°31'10.08"N	23°16'30.89"E	580	Σχιστολίθοι
Βεργίνα	Ημαθίας	40°28'54.42"N	22°18'26.60"E	140	Τριτογενείς αποθέσεις
Σέλι	Ημαθίας	40°32'56.30"N	22° 1'40.83"E	1420	Σκληροί ασβεστόλιθοι
Νάουσα	Ημαθίας	40°37'38.04"N	22° 3'46.15"E	360	Τριτογενείς αποθέσεις
Κουμαριά	Ημαθίας	40°31'10.53"N	22° 5'21.64"E	880	Σκληροί ασβεστόλιθοι
Αγ. Νικόλαος	Ημαθίας	40°36'34.74"N	22° 2'34.27"E	360	Τριτογενείς αποθέσεις
Γιαννακοχώρι 1	Ημαθίας	40°38'20.75"N	22° 3'19.54"E	280	Τριτογενείς αποθέσεις
Γιαννακοχώρι 2	Ημαθίας	40°40'26.18"N	22° 3'8.57"E	420	Τριτογενείς αποθέσεις
Αγ. Παρασκευή	Δράμας	41°15'17.02"N	24°27'11.47"E	300	Αλλούβια
Μεσοχώρι	Δράμας	41°15'51.06"N	24°28'55.67"E	300	Αλλούβια
Αρκουδόρεμα	Δράμας	41°20'43.94"N	24°34'22.29"E	400	Γρανίτης
Σίλη 1	Δράμας	41°21'46.07"N	24°33'4.31"E	560	Γρανίτης
Σίλη 2	Δράμας	41°22'11.50"N	24°32'55.34"E	600	Γρανίτης
Κεφαλάρι	Δράμας	41° 3'43.75"N	24°15'57.89"E	100	Σκληροί ασβεστόλιθοι
Ελληνοχώρι 1	Έβρου	41° 24'10.5"N	26°29'14.6"E	80	Τριτογενείς αποθέσεις
Ελληνοχώρι 2	Έβρου	41°24'25.45"N	26°27'33.64"E	80	Τριτογενείς αποθέσεις
Ασκός	Θεσσαλονίκης	40°45'3.88"N	23°23'13.86"E	420	Τριτογενείς αποθέσεις
Σοχός	Θεσσαλονίκης	40°48'51.08"N	23°20'44.79"E	600	Τριτογενείς αποθέσεις
Αυγή	Θεσσαλονίκης	40°48'51.54"N	23°18'45.98"E	640	Τριτογενείς αποθέσεις
Βαγιοχώρι	Θεσσαλονίκης	40°42'43.93"N	23°22'54.31"E	620	Τριτογενείς αποθέσεις
Λαγκαδάς Λουτρά	Θεσσαλονίκης	40°44'2.04"N	23° 5'6.25"E	70	Αλλούβια
Λοφίσκος	Θεσσαλονίκης	40°46'27.78"N	23°13'21.35"E	440	Γρανίτης
Αρετή	Θεσσαλονίκης	40°45'28.46"N	23°15'13.55"E	420	Γρανίτης
Άρτα Ραμίας	Άρτας	39°23'33.15"N	21° 4'19.50"E	620	Μικτός φλσσχης
Άρτα Γερόβρυση	Άρτας	39°24'12.83"N	21° 5'53.89"E	780	Μικτός φλσσχης
Άρτα Κακολάγαδο	Άρτας	39°20'34.86"N	21° 0'24.26"E	720	Μικτός φλσσχης
Βέροια	Ημαθίας	40°29'9.22"N	22°15'29.11"E	40	Περιδοτίτες - γάβροι
Αγ. Μαρίνα	Θεσσαλονίκης	40°39'8.91"N	23°36'32.91"E	40	Τριτογενείς αποθέσεις
Αγ. Θεόδωροι	Ημαθίας	40°37'11.92"N	22° 4'21.33"E	340	Σχιστολίθοι
Ολυμπιάδα	Χαλκιδικής	40°39'9.84"N	23°44'26.46"E	40	Γνεύσιοι
Βρασνά	Θεσσαλονίκης	40°41'38.36"N	23°40'13.52"E	60	Κώνιοι αποθέσεων

Σοχός Ποτίστρα	Θεσσαλονίκης	40°48'20.12"N	23°24'33.57"E	520	Γρανίτης
Στεφανινά Κέντρο	Θεσσαλονίκης	40°45'39.61"N	23°35'20.35"E	500	Κώνοι αποθέσεων
Στεφανινά Ρυάκι	Θεσσαλονίκης	40°45'44.81"N	23°35'35.92"E	520	Κώνοι αποθέσεων
Σκεπαστό	Θεσσαλονίκης	40°48'55.19"N	23°30'59.56"E	450	Τριτογενείς αποθέσεις
Αρεθούσα Ρυάκι	Θεσσαλονίκης	40°44'29.33"N	23°35'38.52"E	380	Περιδοτίτες - γάβροι
Αρεθούσα Κέντρο	Θεσσαλονίκης	40°44'24.37"N	23°35'33.16"E	380	Τριτογενείς αποθέσεις
Μικροκόμη	Θεσσαλονίκης	40° 43' 20.56"N	23° 17' 4.47"E	280	Γνεύσιοι
Νυμφόπετρα	Θεσσαλονίκης	40° 41' 34.25"N	23° 19' 55.08"E	60	Τριτογενείς αποθέσεις
Νέα Καλίνδουα	Θεσσαλονίκης	40° 33' 17.97"N	23° 22' 20.1"E	180	Σχιστολίθοι
Οσσα	Θεσσαλονίκης	40° 50' 11.25"N	23° 12' 16.31"E	620	Γνεύσιοι
Αρναία	Χαλκιδικής	40° 29' 22.49"N	23° 36' 6.49"E	640	Γρανίτης
Αρναία	Χαλκιδικής	40° 29' 26.181"N	23° 34' 48.56"E	580	Γρανίτης
Αρναία	Χαλκιδικής	40° 29' 12.11"N	23° 35' 36.59"E	600	Τριτογενείς αποθέσεις
Μυρτόφυτο	Καβάλα	40° 49' 23.74"N	24° 11' 40.56"E	330	Γρανίτης
Νέος Ζύγος	Ξάνθη	41° 7' 6.21"N	24° 54' 58.68"E	100	Αλλούβια
Φελώνη	Ξάνθη	41° 5' 52.18"N	24° 55' 20.48"E	50	Αλλούβια

#### 4.2) Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων στα δείγματα χώματος

Όπως έχει αναφερθεί γίνεται λήψη 21 δειγμάτων χώματος προς μελέτη των συγκεντρώσεων φυσικών και τεχνητών ραδιονουκλιδίων σε αυτά. Στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζονται αναλυτικά οι συγκεντρώσεις του κάθε ραδιονουκλιδίου για τα δείγματα αυτά.

##### 4.2.1) Παρουσίαση αποτελεσμάτων συγκέντρωσης Ra-226 στα δείγματα χώματος

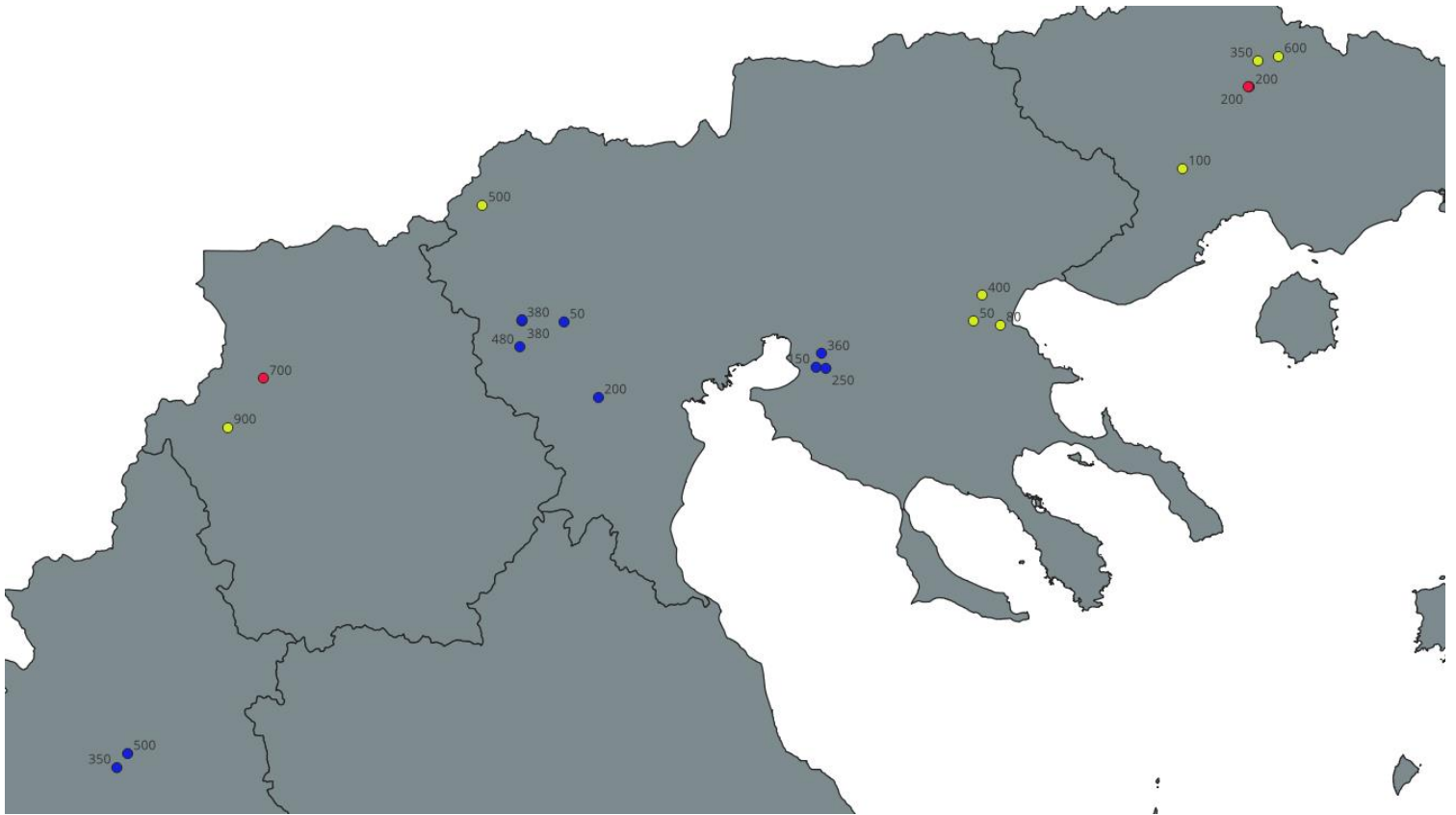


Εικόνα 4.6: Σημεία συλλογής χώματος βαθμονομημένα ανάλογα την συγκέντρωση Ra-226

(Μπλε =  $0 - 20 \frac{Bq}{kg}$ , Κίτρινο =  $20 - 50 \frac{Bq}{kg}$ , Κόκκινο  $> 50 \frac{Bq}{kg}$ )

Στη πιο πάνω εικόνα παρουσιάζονται τα σημεία συλλογής χώματος και γίνεται βαθμονόμηση αυτών ανάλογα με την συγκέντρωση Ra-226 που μετρήθηκε σε αυτά. Πιο συγκεκριμένα, οι συγκεντρώσεις των στιγμάτων με μπλε χρώματα είναι μεταξύ ήταν μικρότερες των  $20 \frac{Bq}{kg}$ . Τα σημεία που παρουσιάζονται με κίτρινο χρώμα έχουν συγκέντρωση μεταξύ των τιμών  $20 - 50 \frac{Bq}{kg}$ . Επίσης τα σημεία με κόκκινο χρώμα εμφανίζουν συγκέντρωση μεγαλύτερη της τιμής των  $50 \frac{Bq}{kg}$ . Επίσης με μαύρο χρώμα αναγράφεται το υψόμετρο από κάθε σημείο δειγματοληψίας.

#### 4.2.2) Παρουσίαση αποτελεσμάτων συγκέντρωσης Th-232 στα δείγματα χώματος

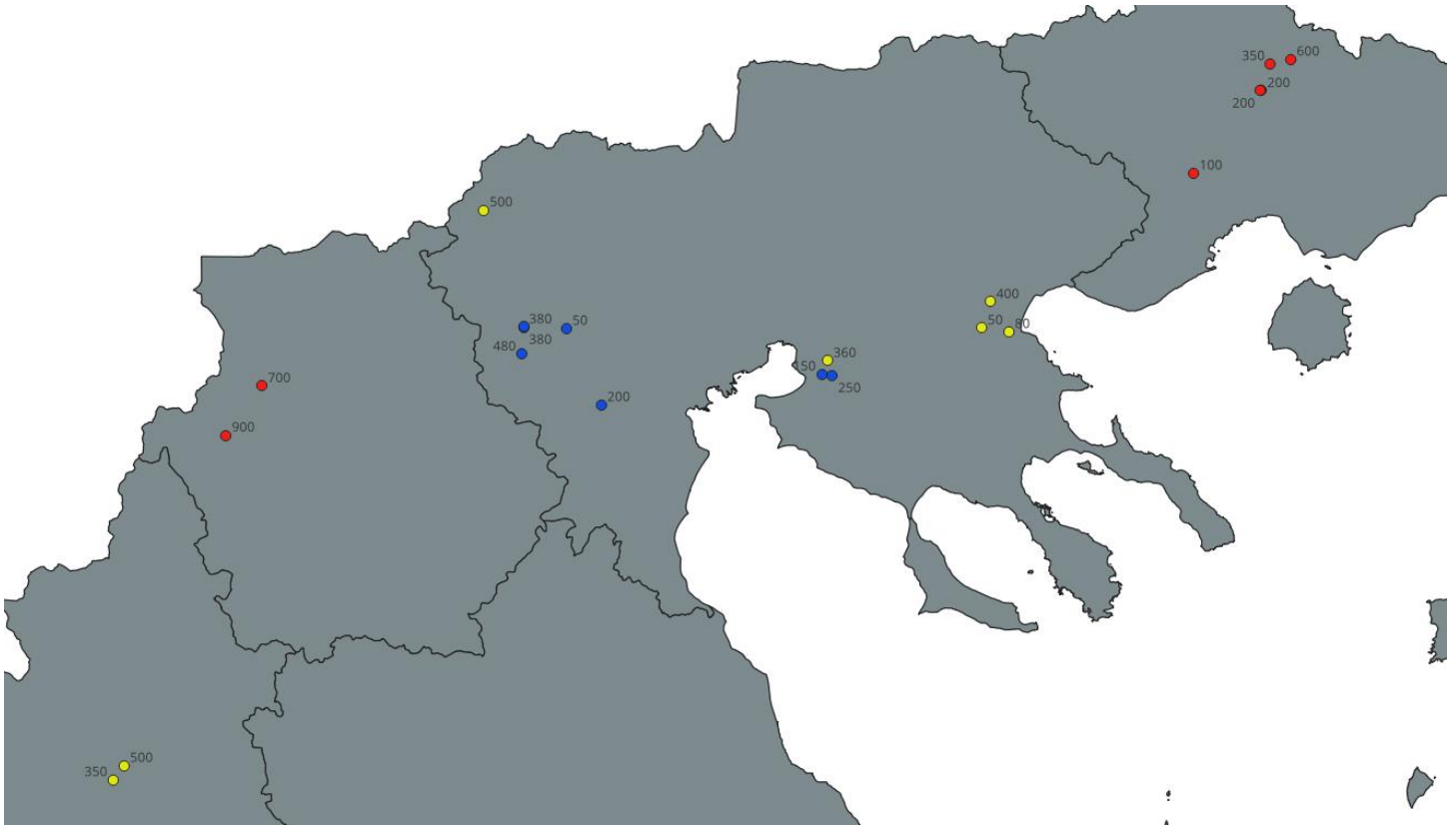


Εικόνα 4.7: Σημεία συλλογής χώματος βαθμονομημένα ανάλογα με την συγκέντρωση Th-232

(Μπλε =  $0 - 20 \frac{Bq}{kg}$ , Κίτρινο =  $20 - 50 \frac{Bq}{kg}$ , Κόκκινο  $> 50 \frac{Bq}{kg}$ )

Στην εικόνα 4.7 παρουσιάζονται τα σημεία συλλογής χώματος και γίνεται βαθμονόμηση αυτών βάση της συγκέντρωσης Th-232 από τα δείγματα που λήφθηκαν από αυτά τα σημεία. Αναλυτικότερα, τα στίγματα με το μπλέ χρώμα παρουσιάζουν τα σημεία όπου οι συγκεντρώσεις για το ραδιονουκλίδιο Th-232 είναι μικρότερες των  $20 \frac{Bq}{kg}$ , τα σημεία με το κίτρινο χρώμα αντιστοιχούν στις συγκεντρώσεις μεταξύ  $20 - 50 \frac{Bq}{kg}$  και τα σημεία με κόκκινο χρώμα απεικονίζουν τις συγκεντρώσεις των δειγμάτων οι οποίες ήταν μεγαλύτερες από  $50 \frac{Bq}{kg}$ . Επίσης με μαύρο χρώμα αναγράφεται το υψόμετρο από κάθε σημείο δειγματοληψίας.

#### 4.2.3) Παρουσίαση αποτελεσμάτων συγκέντρωσης K-40 στα δείγματα χώματος

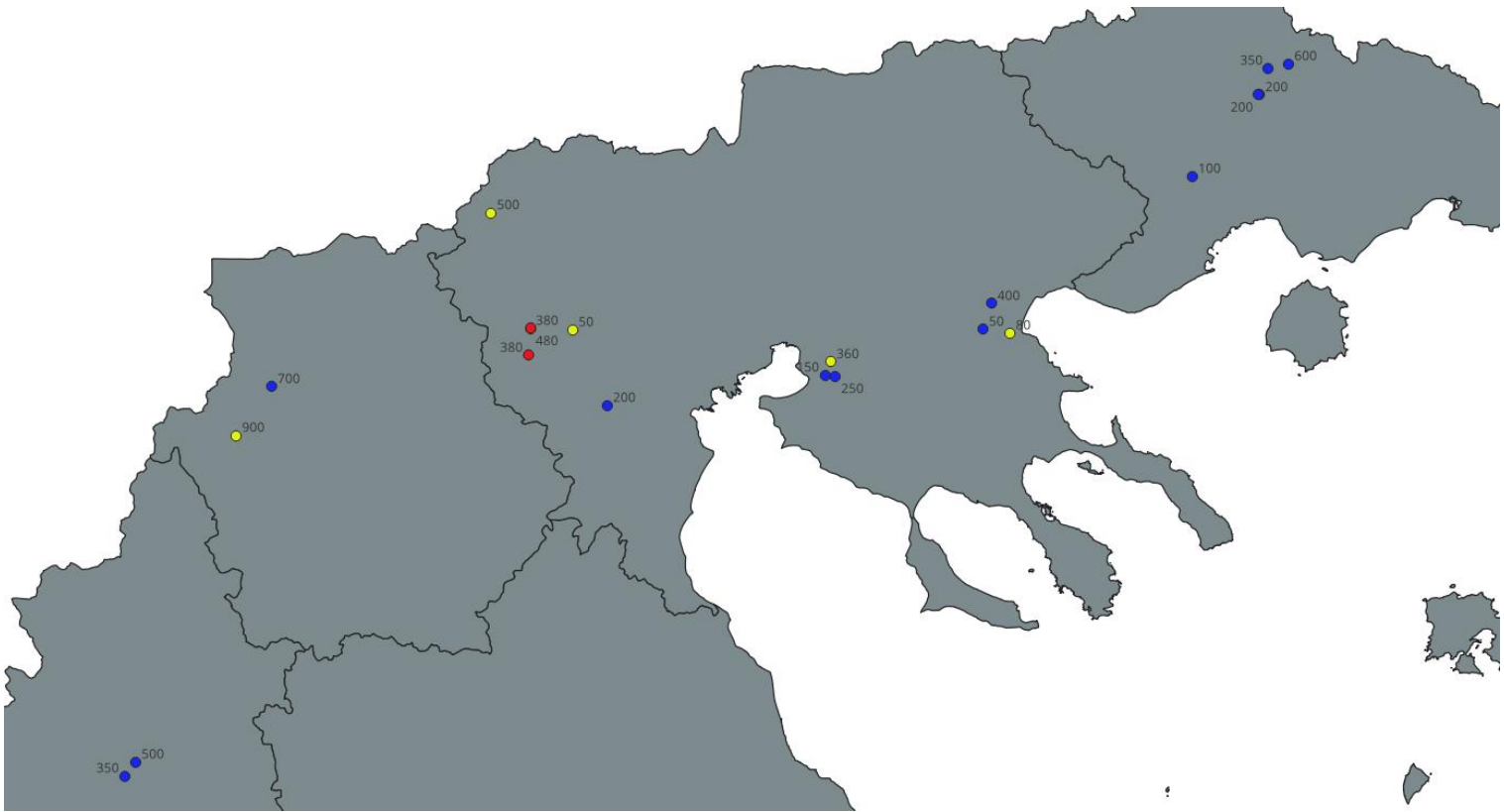


Εικόνα 4.8: Σημεία συλλογής χώματος βαθμονομημένα ανάλογα με την συγκέντρωση K-40

(Μπλε =  $0 - 300 \frac{Bq}{kg}$ , Κίτρινο =  $300 - 600 \frac{Bq}{kg}$ , Κόκκινο  $> 600 \frac{Bq}{kg}$ )

Στην πιο πάνω εικόνα παρουσιάζονται τα σημεία συλλογής χώματος και γίνεται βαθμονόμηση σε αυτά ανάλογα με την συγκέντρωση του K-40. Συγκεκριμένα με μπλέ χρώμα παρουσιάζονται τα δείγματα όπου οι συγκεντρώσεις τους είναι μικρότερες των  $300 \frac{Bq}{kg}$ , με κίτρινο χρώμα παρουσιάζονται τα δείγματα όπου οι συγκεντρώσεις είναι μεταξύ  $300 - 600 \frac{Bq}{kg}$  και με κόκκινο χρώμα είναι τα δείγματα όπου οι συγκεντρώσεις τους ξεπερνούν την τιμή  $600 \frac{Bq}{kg}$ . Επίσης με μαύρο χρώμα αναγράφεται το υψόμετρο από κάθε σημείο δειγματοληψίας.

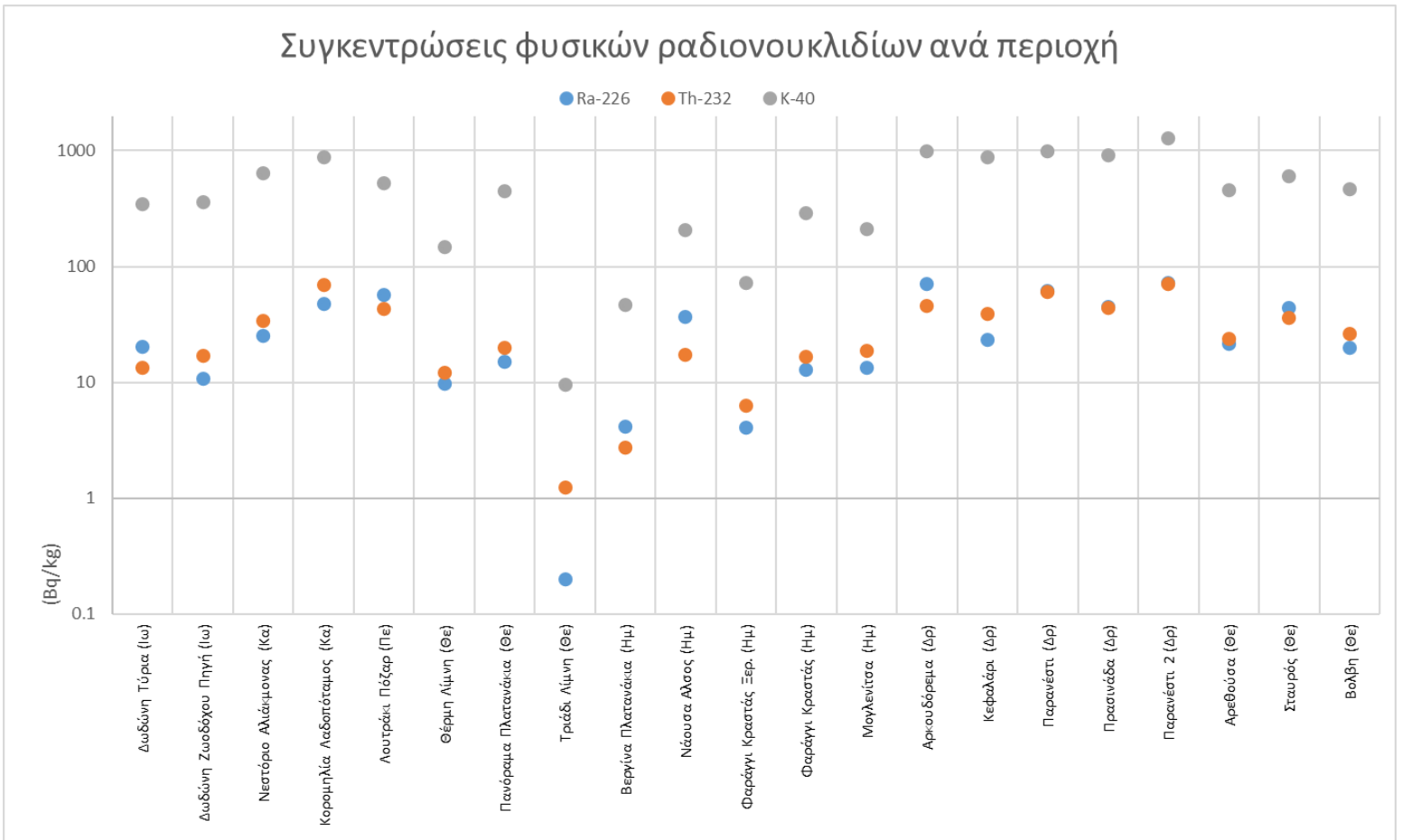
#### 4.2.4) Παρουσίαση αποτελεσμάτων συγκέντρωση Cs-137 στα δείγματα χώματος



Εικόνα 4.9: Σημεία συλλογής χώματος βαθμονομημένα ανάλογα με την συγκέντρωση Cs-137  
(Μπλε =  $0 - 10 \frac{Bq}{kg}$ , Κίτρινο =  $10 - 50 \frac{Bq}{kg}$ , Κόκκινο  $> 50 \frac{Bq}{kg}$ )

Στην εικόνα 4.9 παρουσιάζονται τα σημεία δειγματοληψίας χώματος και γίνεται βαθμονόμηση αυτών ανάλογα με την συγκέντρωση του ραδιονουκλιδίου Cs-137. Αναλυτικότερα, τα σημεία που απεικονίζονται με μπλε χρώμα αντιστοιχούν οι συγκεντρώσεις οι οποίες είναι μικρότερες των  $10 \frac{Bq}{kg}$ , τα σημεία με κίτρινο χρώμα απεικονίζουν τα σημεία δειγματοληψίας με συγκεντρώσεις μεταξύ  $10 - 50 \frac{Bq}{kg}$  και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα σημεία όπου οι συγκεντρώσεις ξεπερνούν την τιμή των  $50 \frac{Bq}{kg}$ . Επίσης με μαύρο χρώμα αναγράφεται το υψόμετρο από κάθε σημείο δειγματοληψίας.

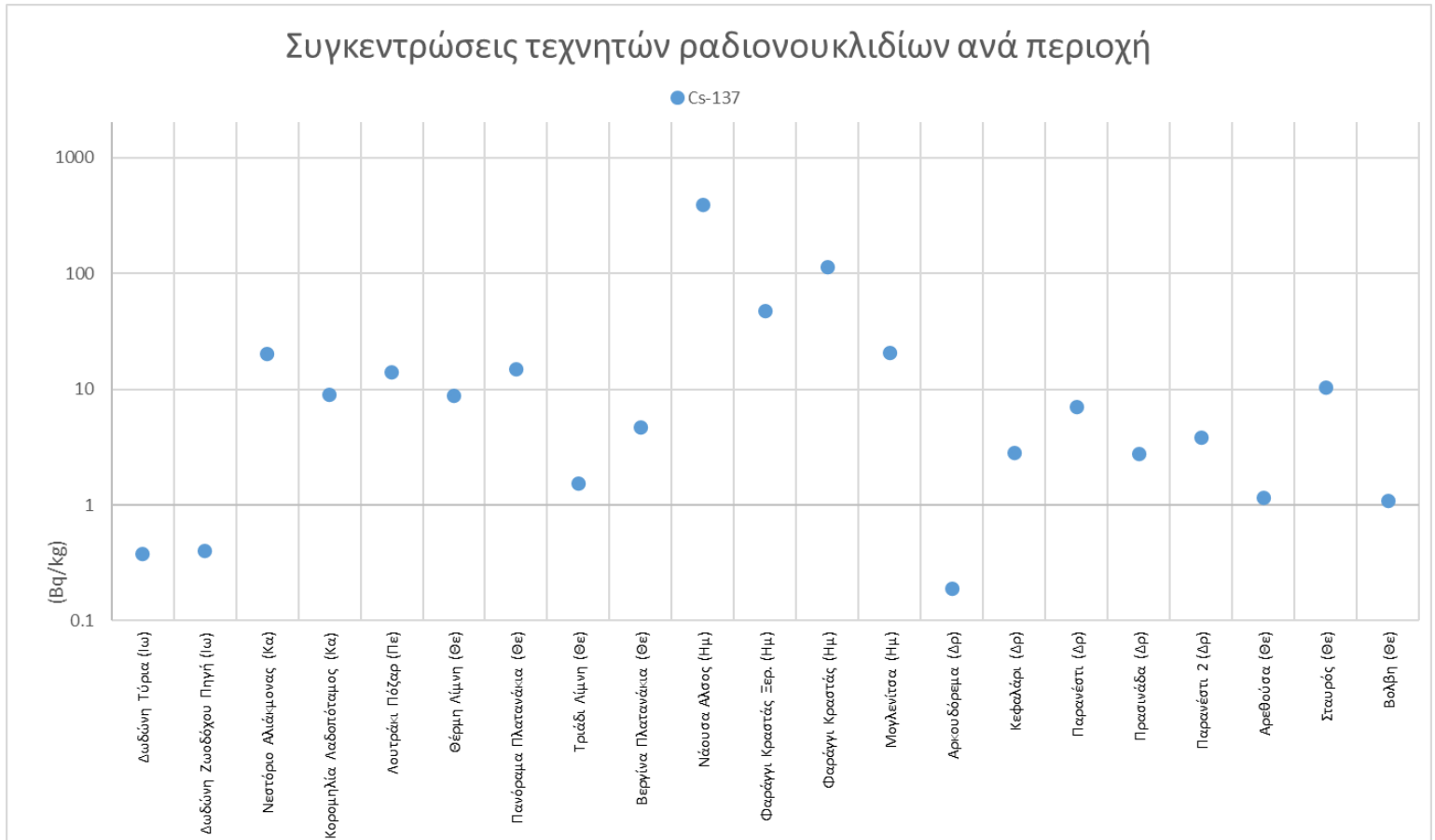
4.2.5) Παρουσίαση αποτελεσμάτων συγκέντρωσης φυσικών ραδιονουκλιδίων στα δείγματα χώματος



Πίνακας 4.28: Παρουσίαση αποτελεσμάτων συγκέντρωσης φυσικών ραδιονουκλιδίων στα δείγματα χώματος

Στον πιο πάνω πίνακα παρουσιάζονται τα ακριβή αποτελέσματα των συγκεντρώσεων των τριών ραδιονουκλιδίων που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Συγκεκριμένα γίνεται απεικόνιση των συγκεντρώσεων του ραδιονουκλιδίου Ra-226 με μπλε χρώμα, του Th-232 με πορτοκαλί χρώμα και του K-40 με γκρι χρώμα.

4.2.6) Παρουσίαση αποτελεσμάτων συγκέντρωσης τεχνητών ραδιοουκλιδίων στα δείγματα χώματος



Πίνακας 4.29: Παρουσίαση αποτελεσμάτων συγκέντρωσης Cs-137 στα δείγματα χώματος

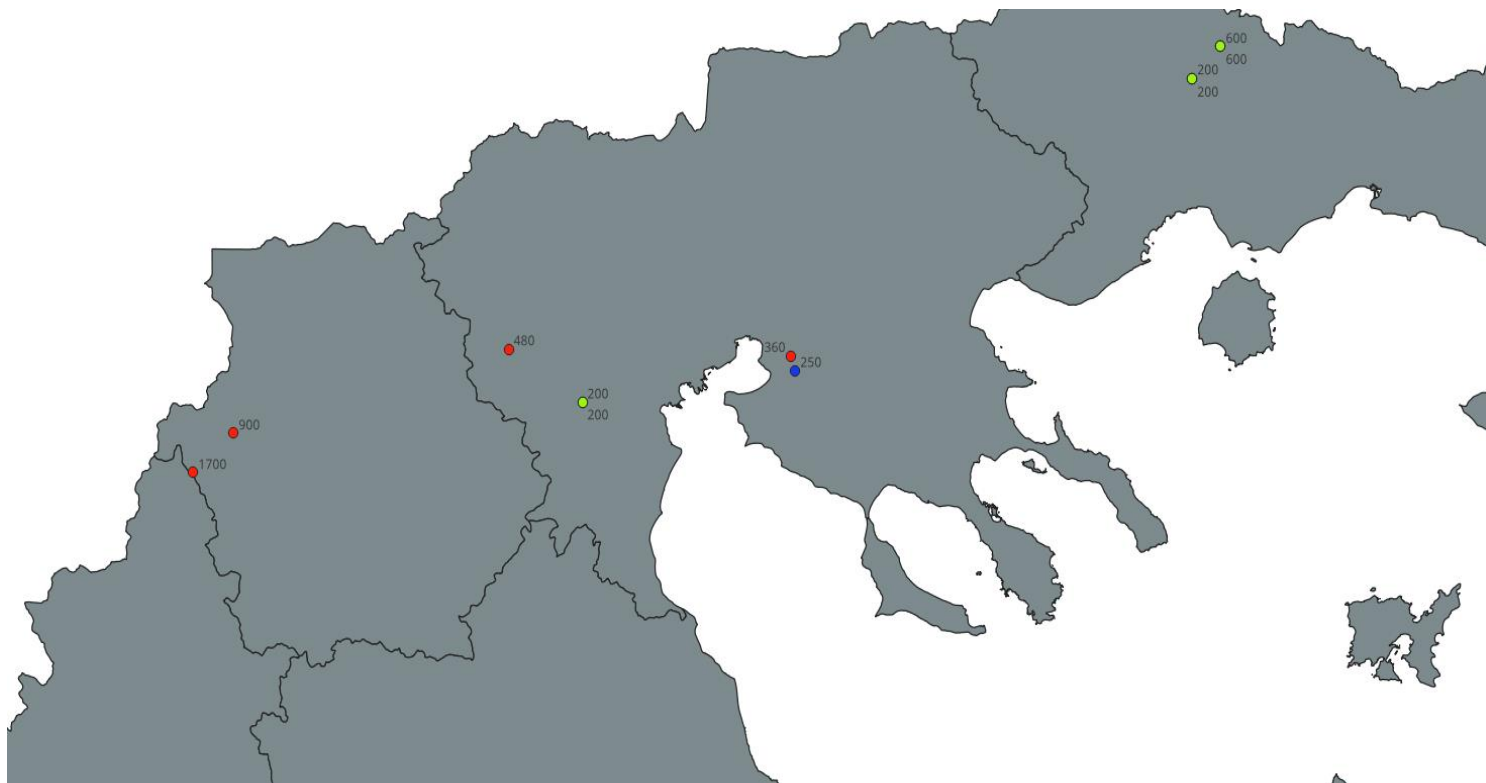
Στο πιο πάνω πίνακα παρουσιάζονται τα ακριβή αποτελέσματα του ραδιοουκλιδίου Cs-137 στα δείγματα χώματος.



Σημείο Δειγματοληψίας	Γεωγραφικό ύψος	Γεωγραφικό μήκος	Υφιστάμενο πέτρωμα
Δωδώνη Τύρια	20°41'25.44"E	20°41'25.44"E	Αλλούβια
Δωδώνη Ζωοδόχου Πηγή	39°34'11.76"N	20°43'43.13"E	Αλλούβια
Νεστόριο Αλιάκμονας	40°24'18.71"N	21° 3'48.11"E	Τριτογενείς Αποθέσεις
Κορομηλιά Λαδοπόταμος	40°31'52.78"N	21°10'59.46"E	Αλλούβια
Λουτράκι Πόζαρ	40°58'11.28"N	21°55'0.92"E	Αλλούβια
Θέρμη Λίμνη	40°33'32.33"N	23° 2'8.01"E	Γάβροι
Πανόραμα Πλατανάκια	40°35'37.95"N	23° 3'13.08"E	Γάβροι
Τριάδι Λίμνη	40°33'26.26"N	23° 4'8.53"E	Γάβροι
Βεργίνα Πλατανάκια	40°28'54.42"N	22°18'26.60"E	Γάβροι
Νάουσα Άλσος	40°36'36.81"N	22° 2'36.83"E	Σκληρίοι Ασβεστόλιθοι
Φαράγγι Κραστάς Ξερ.	40°40'37.92"N	22° 2'55.92"E	Σκληρίοι Ασβεστόλιθοι
Φαράγγι Κραστάς	40°40'42.47"N	22° 2'54.69"E	Σκληρίοι Ασβεστόλιθοι
Μογλενίτσα	40°40'29.91"N	22°11'25.81"E	Τριτογενείς Αποθέσεις
Αρκουδόρεμα	41°20'46.08"N	24°35'15.58"E	Γρανίτης
Κεφαλάρι	41° 3'46.83"N	24°15'58.07"E	Τριτογενείς Αποθέσεις
Παρανέστι	41°16'4.22"N	24°29'19.15"E	Αλλούβια
Πρασινάδα	41°20'1.13"N	24°31'6.34"E	Γρανίτης
Παρανέστι 2	41°16'9.75"N	24°29'10.95"E	Αλλούβια
Αρεθούσα	40°44'29.33"N	23°35'38.52"E	Γαύριοι
Σταυρός	40°40'0.71"N	23°39'19.42"E	Γνεύσιοι
Βόλβη	40°40'34.02"N	23°33'50.14"E	Τριτογενείς Αποθέσεις

#### **4.3) Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων στα δείγματα βρύων**

Στην ακόλουθη ενότητα παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των τεχνητών ραδιονουκλιδίων στα δείγματα βρύων. Συγκεκριμένα γίνεται λήψη 13 δειγμάτων βρύων από 8 διαφορετικά σημεία, όπως παρουσιάζονται στην Εικ. 4.7. Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται κατηγοριοποίηση των συγκεντρώσεων ανάλογα με το ύψος των βρύων από το επίπεδο του εδάφους αλλά και από την ευρύτερη διασπορά των συγκεντρώσεων του Cs-137 στον Ελληνικό χώρο.

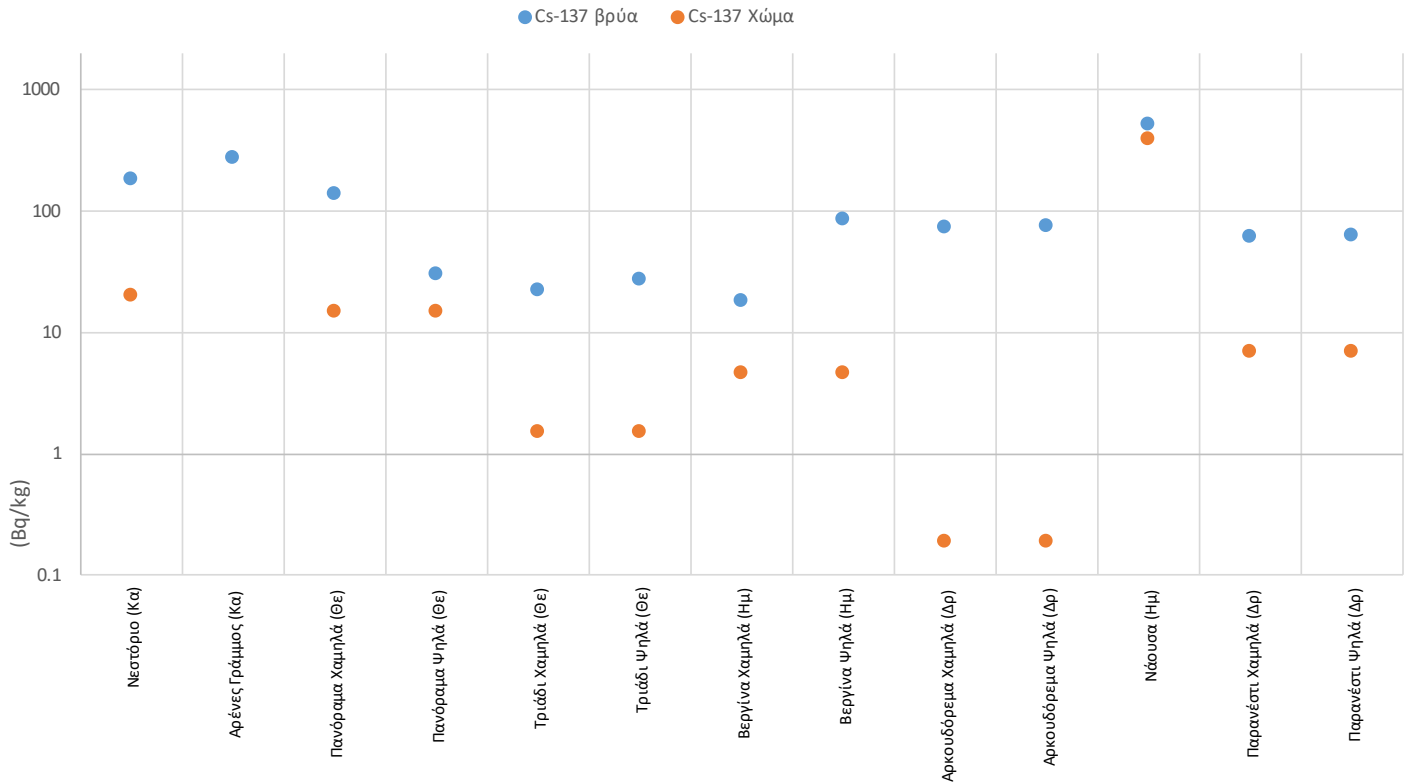


Εικόνα 4.10: Σημεία δειγματοληψίας βρύων για μελέτη τεχνητών ραδιονουκλιδίων

(Μπλε =  $0 - 50 \frac{Bq}{kg}$ , Κίτρινο =  $50 - 100 \frac{Bq}{kg}$ , Κόκκινο  $> 100 \frac{Bq}{kg}$ )

Στην πιο πάνω εικόνα παρουσιάζονται τα ακριβή σημεία δειγματοληψίας των βρύων. Γίνεται κατηγοριοποίηση των σημείων ανάλογα με την συγκέντρωση του Cs-137. Συγκεκριμένα απεικονίζονται με μπλε χρώμα τα σημεία όπου η συγκέντρωση ήταν μεταξύ  $0 - 50 \frac{Bq}{kg}$ , στα σημεία με κίτρινο χρώμα η συγκέντρωση του Cs-137 κυμαίνεται μεταξύ  $50 - 100 \frac{Bq}{kg}$  και τα σημεία με κόκκινο χρώμα η συγκέντρωση του Cs-137 ξεπερνάει τα  $100 \frac{Bq}{kg}$ . Επίσης δίπλα από κάθε σημείο αναγράφεται το υψόμετρο του σημείου δειγματοληψίας από το επίπεδο της θάλασσας.

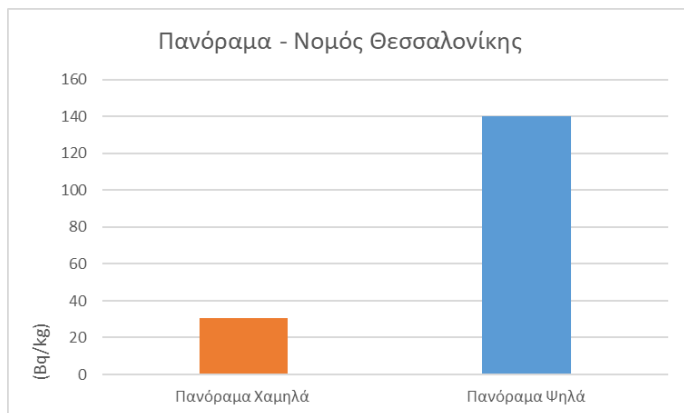
## Συγκεντρώσεις τεχνητών ραδιονουκλιδίων στα δείγματα βρύων



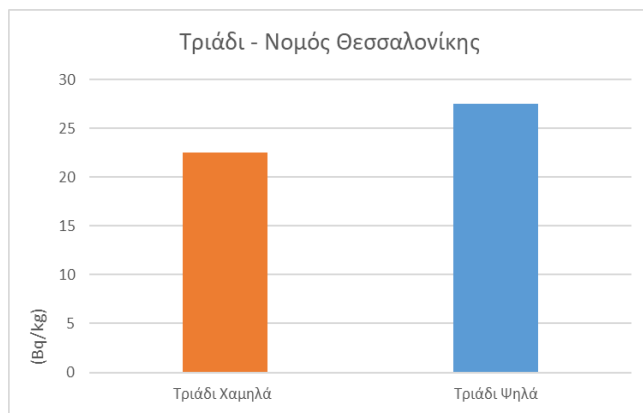
Πίνακας 4.30: Συγκεντρώσεις Cs-137 στα δείγματα βρύων (Μπλε κουκίδες) και σύγκριση με τη συγκέντρωση που μετρήθηκε στο έδαφος της εκάστοτε περιοχής (Πορτοκαλί κουκίδες)

Στον πιο πάνω πίνακα παρουσιάζονται τα ακριβή αποτελέσματα των μετρήσεων για τις συγκεντρώσεις του Cs-137 στα δείγματα των βρύων και γίνεται σύγκριση αυτών με τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων Cs-137 από τα δείγματα χώματος που λήφθηκαν από τα ίδια σημεία.

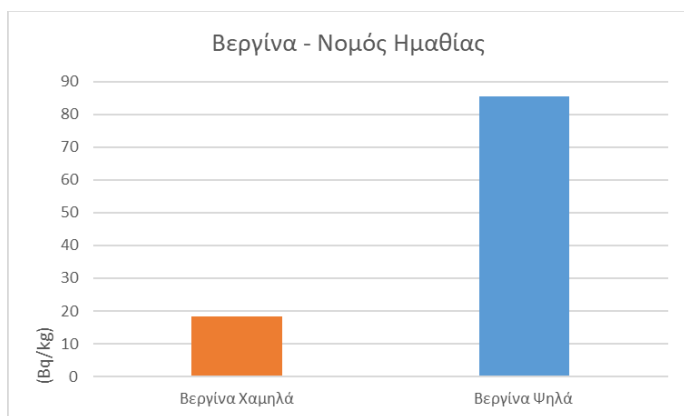
Στην συνέχεια στους πίνακες 4.31 έως 4.35 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των κοινών σημείων δειγματοληψίας βάση του ύψους των δειγμάτων από το έδαφος. Αναλυτικότερα με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων που λήφθηκαν από ύψος μικρότερο του ενός μέτρου από το έδαφος και χαρακτηρίζονται με τον όρο χαμηλά. Αντίθετα με μπλε χρώμα εμφανίζονται οι συγκεντρώσεις των δειγμάτων τα οποία λήφθηκαν από ύψος μεγαλύτερο του ενός μέτρου από το έδαφος και χαρακτηρίζονται με τον όρο ψηλά.



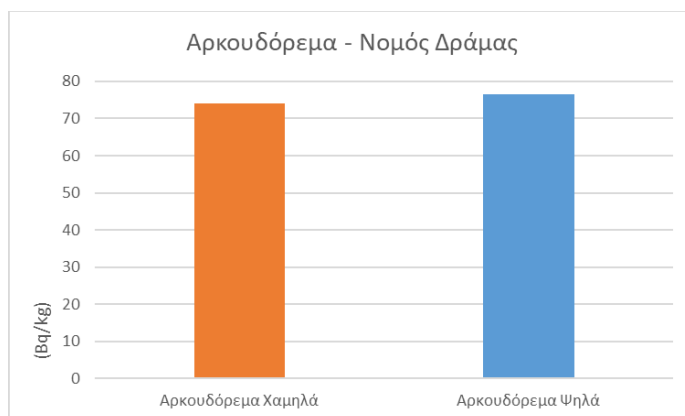
Πίνακας 4.31



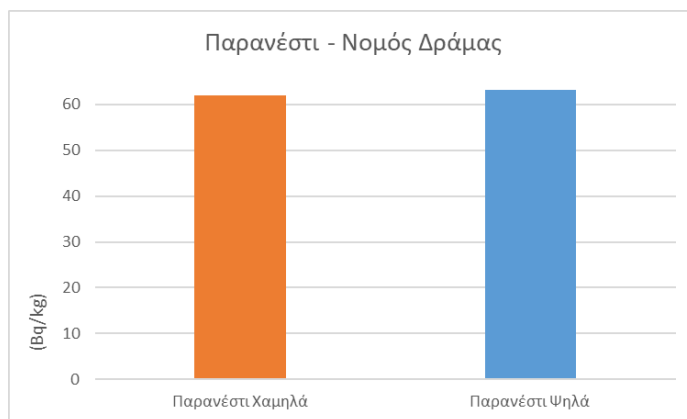
Πίνακας 4.32



Πίνακας 4.33



Πίνακας 4.34



Πίνακας 4.35

## **Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα**

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των συγκεντρώσεων φυσικών και τεχνητών ραδιονουκλιδίων στα γεωλογικά ρήγματα και στα υδάτινα περιβάλλοντα.

### **5.1) Συμπεράσματα του γεωλογικού υποβάθρου βάση των αποτελεσμάτων του Rn-222 στα δείγματα νερού**

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων στα δείγματα νερού γίνεται σύγκριση αυτών με το γεωλογικό υπόβαθρο. Παρατηρείται ότι σε περιοχές όπου υπάρχει πλουτωνικό πέτρωμα και συμπίπτει γεωλογικό ρήγμα, τότε οι συγκεντρώσεις Rn-222 είναι αυξημένες όπως για παράδειγμα τα δείγματα που έχουν ληφθεί από το χωρίο Αρναία της Χαλκιδικής (Μνημείο: 914 Bq/L, Πράσινο Χωρίο: 236 Bq/L και Βενζινάδικο: 198 Bq/L). Σε τέτοιες περιοχές όπου υπάρχει πλουτωνικό πέτρωμα, όσο απομακρύνεται το σημείο δειγματοληψίας από το γεωλογικό ρήγμα τόσο μειώνονται οι συγκεντρώσεις Rn-222. Το συμπέρασμα αυτό φαίνεται ξεκάθαρα από το ρήγμα Καβάλας – Ξάνθης (Κοντινότερη μέτρηση, Νέος Ζυγός: 49,7 Bq/L και απομακρυσμένη μέτρηση, Σίλη 2: 6,47 Bq/L).

Επίσης συμπεραίνεται ότι ανεξάρτητα της απόστασης από ένα γεωλογικό ρήγμα, αν το σημείο δειγματοληψίας βρίσκεται σε μη ουρανιούχο πέτρωμα, τότε η συγκέντρωση του δείγματος σε Rn-222 θα κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, για παράδειγμα τα σημεία που μετρήθηκαν κοντά στο ρήγμα της Πυλαίας (Χορτιάτης: 2,36 Bq/L, Τριάδι: 6,41 Bq/L και Ασβεστοχώρι: 15,59 Bq/L).

Ακόμη παρατηρείται ότι στην περίπτωση όπου το σημείο δειγματοληψίας βρίσκεται εντός ουρανιούχων πετρωμάτων αλλά στην ευρύτερη περιοχή δεν υπάρχει γεωλογικό ρήγμα, τα επίπεδα της συγκέντρωσης Rn-222 θα παραμένουν χαμηλά. Συμπεραίνεται ότι αυτό οφείλεται κυρίως στον τρόπο κίνησης του νερού δια μέσου των πόρων του πετρώματος. Συγκεκριμένα τα πλουτωνικά πετρώματα που δεν είναι κατακερματισμένα δεν επιτρέπουν στο νερό να έχει μεγάλη επιφάνεια επαφής με το πέτρωμα με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις Rn-222 να παρουσιάζονται μειωμένες συγκριτικά με περιοχές όπου το πέτρωμα έχει κατακερματιστεί και το νερό περνάει από πολλές διακλαδώσεις μέσα στο πέτρωμα από όπου «αποσπά» ραδόνιο. Παράδειγμα στο τελευταίο συμπέρασμα αποτελεί η Βορειοανατολική Δράμα και συγκεκριμένα η περιοχή του Αρκουδορέματος (18,09 Bq/L) και Σίλη (4,83 Bq/L).

Συνοψίζοντας παρατηρούμε ότι μεγαλύτερη επίδραση στην συγκέντρωση του Rn-222 έχει το υφιστάμενο πέτρωμα του σημείου δειγματοληψίας συγκριτικά με τα υφιστάμενα γεωλογικά ρήγματα.

### **5.2) Συμπεράσματα στις μεθόδους μέτρησης των δειγμάτων νερού**

Σύμφωνα με τα συγκριτικά αποτελέσματα των τριών μεθόδων ανίχνευσης του Rn-222 παρατηρούνται τα εξής συμπεράσματα:

- Στις πλείστες περιπτώσεις η μέθοδος μέτρησης μέσω του EIC είναι ακριβέστερη στα αποτελέσματα συγκριτικά με την μέθοδο της γ φασματοσκοπίας. Αυτό οφείλεται στην αρχή λειτουργίας του EIC, όπου απλώς μεταβάλλεται το δυναμικό ενός φορτισμένου δισκίου το οποίο συλλέγει τα ηλεκτρόνια που προκύπτουν από τον ιονισμό που προκαλούν τα α σωματίδια, ενώ η αρχή λειτουργίας της έμμεσης μεθόδου (γ-φασματοσκοπία, με HPGe των θυγατρικών του Rn-222) εμπεριέχει περισσότερους υπολογισμούς και προσεγγίσεις, με αποτέλεσμα το τελικό σφάλμα να εξαρτάται από περισσότερους παράγοντες. Επίσης

υπάρχουν μελέτες οι οποίες αναφέρουν «επικόλληση» των θυγατρικών του Rn-222 στα τοιχώματα του δοχείου που φέρει το δείγμα νερού (Mitev et al., 2012).

- Η μέθοδος μέτρησης μέσω του AlphaGuard είναι ακριβέστερη στα αποτελέσματα της συγκριτικά με την μέθοδο της  $\gamma$  φασματοσκοπίας. Το συμπέρασμα αυτό εξάγεται από τα αποτελέσματα των μετρήσεων αλλά και από την λειτουργία των δύο ανιχνευτών. Λόγω της εξειδικευμένης αρχής λειτουργίας του AlphaGuard και της χρήσης τριών καναλιών μέτρησης του Rn-222 παρέχεται απόρριψη εσφαλμένων θετικών καταγραφών και επομένως υψηλή ακρίβεια κατά την μέτρηση. Επίσης το σύστημα μέτρησης του AlphaGuard αποτελεί ένα κλειστό κύκλωμα αέρα, οπότε παρατηρούνται μειωμένες απώλειες συγκριτικά με την  $\gamma$ -φασματοσκοπία όπου δεν έχουμε ένα αεροστεγώς κλειστό σύστημα.

### **5.3) Συμπεράσματα στις μεθόδους μεταφοράς των δειγμάτων νερού**

Βάση των συγκριτικών αποτελεσμάτων των δειγμάτων νερού που μεταφέρθηκαν με τα αλουμινένια δοχεία και τα δοχεία PET αεριούχων ποτών εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Στις πλείστες περιπτώσεις η συγκέντρωση Rn-222 στα δείγματα που μεταφέρθηκαν με δοχεία PET κατάλληλα για αεριούχα αναψυκτικά, ήταν μεγαλύτερη συγκριτικά με τα δείγματα που μεταφέρθηκαν με τα αλουμινένια δοχεία (π.χ. Αρκουδόρεμα: Αλουμινένιο: 18,09 Bq/L, PET: 21,63Bq/L και Σοχός: Αλουμινένιο: 32,42 Bq/L, PET: 32,82Bq/L). Αυτό οφείλεται στην κατασκευή των δοχείων PET τα οποία είναι ικανά να συγκρατούν να συγκρατούν τα ανθρακούχα αέρια.
- Επίσης παρατηρείται βάση των αποτελεσμάτων ότι στις χαμηλές συγκεντρώσεις Rn-222 στα δείγματα νερού, τα δοχεία PET είναι αποτελεσματικότερα. Όσο αυξάνεται η συγκέντρωση Rn-222 η αποτελεσματικότητα της συγκράτησης φαίνεται να ισοσταθμίζεται και στους δύο τύπους δοχείων (Αυγή: Αλουμινένιο: 95,88Bq/L, PET:91,5Bq/L).

### **5.4) Συμπεράσματα κατανομής των φυσικών ραδιοϊσοτόπων στα υδάτινα περιβάλλοντα από τα δείγματα χώματος**

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων των φυσικών ραδιονουκλιδίων στα δείγματα χώματος παρατηρούνται τα εξής:

- Όπως ήταν αναμενόμενο παρατηρείται σύγκλιση ανάμεσα στις συγκεντρώσεις του Ra-226 και του Th-232, για παράδειγμα τα δείγματα με υψηλή συγκέντρωση Ra-226 έχουν και υψηλή συγκέντρωση Th-232. Από την βιβλιογραφία προκύπτει ότι: (α) Η συγκέντρωση Th-232 είναι περίπου 4 – 5 φορές μεγαλύτερη από αυτή του U-238. (β) Η ειδική ενεργότητα του Th-232 είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του U-238, περίπου 3 φορές. Εν προκειμένω παρατηρείται ομοιόμορφη μεταβολή στις συγκεντρώσεις των δύο ραδιονουκλιδίων μεταξύ των διαφόρων σημείων δειγματοληψίας.
- Ανάλογα με την μεταβολή των συγκεντρώσεων του Ra-226 και Th-232, μεταβάλλεται και η συγκέντρωση του K-40, η οποία είναι υψηλότερη.
- Επίσης παρουσιάζονται αυξημένες συγκεντρώσεις των Ra-226 και Th-232, σε σημεία όπου το υφιστάμενο πέτρωμα είναι ουρανιούχο π.χ. γρανίτης. Για παράδειγμα αυτά τα σημεία είναι στον νομό Δράμας το Παρνεσίτι (Ra-226: 61,5 Bg/Kg και Th-232: 66,04 Bq/Kg), το Αρκουδόρεμα (Ra-226: 71,16 Bg/Kg και Th-232: 45,48 Bq/Kg), στον νομό Καστορίας ο Λαδοπόταμος Κορομηλιάς (Ra-226: 47,32 Bg/Kg και Th-232: 68,78 Bq/Kg) και στον νομό Πέλλας το Λουτράκι (Ra-226: 56,93 Bg/Kg και Th-232: 42,65 Bq/Kg).

### **5.5) Συμπεράσματα κατανομής των τεχνητών ραδιοϊσοτόπων στα υδάτινα περιβάλλοντα από τα δείγματα χώματος**

Όσον αφορά την κατανομή των συγκεντρώσεων του τεχνητού ραδιοϊσοτόπου Cs-137 στα δείγματα χώματος εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Η μεγαλύτερη συγκέντρωση Cs-137 εμφανίζεται στο δείγμα που λήφθηκε από την Νάουσα στον νομό Ημαθίας (Cs-137: 390,72 Bq/Kg). Ακόμη υψηλές συγκεντρώσεις παρουσιάζονται στο φαράγγι Κραστάς, στον νομό Ημαθίας (Cs-137: 112,28 Bq/Kg). Αντίθετα τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων για την Ανατολική Μακεδονία είναι αρκετά χαμηλά. Για παράδειγμα στην περιοχή του Αρκουδορέματος (Cs-137: 0,19 Bq/Kg) και της Πρασινάδας (Cs-137: 2,74 Bq/Kg). Βάση αυτών καταλαβαίνουμε ότι οι υψηλές συγκεντρώσεις του τεχνητού ραδιοϊσοτόπου μπορεί να εναποτέθηκαν στις εν λόγω περιοχές μέσω της βροχής που προέκυψε μετά το ατύχημα του Chernobyl τον Μάιο του 1986, ενώ στις περιοχές με χαμηλές συγκεντρώσεις την συγκεκριμένη περίοδο να μην υπήρξαν βροχοπτώσεις.

### **5.6) Συμπεράσματα κατανομής των τεχνητών ραδιοϊσοτόπων στα υδάτινα περιβάλλοντα από τα δείγματα βρύων**

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων του τεχνητού ραδιοϊσοτόπου Cs-137 στα δείγματα βρύων εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Σε όλες τις μετρήσεις παρουσιάζονται μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Cs-137 στα βρύα συγκριτικά με το χώμα που έχει ληφθεί από το ίδιο σημείο. Για παράδειγμα τα δείγματα που λήφθηκαν από το Νεστόριο Καστοριάς (Χώμα: 20,07 Bq/Kg και Βρύα: 185,55 Bq/Kg). Ο λόγος της αυξημένης συγκέντρωσης είναι η ιδιότητα των βρύων να λειτουργούν σαν φίλτρα και να απορροφούν μεγάλες ποσότητες του Cs-137 από τον αέρα. Οπότε μπορούν να κατακρατήσουν περισσότερο Cs-137 από τα αποθέματα του ίδιου σημείου στο χώμα.
- Όπως και στα δείγματα του χώματος οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Cs-137 παρουσιάζονται στην Νάουσα (513,94 Bq/Kg), στον νομό Ημαθίας. Ακόμη μεγάλες συγκεντρώσεις παρουσιάζονται στο Νεστόριο (185,55 Bq/Kg) και στις Αρένες του Γράμμου (277,07 Bq/Kg) στον νομό Καστοριάς αλλά και στον νομό Θεσσαλονίκης στο Πανόραμα (140,24 Bq/Kg).
- Από τα συγκριτικά διαγράμματα ανάλογα με το ύψος στο δέντρο όπου έχουν φυτρώσει τα βρύα παρατηρούμε ότι η συγκέντρωσή τους σε Cs-137 είναι μεγαλύτερη όταν βρίσκονται σε ύψος μεγαλύτερο του ενός μέτρου από την Γη (ψηλά στον κορμό του δέντρου). Παράδειγμα σε αυτό το συμπέρασμα αποτελούν οι μετρήσεις από το Πανόραμα (Χαμηλά: 30,39 Bq/Kg και Ψηλά: 140,24 Bq/Kg) και από την Βεργίνα (Χαμηλά: 18,21 Bq/Kg και Ψηλά: 85,58 Bq/Kg).

## Βιβλιογραφία

- Betsou Chrysoula. (2020). *Determination of the bioaccumulation of radionuclides and trace elements in mosses using nuclear methods Thessaloniki, May 2020.*
- Di Carlo, C., Lepore, L., Venoso, G., Ampollini, M., Carpentieri, C., Tannino, A., Ragno, E., Magliano, A., D'Amario, C., Remetti, R., & Bochicchio, F. (2019). Radon concentration in self-bottled mineral spring waters as a possible public health issue. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50472-x>
- Elec Inc, R. (1998). *E-PERM® SYSTEM USER'S MANUAL E-PERM® Manual*. [www.radelec.com](http://www.radelec.com)
- Gilmore, Gordon. (2008). *Practical gamma-ray spectrometry*. Wiley.
- Gümüş, A. S. (2023). Determination of radon activity concentrations in some well waters near the Akşehir-Simav fault system and estimation of mean annual effective doses. *Radiation Protection Dosimetry*, 199(5), 471–481. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncad031>
- Howard Matis. (2018). *Guide to the Nuclear Wall Chart*.
- Jobbágy, V., Altitzoglou, T., Malo, P., Tanner, V., & Hult, M. (2017). A brief overview on radon measurements in drinking water. *Journal of Environmental Radioactivity*, 173, 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.09.019>
- Knoll Glenn. (2000). *Radiation Detection and Measurement*.
- Lucchetti, C., De Simone, G., Galli, G., & Tuccimei, P. (2016). Evaluating radon loss from water during storage in standard PET, bio-based PET, and PLA bottles. *Radiation Measurements*, 84, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2015.11.001>
- M. Antonopoulos-Domis, A. Clouvas, S. Xanthos, & D. A. Alifrangis. (1997). *Radiocesium contamination in a submediterranean semi-natural ecosystem following the Chernobyl accident: measurements and models*.
- Mas, J. L., Velázquez, L. M., & Hurtado-Bermúdez, S. J. (2021). Optimization of AlphaGUARD AquaKIT set-up for analysis of radon in water using stainless-steel bottles and its validation through IAEA standard samples. *Radiation Measurements*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2021.106545>
- Mitev, K., Dimitrova, I., Zhivkova, V., Georgiev, S., Gerganov, G., Pressyanov, D., & Boshkova, T. (2012). Measurement of Rn-222 in water by absorption in polycarbonates and liquid scintillation counting. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 677, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.02.042>
- NSCL Michigan State University. (2018). EMdecay. <https://People.Nscl.Msu.Edu/~witek/Classes/PHY802/EMdecay2018b.Pdf>
- Saphymo GmbH. (2010). *User Manual Portable Radon Monitor "AlphaGUARD."*
- U.o.Patras. (n.d.). *Eclass University of Patras*.



- Virk, H. S., & Walia, V. (2001). Helium/radon precursory signals of Chamoli Earthquake, India. In *Radiation Measurements* (Vol. 34). [www.elsevier.com/locate/radmeas](http://www.elsevier.com/locate/radmeas)
- Walter D. (2005). *Modern Nuclear Chemistry*.
- Ανεσιάδου Αικατερίνη. (2014). *Συγκεντρώσεις  $^{210}\text{Pb}$  και  $^{235}\text{U}$  σε δείγματα χώματος από την Αλγερία, Διπλωματική Εργασία.*
- Δ. Μουντράκης. (1985). *Γεωδυναμική και Γεωτεκτονική Εξέλιξη του Αλπικού Συστήματος στον Ελληνικό Χώρο.*
- Δούτσος. (2000). *An exhumation model of the south Peloponnesus, Greece.*
- Ελευθερίου. (2014). *Εκτίμηση και Χωροχρονική Διασπορά Ραδιονουκλιδίων στο Υδάτινο Περιβάλλον, Διδακτορική Διατριβή.*
- Ζερβοπούλου Α. (2010). *Νεοτεκτονικά Ρήγματα της Ευρύτερης Περιοχής της Θεσσαλονίκης σε Σχέση με τα Εδάφη Θεμελίωσης, Διδακτορική Διατριβή.*
- Κλούβας Α. (2020). *Εισαγωγή στις Εφαρμογές της Πυρηνικής Ενέργειας.*
- Μ. Αντωνόπουλος - Ντόμης. (2005). *Εισαγωγή στην Πυρηνική Τεχνολογία.*
- Μέλφος, Χατζηπέτρος, & Βουδούρης. (2018). *Κοιτασματολογία, Τεκτονική και Υδρογεωλογία στην Μάζα της Ροδόπης, Άσκηση Υπαίθρου.*
- Οικονομόπουλος. (2008). *Μελέτη των περιβαλλοντικών συνθηκών εκλύσης του χημικού στοιχείου Rn-222 και η πιθανή συσχέτιση της με σεισμικότητα της περιοχής των Μεγάρων, Μεταπτυχιακή Διατριβή.*
- Ομήρου. (2019). *Μελέτη απόκρισης θαλάμων ιοντισμού electret στη  $\gamma$  – ακτινοβολία και εφαρμογή σε μετρήσεις στο εσωτερικό κτιρίων.*
- Παπαδοπούλου Α. Αργυρίου. (2011). *Φυσική Ραδιενέργεια σε Σχέση με την Ορυκτολογία, Γεωχημεία Ουρανίου και Θορίου Μαγματικών Πετρωμάτων απο τον Ελλαδικό Χώρο: Συμβολή στη Χρήση Φυσικών Δομικών Υλικών, Διδακτορική Διατριβή.*
- Παυλίδης Σπυρίδων, Τσαπανός Θεόδωρος, & Κοραβός Γεώργιος. (2010). *Σεισμοτεκτονική μελέτη.*
- Σπίρος Β. Παυλίδης. (2003). *Γεωλογία των σεισμών.*
- Υπηρεσία Ελέγχου και Επιθεώρησης για Ακτινοβολίες. (n.d.). *Έκθεση του πληθυσμού σε ιονίζουσα ακτινοβολία από το ραδόνιο και άλλες φυσικές πηγές ακτινοβολίας ΥΕΠΚΑ.*
- Χαραλάμπου. (2008). *Γεωστατιστική Απεικόνιση Συγκέντρωσης Ραδονίου στο Εσωτερικό Κατοικιών στην Περιοχή της Πελοποννήσου.*