



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΜΟΝΑΔΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ (ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ-ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑ-
ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ)

TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

SCHOOL OF MINERAL RESOURCES ENGINEERING

Division of Mining Technology – Laboratory of Geology

(Tectonics- Stratigraphy- Environmental Geology)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη κατανομής ραδονίου σε θερμομεταλλικά και μη-ύδατα του Ελληνικού χώρου

Τσόντου Αργυρώ Νούλα

ΑΜ: 2014020006

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Εμμανουήλ Μανούτσογλου

Καθηγητής (επιβλέπων)

Νικόλαος Καλλίθρακας- Κόντος

Καθηγητής

Νικόλαος Σπανουδάκης

Δρ., ΕΔΙΠ

Χανιά, Απρίλιος, 2021

Η έγκριση της παρούσας διπλωματικής εργασίας από το Πολυτεχνείο Κρήτης, δεν σημαίνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Νόμος 5343/1932, άρθρο 202)

Αφιέρωση

Ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος της συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας μου, αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις ειλικρινείς και θερμές ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας. Πρώτα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας καθώς και κοσμήτορα της σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, τον κύριο Μανούτσογλου Εμμανουήλ, τόσο για την εμπιστοσύνη που έδειξε με την ανάθεση του θέματος καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγηση του.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Καλλίθρακα-Κόντο Νικόλαο, Αντιπρύτανη του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Ακόμη από καρδιάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Σπανουδάκη Νικόλαο για την συνεχή παρακολούθηση και υποστήριξη καθώς και για την πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφερε καθ'όλη την διάρκεια της συγγραφής της διπλωματικής εργασίας.

Χωρίς την παραχώρηση των δεδομένων του ΕΑΓΜΕ για ελεύθερη χρήση, δεν θα ήταν δυνατή η επίτευξη αυτής της διπλωματικής, για αυτό τους ευχαριστώ πολύ.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και ορισμένους πολύ αγαπητούς και αξιόλογους ανθρώπους μου, που με την καθημερινή συμπαράσταση, την υπομονή τους και την θετική τους σκέψη, συνέβαλλαν στην εκπλήρωση των στόχων που είχα θέσει.

Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η επεξεργασία και εποπτική προσέγγιση σε ελεύθερα προσβάσιμα βιβλιογραφικά δεδομένα που αφορούν στην συγκέντρωση ραδονίου σε θερμομεταλλικά και μη ύδατα (πηγών και γεωτρήσεων) του Ελλαδικού χώρου. Το ραδόνιο είναι ένα άγευστο, άοσμο, άχρωμο, ραδιενεργές, ευγενές αέριο, το οποίο όταν βρεθεί να έχει υψηλή συγκέντρωση αποτελεί απειλή για την ανθρώπινη υγεία. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, το ραδόνιο αποτελεί την πιο σημαντική αιτία του καρκίνου του πνεύμονα μετά το κάπνισμα. Το ραδόνιο ως αέριο έχει την ικανότητα να διαφεύγει από τα πετρώματα, τα νερά και τα εδάφη με αποτέλεσμα να διαχέεται στην ατμόσφαιρα αλλά και εισέρχεται σε εσωτερικούς χώρους, όπου μπορεί και να συσσωρευτεί. Στην Ελλάδα υπάρχουν περιοχές με υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου, οι οποίες οφείλονται μεταξύ άλλων στην φύση και εν γένει δομή του γεωλογικού υπόβαθρου.

Αν και η εποπτεύουσα αρχή σχετική με τις ιονίζουσες ακτινοβολίες στην Ελλάδα είναι η Εθνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) η οποία είναι *η αρμόδια αρχή για τον έλεγχο, τη ρύθμιση και την εποπτεία του τομέα πυρηνικής ενέργειας, πυρηνικής τεχνολογίας, ραδιολογικής, πυρηνικής ασφάλειας και ακτινοπροστασίας*. Στην Ελλάδα έγιναν μεταξύ των άλλων και συστηματικές έρευνες για την μέτρηση συγκεντρώσεων ραδονίου καθώς και άλλων φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των ιαματικών πηγών και από την Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ε.Α.Γ.Μ.Ε, τέως Ι.Γ.Μ.Ε.) στα πλαίσια χρηματοδοτούμενου προγράμματος («ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ» Γ'ΚΠΣ, ΕΡΓΟ: 7.3.2.3.). Εκτός από την ανωτέρω δράση για την μέτρηση και συστηματική παρακολούθηση της συγκέντρωσης ραδονίου σε ύδατα στο ελληνικό χώρο πραγματοποιήθηκαν και άλλες σχετικές έρευνες κυρίως από ΑΕΙ, μεταξύ αυτών και από την Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στηριζόμενοι στα δημοσιευμένα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών καθώς επίσης στα αποτελέσματα των μετρήσεων και άλλων φυσικοχημικών ιδιοτήτων των υδάτων πηγών που είναι δημοσιευμένα στην έκθεση του τ. Ι.Γ.Μ.Ε έγιναν συσχετίσεις μεταξύ των φυσικοχημικών δεδομένων με το ραδόνιο, καθώς και κατάταξη των πηγών και γεωτρήσεων βάση της συγκέντρωσης ραδονίου σύμφωνα με την Υπουργική Απόφαση 22527/2014 - ΦΕΚ 2997/Β/6-11-2014 [Τροποποίηση της υπ' αριθμ. 16655/22-12-2006 απόφασης Υπουργού Τουριστικής Ανάπτυξης «Διαδικασία αναγνώρισης ιαματικών φυσικών πόρων» (Φ.Ε.Κ. Β'1932)]. Με βάση τα όρια που θεσπίζονται στη

ανωτέρω ΚΥΑ, το 78% των υδάτων των πηγών στην έκθεση του τ. ΙΓΜΕ ανήκουν στην κατηγορία των κανονικών πηγών, δηλαδή μη ραδιενεργών, διότι περιέχουν συγκεντρώσεις ραδονίου $<46.000\text{Bq/m}^3$, το 14% των υδάτων των πηγών ανήκει στην κατηγορία των ασθενών ραδιενεργών πηγών διότι περιέχουν συγκεντρώσεις ραδονίου που κυμαίνονται μεταξύ $46.000\text{-}266.000\text{ Bq/m}^3$, το 4% των πηγών ανήκει αντίστοιχα στην κατηγορία των μετρίως ραδιενεργών πηγών διότι περιέχουν συγκεντρώσεις ραδονίου που κυμαίνονται μεταξύ $266.000\text{-}1.333.000\text{ Bq/m}^3$ και μόλις το 4% των πηγών χαρακτηρίζονται ισχυρά ραδιενεργές επειδή η συγκέντρωση ραδονίου είναι $>1.333.000\text{Bq/m}^3$. Στις γεωτρήσεις εμφανίζεται το 78% να ανήκει στην κατηγορία των κανονικών/μη ραδιενεργών ($<46.000\text{ Bq/m}^3$), 15% στην κατηγορία των ασθενώς ραδιενεργών ($46.000\text{-}266.000\text{ Bq/m}^3$), το 7% στην κατηγορία των μετρίως ραδιενεργών ($266.000\text{-}1.333.000\text{ Bq/m}^3$) ενώ δεν μετρήθηκαν συγκεντρώσεις σε γεωτρήσεις τα ύδατα των οποίων μπορεί να χαρακτηριστούν ισχυρά ραδιενεργά. Για το σύνολο των δειγμάτων που μελετήθηκαν στην εργασία αυτή από το σύνολο των προσβάσιμων σχετικών δεδομένων (για πηγές και γεωτρήσεις) παρατηρείται ότι το 68% ανήκει στην κατηγορία των κανονικών/μη ραδιενεργών ($<46.000\text{ Bq/m}^3$), 20% στην κατηγορία των ασθενώς ραδιενεργών ($46.000\text{-}266.000\text{ Bq/m}^3$), 6% στην κατηγορία των μετρίως ραδιενεργών ($266.000\text{-}1.333.000\text{ Bq/m}^3$) και 6% στην κατηγορία των ισχυρώς ραδιενεργών ($> 1.333.000\text{ Bq/m}^3$). Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ραδονίου σε ύδατα έχουν μετρηθεί στις πηγές Απόλλωνος και Ασκληπιείου Ικαρίας, ενώ μια ασθενώς ραδιενεργή πηγή (του Αγίου Αντωνίου, στην ευρύτερη περιοχή της Σούγιας) έχει καταγραφεί και στην Κρήτη.

(Μελέτη κατανομής ραδονίου σε θερμομεταλλικά και μη-ύδατα του Ελληνικού χώρου)

Abstract

The purpose of this thesis is the processing and supervisory approach of freely accessible bibliographic data concerning the concentration of radon in thermal and non-metallic waters (springs and wells) of Greece. Radon is a tasteless, odorless, colourless, radioactive, noble gas, which when it is found to have a high concentration it poses a threat to human health. According to the World Health Organization, radon is the most important cause of lung cancer after smoking. Radon as a gas has the ability to escape from rocks, waters and soils, thus diffusing into the atmosphere and enters indoors, where it can accumulate. In Greece there are areas with high radon concentrations, which are due to the structure of the geological background.

Although the authority concerning ionizing radiation in Greece is the National Atomic Energy Commission (N.A.E.C), which is the competent authority for *the control, regulation and supervision of the field of nuclear energy, nuclear technology, Radiological, Nuclear Safety and Radiation Protection*. In Greece, systematic research was carried out to measure radon concentrations as well as other physicochemical characteristics of mineral springs and by the Greek Geological and Mining Research Authority (G.G.M.R.A, ex I.G.M.R) under a funded programme ("competitiveness" GPA, project: 7.3.2.3.). In addition to the above action for the measurement and systematic monitoring of radon concentration in waters in Greece, other relevant research was carried out mainly by universities, including the School of Mineral Resources Engineering of the Technical University of Crete. Based on the published results of these measurements as well as the results of measurements and other physicochemical properties of the spring waters published in the report from the I.G.M.R, correlations were made between physicochemical data with radon, as well as classification of springs and wells based on radon concentration according to Ministerial Decision 22527/2014-Government Gazette 2997 / B / 6-11-2014 [Amendment no. 16655/22-12-2006 decision of Minister of Tourism Development "process of recognition of thermal natural resources" (Government Gazette B' 1932)].

On the basis of the limits established in the above JMD, 78% of water in the sources from the report I.G.M.R belong to the category of normal sources, i.e., non-radioactive, because they

contain radon concentrations $< 46.000 \text{ Bq/m}^3$, 14% of the water from springs belong to weakly radioactive category because they contain radon concentrations ranging between $46.000\text{-}266.000 \text{ Bq/m}^3$, 4% of the springs belong, respectively, in the category of moderately radioactive sources because they contain radon concentrations ranging between $266.000\text{-}1.333.000 \text{ Bq/m}^3$, and just 4% of the sources are characterized highly radioactive because the radon concentration is $>1.333.000 \text{ Bq/m}^3$. In wells, 78% appear to belong to the category of normal/non-radioactive ($<46,000 \text{ Bq / m}^3$), 15% belong to the category of weakly radioactive ($46,000\text{-}266,000 \text{ Bq/m}^3$), 7% to the category of moderately radioactive ($266,000\text{-}1.333,000 \text{ Bq/m}^3$) while no concentrations were measured in wells that may be characterized as highly radioactive. For all the samples studied in this thesis, 68% belong to the category of normal/non-radioactive ($<46.000 \text{ Bq/m}^3$), 20% to the category of weakly radioactive ($46.000\text{-}266.000 \text{ Bq/m}^3$), 6% to the category of moderately radioactive ($266.000\text{-}1.333.000 \text{ Bq/m}^3$) and 6% to the category of highly radioactive ($>1.333.000 \text{ Bq/m}^3$). The highest concentrations of radon in water have been measured at the springs of Apollo and Asclepius of Ikaria, while a weak radioactive source (Agios Antonios, in the wider region of Sougia) has been recorded in Crete.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στην Ερευνητική Μονάδα Γεωλογίας, στο τομέα Μεταλλευτικής Τεχνολογίας της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η επεξεργασία και εποπτική προσέγγιση σε ελεύθερα προσβάσιμα βιβλιογραφικά δεδομένα που αφορούν στην συγκέντρωση ραδονίου σε θερμομεταλλικά και μη ύδατα (πηγών και γεωτρήσεων) του Ελλαδικού χώρου. Το ραδόνιο είναι ένα άγευστο, άοσμο, άχρωμο, ραδιενεργές, ευγενές αέριο, το οποίο όταν βρεθεί να έχει υψηλή συγκέντρωση αποτελεί απειλή για την ανθρώπινη υγεία. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, το ραδόνιο αποτελεί την πιο σημαντική αιτία του καρκίνου του πνεύμονα μετά το κάπνισμα. Το ραδόνιο ως αέριο έχει την ικανότητα να διαφεύγει από τα πετρώματα, τα νερά και τα εδάφη με αποτέλεσμα να διαχέεται στην ατμόσφαιρα αλλά και εισέρχεται σε εσωτερικούς χώρους, όπου μπορεί και να συσσωρευτεί. Στην Ελλάδα υπάρχουν περιοχές με υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου, οι οποίες οφείλονται μεταξύ άλλων στην φύση και εν γένει δομή του γεωλογικού υπόβαθρου.

Αν και η εποπτεύουσα αρχή σχετική με τις ιονίζουσες ακτινοβολίες στην Ελλάδα είναι η Εθνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) η οποία είναι η αρμόδια αρχή για τον έλεγχο, τη ρύθμιση και την εποπτεία του τομέα πυρηνικής ενέργειας, πυρηνικής τεχνολογίας, ραδιολογικής, πυρηνικής ασφάλειας και ακτινοπροστασίας. Είναι τεχνολογικός φορέας, έχει χαρακτηριστικά ρυθμιστικής αρχής με μορφή Νομικού Προσώπου Δημοσίου Δικαίου (ΝΠΔΔ) που απολαμβάνει πλήρους διοικητικής και οικονομικής αυτοτέλειας. Υπάγεται στον Υπουργό Παιδείας, Έρευνας και Θρησκευμάτων και εποπτεύεται από αυτόν

Στην Ελλάδα έγιναν μεταξύ των άλλων και έρευνες για την μέτρηση συγκεντρώσεων ραδονίου καθώς και άλλων φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των ιαματικών πηγών και από την Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ε.Α.Γ.Μ.Ε, τέως Ι.Γ.Μ.Ε.). Η μετρήσεις συγκεντρώσεων του ραδονίου έγιναν με την χρήση των οργάνων DURRIDGERAD 7 και SARAD RTM 1668-2. Τα δείγματα συλλέχθηκαν κατά το δεύτερο εξάμηνο του 2005 μέχρι το τέλος του έτους του 2008 και είναι διαθέσιμα στην έκθεση με τίτλο: ΠΕΡΙΟΔΙΚΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΙΑΜΑΤΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΛΛΑΔΑΣ, ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ «ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ» Γ'ΚΠΣ, ΕΡΓΟ: 7.3.2.3 «ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΤΗΣ ΧΩΡΑΣ», ΥΠΟΕΡΓΟ: 7.3.2.3.4. και δημοσιεύτηκαν την επόμενη χρόνια (Αθανασούλης κ.α. 2009).

Εκτός από την ανωτέρω δράση για την μέτρηση και συστηματική παρακολούθηση της συγκέντρωσης ραδονίου σε ύδατα στο ελληνικό χώρο πραγματοποιήθηκαν και άλλες σημαντικές έρευνες. Ένα τμήμα των ερευνών αυτών δημοσιοποίησε τα αποτελέσματα των ερευνών.

Στηριζόμενοι στα δημοσιευμένα και ελεύθερα προσβάσιμα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών καθώς επίσης στα αποτελέσματα των μετρήσεων και άλλων φυσικοχημικών ιδιοτήτων των υδάτων πηγών που είναι δημοσιευμένα στην έκθεση του τ. Ι.Γ.Μ.Ε έγιναν συσχετίσεις μεταξύ των φυσικοχημικών δεδομένων με το ραδόνιο και το ράδιο, καθώς και κατάταξη των πηγών βάσει της συγκέντρωσης ραδονίου σύμφωνα με διεθνή βιβλιογραφία. Τέλος γίνεται η προσπάθεια κατανόησης της κατανομής συγκέντρωσης του ραδονίου στον Ελλαδικό χώρο που εν τέλει επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες.

Η δομή της εργασίας αποτελείται από 4 κεφάλαια: Στο **1^ο κεφάλαιο** εισάγονται βασικοί ορισμοί των ειδών ακτινοβολίας, γίνεται αναφορά για το ραδόνιο και τις βασικές του ιδιότητες, την προέλευση του, την συμβολή του στο νερό καθώς και στον αέρα και οι επιπτώσεις του στην ανθρώπινη υγεία. Στο **2^ο κεφάλαιο** αναλύονται οι τεχνικές μέτρησης της συγκέντρωσης του ραδονίου καθώς και οι κανονισμοί και τα όρια σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο. Στο **3^ο κεφάλαιο** παρατίθενται όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τον Ι.Γ.Μ.Ε, οι τρόποι επεξεργασίας αυτών καθώς και τα ιστογράμματα που προέκυψαν, μαζί με τις κανονικές και λογαριθμικές κατανομές που εξήχθησαν από τους υπολογισμούς. Επιπλέον, παρουσιάζονται γραφήματα που απεικονίζουν τις συσχετίσεις του ραδονίου με τα άλλα δεδομένα. Στο **4^ο κεφάλαιο** παρατίθενται και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας και λαμβάνει χώρα η σύγκριση τους με την διεθνή βιβλιογραφία.

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Κατάλογος Πινάκων	xiv
Κατάλογος Σχημάτων	xiv
Κατάλογος Εικόνων	xvi
Κεφάλαιο 1 ^ο Σχετικά με το ραδόνιο.....	1
1.1 Η ιστορική αναδρομή των ιαματικών λουτρών	1
1.2 Ακτινοβολίες στο περιβάλλον	5
1.2.1 Τα είδη ακτινοβολίας.....	5
1.2.2 Οι εκπεμπόμενες ακτινοβολίες κατά την ραδιενεργή διάσπαση	6
1.2.3 Μονάδες Μέτρησης και ορισμοί ραδιενέργειας	7
1.3 Ραδόνιο.....	9
1.3.1 Βασικά χαρακτηριστικά Ραδονίου.....	9
1.3.2 Ραδόνιο σε εσωτερικούς χώρους	10
1.3.3 Το ραδόνιο και οι επιπτώσεις του στην ανθρώπινη υγεία	11
1.4 Πηγές Ραδονίου	14
1.4.1 Ουράνιο(²³⁸ U).....	14
1.4.2 Ράδιο (²²⁶ Ra).....	14
1.4.3 Σχηματισμός-διαφυγή εκροή ραδονίου	15
1.4.4 Η διαφυγή του ραδονίου από το αρχικό πέτρωμα	16
1.5 Το ραδόνιο στο νερό	17
1.6 Το ραδόνιο στους ωκεανούς	19
Κεφάλαιο 2 ^ο Μέθοδοι μέτρησης ραδονίου.....	21
2.1 Ο σκοπός των μετρήσεων της συγκέντρωσης ραδονίου	21
2.2 Κανονισμοί για το ραδόνιο στο νερό.....	21
2.3 Οι χειρισμοί δειγμάτων και η αποθήκευσή τους, πως επηρεάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων.....	26
2.4 Τεχνικές μέτρησης ραδονίου	27

2.4.1 Φασματομετρία ακτινών-γ.....	28
2.4.2 Εκροή ραδονίου από το δείγμα νερού –(emanometry).....	29
2.4.3 Μέτρηση υγρών σπινθηρισμών - Liquid scintillation counting (LSC)	30
2.5 Συντελεστής αβεβαιότητας και η επαλήθευση των μεθόδων	31
2.6.1 Βαθμονόμηση οργάνων	31
2.6.2 Η βαθμονόμηση στην Φασματομετρία ακτινών-γ.....	31
2.6.3 Η βαθμονόμηση στην εκροή ραδονίου από το νερό –(emanometry)	33
2.6.4 Η βαθμονόμηση στην μετρητή υγρών σπινθηρισμών (LSC)	33
2.7 Συσκευές μέτρησης της συγκέντρωσης του ραδονίου και ραδίου στην Ελλάδα από το I.G.M.E.....	34
2.8 Τα οφέλη του ραδονίου στην ανθρώπινη υγεία.....	36
Κεφάλαιο 3: Συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων	38
3.1 Δεδομένα από την έκθεση του τ. ΙΓΜΕ υδροσημείων που περιέχουν συγκεντρώσεις ραδονίου.....	38
3.2 Δεδομένα από υδροσημεία πηγών	39
3.3 Η ανάλυση των μετρήσεων στις γεωτρήσεις.....	47
3.4 Ανάλυση των μετρήσεων από επίκαιρη βιβλιογραφία	52
Βιβλιογραφία	60
1.4 Διεθνής.....	60

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 : Διεθνής καθοδήγηση ραδονίου και παραμετρικές τιμές στο πόσιμο νερό.....	23
Πίνακας 2.2 : Παραδείγματα συγκεντρώσεων ραδονίου σε διαφορετικές πηγές νερού.....	24
Πίνακας 2.3 : Σύνοψη των τεχνικών χαρακτηριστικών μέτρησης ραδονίου νερού.....	32
Πίνακας 3.1: Τα δείγματα με τις μέγιστες συγκεντρώσεις ραδονίου στην Ελλάδα	39
Πίνακας 3.2 Συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των φυσικοχημικών ιδιοτήτων στα νερά των πηγών.....	45

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 3.1: Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις ελάχιστες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου στις πηγές, σε λογαριθμική κλίμακα (πάνω) και σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 (κάτω). Οι περισσότερες πηγές κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-ιαματικών (39)-ασθενών (9). Οι περισσότερες πηγές έχουν τιμές να κυμαίνονται στο εύρος 1.000-10.000 Bq/m ³ (21).....	41
Σχήμα 3.2: Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις μέγιστες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου στις πηγές, σε λογαριθμική κλίμακα (πάνω) και σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 (κάτω). Οι περισσότερες πηγές κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-ιαματικών (39)-ασθενών (5). Έχουν τιμές να κυμαίνονται στο εύρος 10.000-100.000 Bq/m ³ (21).....	42
Σχήμα 3.3: Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις μέσες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου στις πηγές, σε λογαριθμική κλίμακα (πάνω) και σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 (κάτω). Οι περισσότερες πηγές κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-ιαματικών (39)-ασθενών (7).....	43
Σχήμα 3.4. Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις θερμοκρασίες στις πηγές (πάνω) σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 και (κάτω) είναι γράφημα που δείχνει την ποσοστιαία κατανομή για την κάθε κατηγορία. Οι περισσότερες πηγές κατατάσσονται στην κατηγορία των υπέρθερμων (33)- υπόθερμων (11) με βάση την θερμοκρασία τους.....	44
Σχήμα 3.5. Γραφήματα που απεικονίζουν τα χημικά κατιόντα και την ποσοτική υπεροχή τους στο σύνολο των κατιόντων στα νερά. Παρατηρείται στο (πάνω- αριστερά) και (πάνω- δεξιά)	

ένας μικρός αριθμός πηγών να χαρακτηρίζονται ασβεστούχα-μαγνησιούχα. (Κάτω- δεξιά) παρουσιάζεται πως τα περισσότερα νερά είναι νατριούχα και τέλος κανένα δεν χαρακτηρίζεται καλιούχο.....	46
Σχήμα 3.6: Ιστόγραμμα που απεικονίζει την μεταλλικότητα των πηγών. Οι περισσότερες πηγές (29) είναι αλατούχες και (12) μεσομεταλλικές.....	47
Σχήμα 3.7: Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις ελάχιστες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου στις γεωτρήσεις, σε λογαριθμική κλίμακα (πάνω) και σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 (κάτω). Οι περισσότερες γεωτρήσεις κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-ιαματικών (23)-ασθενών (2).....	48
Σχήμα 3.8: Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις μέγιστες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου στις γεωτρήσεις, σε λογαριθμική κλίμακα (πάνω) και σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 (κάτω). Οι περισσότερες γεωτρήσεις κατατάσσονται στην κατηγορία μη-ιαματικών (17)-ασθενών (8).....	49
Σχήμα 3.9: Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις μέγιστες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου στις γεωτρήσεις, σε λογαριθμική κλίμακα (πάνω) και σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 (κάτω). Οι περισσότερες γεωτρήσεις κατατάσσονται στην κατηγορία των πολύ ασθενών (21)-ασθενών (4).....	50
Σχήμα 3.10. Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις θερμοκρασίες στις γεωτρήσεις (πάνω) σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 και (κάτω) είναι γράφημα που δείχνει την ποσοστιαία κατανομή για την κάθε κατηγορία. Οι περισσότερες πηγές κατατάσσονται στην κατηγορία των Υπέρθερμων (12)- Υπόθερμων (6) με βάση την θερμοκρασία τους.....	51
Σχήμα 3.11: Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις μέσες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου στα δείγματα πηγών, σε λογαριθμική κλίμακα (πάνω) και σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 (κάτω). Οι περισσότερες πηγές κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-ιαματικών (5)-ασθενών (6).....	52
Σχήμα 3.12: Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις μέσες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου στις πηγές, σε λογαριθμική κλίμακα (πάνω) και σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 (κάτω). Οι περισσότερες τιμές δειγμάτων κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-ιαματικών (65) και ασθενών (21).....	54

Σχήμα 3.13: Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις μέσες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου για το σύνολο των γεωτρήσεων, σε λογαριθμική κλίμακα (πάνω) και σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 (κάτω). Οι περισσότερες τιμές δειγμάτων κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-ιαματικών (21)-ασθενών (4)	55
Σχήμα 4.1: Γράφημα που απεικονίζει της % ποσοστά που ανήκει η κάθε πηγή με βάση το ΦΕΚ 2997/6-11-2014. Το 78% των πηγών είναι μη-ιαματικά.....	57
Σχήμα 4.2. Γράφημα που απεικονίζει την ποσοστιαία κατανομή για την γεώτρηση με βάση το ΦΕΚ 2997/6-11-2014. Το 84% των γεωτρήσεων είναι μη-ιαματικές.....	57
Σχήμα 4.3. Γράφημα που απεικονίζει την ποσοστιαία κατανομή για τα 92 δείγματα με βάση το ΦΕΚ 2997/6-11-2014. Το 71% των δειγμάτων είναι μη-ιαματικά.....	58
Σχήμα 4.4. Γράφημα που απεικονίζει την ποσοστιαία κατανομή των πηγών με βάση το ΦΕΚ 2997/6-11-201 ως προς την μεταλλικότητα τους. Το 58% των πηγών ανήκει στα αλατούχα.	59

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1. Μαρμάρινη προτομή του Ιπποκράτη.....	2
Εικόνα 1.2. Αγγελική Παναγιωτοπούλου (1878-1954), η πρώτη γυναίκα που αποφοίτησε από την Ιατρική Σχολή Αθηνών.....	4
Εικόνα 1.3. Είδη ακτινοβολίας και η διεισδυτικότητα τους.....	7
Εικόνα 1.4. Στην αριστερή εικόνα είναι ο Γάλλος επιστήμονας Antoine Henri Becquerel και στην δεξιά εικόνα είναι η φυσικός Maria Curie	8
Εικόνα 1.5. Ραδιενεργή σειρά διάσπασης του ουρανίου (U^{232}), η εκπεμπόμενη ακτινοβολία και οι χρόνοι ημίσειας ζωής του κάθε ραδιονουκλιδίου.....	10

Εικόνα 1.6. Η εισπνοή των βραχύβιων θυγατρικών προϊόντων του ραδονίου και οι επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό.....	13
Εικόνα 1.7. Η διάσπαση ενός ατόμου ραδίου, η παραγωγή σωματιδίου-άλφα, καθώς και το νεοσύστατο άτομο ραδονίου.....	15
Εικόνα 1.8. Η μεταφορά του ραδονίου στα εδάφη σύμφωνα με την διαπερατότητα...	17
Εικόνα 2.1. Το όργανο SARAD RTM 1688-2 που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ραδονίου.....	35

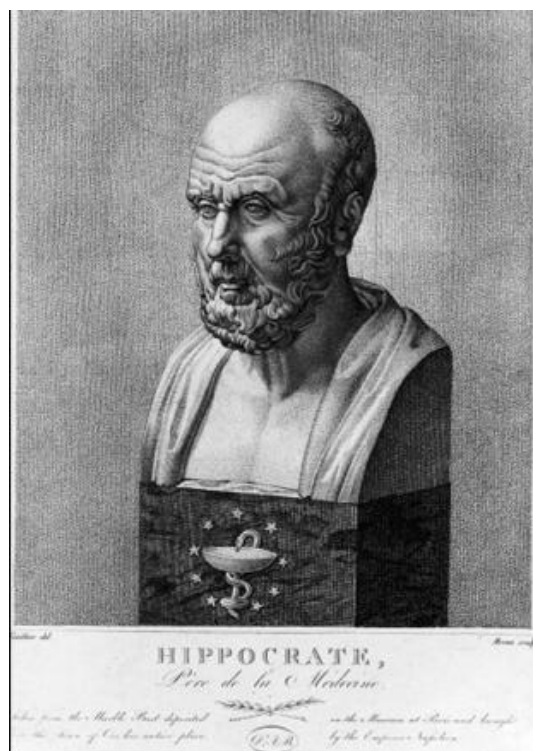
Κεφάλαιο 1^ο Σχετικά με το ραδόνιο

1.1 Η ιστορική αναδρομή των ιαματικών λουτρών

Ανέκαθεν, το νερό αποτελούσε βασικό παράγοντα για την επιβίωση του ανθρώπου. Δεν εκπλήσσει το γεγονός ότι ενδείξεις από πρώιμους πολιτισμούς ευρέθησαν κατά μήκος ποταμών: ο Τίγρης και Ευφράτης στην Μεσοποταμία, ο Νείλος στην Αίγυπτο, ο Ινδός στην Ινδία και ο Χουάνγκ Χε (κίτρινος ποταμός) στην Κίνα. Εκτός από παροχή πόσιμου νερού και χρήση για την ικανοποίηση οικιακών αναγκών, τα θερμά και μεταλλικά νερά έχουν χρησιμοποιηθεί από τους ανθρώπους για μπάνιο και θρησκευτικές τελετουργίες για χιλιάδες χρόνια. Πιο συγκεκριμένα, η λουτροθεραπεία-πρακτική κατά την οποία γίνεται χρήση των φυσικών θερμών και μεταλλικών πηγών νερού για την αντιμετώπιση και θεραπεία παθήσεων έχει επιπλέον μακρά ιστορία. Αρχαιολογικά ευρήματα αναδεικνύουν το γεγονός ότι τα θερμά και μεταλλικά νερά έχουν χρησιμοποιηθεί ως λουτρά από την εποχή του χαλκού (12,000-3,000 π.Χ.). Επιπρόσθετα, οι θερμές πηγές έχουν χρησιμοποιηθεί σε στενή σχέση με θρησκευτικές τελετές τόσο στην αρχαία Αίγυπτο όσο και από τους Εβραίους της Μέσης Ανατολής.

Από τα πρώτα χρόνια, η ανθρωπότητα έχει συσχετίσει τις θερμές και μεταλλικές πηγές με θεϊκές δυνάμεις θεραπείας. Την πρώτη χιλιετία π. Χ., οι Έλληνες πίστευαν σε θεότητες συνυφασμένες με τέτοιες πηγές και στις θεραπευτικές ιδιότητες τους. Οι αρχαίοι έλληνες ανέπτυξαν σχολή φυσιοθεραπείας και λουτροθεραπείας έχοντας βάση τους τα γεωθερμικά ύδατα και τα βότανα (Porowski, 2019, σ.156). Εντούτοις, η απαρχή του θερμαλισμού γεννήθηκε από τους αρχαίους Έλληνες. Λόγω των υπερφυσικών δυνάμεων που αποδόθηκαν στα θερμά νερά και στους ατμούς τους, είναι φυσικό λοιπόν ο πρώτος εκπρόσωπος του θερμαλισμού να αναπτύχθηκε κοντά στους ναούς και στις θερμές πηγές. Στο νησί της Κω, οι θεραπευτικές ιδιότητες των τοπικών θερμών πηγών αποδίδονταν στον Ασκληπιό, τον θεό της ιατρικής και γιο του Απόλλωνα, μάλιστα ένα μεγαλοπρεπές ιερό χτίστηκε προς τιμήν του στο τέλος του 4^{ου} αιώνα π.Χ. (Gianfaldoni, et al., 2017).

Οι αρχαίοι έλληνες είχαν αντιληφθεί τις ευεργετικές ιδιότητες, ιδιαίτερα την θεραπεία δερματικών παθήσεων και την ανακούφιση μυϊκών και αρθρικών πόνων, που προσέφεραν οι πηγές. Στην Ελλάδα ο Ηρόδοτος (484- 410 π. Χ.) ήταν ο πρώτος που παρατήρησε την θεραπευτική επίδραση του νερού στον άνθρωπο. Τον 5ο αιώνα π. Χ., ο Έλληνας ιατρός και φιλόσοφος Αλκμαίος, του Κρότωνα ήταν ο πρώτος που επεσήμανε ότι η ποιότητα του νερού μπορεί να επηρεάσει την ανθρώπινη υγεία. Την ίδια σχεδόν περίοδο Ιπποκράτης (460-377 π. Χ.) ήταν ο πρώτος που ασχολήθηκε με το ζήτημα του νερού, τη χρήση του, τις επιδράσεις του στο ανθρώπινο σώμα και τη συσχέτισή του με ασθένειες. Στο σύγγραμμά του *"περί αέρων, υδάτων και τόπων"*, διέκρινε τα φυσικά νερά σε ελώδη εννοώντας τα νερά που υπάρχουν στα έλη και στις λίμνες, σε όμβρια που σχηματίζονται από τη βροχή και σε εκείνα που αναβλύζουν από πετρώματα, δηλ. τα μεταλλικά (Ρουσσάκος και Φλαμπούρης, 2012). Επιπλέον, ο Ιπποκράτης (εικόνα 1.1) πρότεινε την χρήση κρύου και ζεστού νερού για την θεραπεία παθήσεων όπως την πνευμονία, την πλευρίτιδα, την ηπατίτιδα και δερματικών λοιμώξεων όπως το εμπύημα και ο έρπης (Tsoucalas et al., 2015, σ.2 ; Γκολφή, 2017).



Εικόνα 1.1. Μαρμάρινη προτομή του Ιπποκράτη (Tsoucalas et al., 2015).

Ωστόσο, η αρχαία Ρώμη έγινε η " κοιτίδα των θεραπειών μέσω ιαματικών λουτρών". Στην Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία, τα ιαματικά λουτρά ήταν μια ιεροτελεστία, κυρίως για

χαλάρωση, αναψυχή και ένα αναπόσπαστο κομμάτι της κοινωνικής και πολιτικής ζωής (Tsoucalas et al., 2015, σ.3).

Φημισμένα θεραπευτικά ιαματικά λουτρά, τα οποία λειτουργούσαν τους τελευταίους δυο αιώνες παρέμειναν ιστορικά μνημεία στην Ευρώπη και σε άλλες περιοχές του κόσμου. Σε πολλές χώρες της Ευρώπης (Γερμανία, Αυστρία, Γαλλία, Ιταλία, Ουγγαρία, Βουλγαρία, Πολωνία, Τσεχική Δημοκρατία και άλλες), της Νότιας Αμερικής (Χιλή, Βραζιλία) και της Ασία (Κίνα, Ιαπωνία), κατασκευάστηκαν νέα θεραπευτικά κέντρα. Μεταξύ των παραδοσιακών ιαματικών λουτρών με υψηλή συγκέντρωση ραδονίου, το BadGastein, στην Αυστρία ίσως είναι το πιο γνωστό. Η συγκέντρωση ραδονίου στον αέρα στο κέντρο θεραπείας Gastein είναι κατά μέσο όρο 43 kBq/m^3 (περίπου 1, 2 nCi/L) με μέγιστη τιμή 160 kBq/m^3 (περίπου 4, 3 nCi/L).

Πριν από την ανακάλυψη του ραδόνιου, υπήρξαν πολυάριθμες παρατηρήσεις για την επιβαρυνόμενη υγεία των ανθρακωρύχων στην Κεντρική Ευρώπη. Οι πρώτες προειδοποιήσεις για τον "επικίνδυνο αέρα βαθιά στην γη" τεκμηριώθηκαν τον 15^ο αιώνα και περίπου το 1530, ο διάσημος Ελβετογερμανός Ιατρός Θεόφραστος Παράκελσος (1493-1541), που ασκούσε την πρακτική του σε πόλεις που γινόταν εξορύξεις, έκανε ευρέως γνωστή την λεγόμενη "ασθένεια του βουνού". Ακολούθησαν και μετέπειτα αναφορές. Μόνο μετά την ανακάλυψη της ιονίζουσας ακτινοβολίας και της "εκροής", το ραδόνιο έγινε ύποπτο (Zdrojewicz and Strzelczyk, 2006). *Νωρίς από το 1905 ο εξέχων Βρετανός χημικός Frederick Soddy (1877-1956) πρότεινε την εξαγωγή ραδονίου από διάλυμα ραδίου, που θα χρησιμοποιείται για την θεραπεία της φυματίωσης (tuberculosis). Το ραδόνιο βρήκε πολλές ιατρικές εφαρμογές περιλαμβανόμενης και της εισαγωγής του σε διάφορες κοιλότητες του σώματος. Στα ιαματικά λουτρά εκτός από την θεραπεία με το μπάνιο και την κατάποση αναπτύχθηκε και η θεραπεία με εισπνοές σε ειδικό χώρο όπου γινόταν η συγκέντρωση των πλούσιων σε ραδόνιο αερίων (emanatorium ή inhalatorium). Η πρακτική αυτή των εισπνοών εξακολουθεί και μέχρι τις μέρες μας (από Κουφάκη, 2015 σ.10).*

Στην Ελλάδα, στις αρχές του 20ου αιώνα, η Αγγελική Παναγιωτάτου (1878-1954), η πρώτη γυναίκα που αποφοίτησε από την Ιατρική Σχολή Αθηνών (εικόνα 1.2), έγραψε μια ιστορική ανασκόπηση για την υδροθεραπεία στην αρχαία Ελλάδα ενώ το αριστούργημά της "Υγιεινή στην αρχαία Ελλάδα" που δημοσιεύθηκε το 1924, έλαβε βραβείο από την Γαλλική Ακαδημία Επιστημών. Η Παναγιωτάτου, εισήγαγε τη

θεραπεία με νερό στην Ελλάδα τονίζοντας τις θεραπευτικές του ικανότητες. Κατά την ίδια περίοδο, ο ιατρός Εμμανουήλ Μανταλάκης συνέβαλε σημαντικά στην ανάπτυξη της υδροθεραπείας και θερμικού ιατρικού τουρισμού. Ο Μανταλάκης αποκάλυψε τις θεραπευτικές αρετές και τις φυσικοχημικές και βιολογικές ιδιότητες των θερμών πηγών στην Ελλάδα, προτείνοντας διάφορες μεθόδους θεραπείας και παρέχοντας σημαντικές επιδημιολογικές πληροφορίες σχετικά με ιαματικές πηγές και θεραπευμένες ασθένειες (Tsoucalas et al, 2015, σ.4).



Εικόνα 1.2. Αγγελική Παναγιωτοπούλου (1878-1954), η πρώτη γυναίκα που αποφοίτησε από την Ιατρική Σχολή Αθηνών (Tsoucalas et al., 2015).

Σήμερα, ο τουρισμός υγείας και ευεξίας είναι ένας ταχέως αναπτυσσόμενος τομέας της τουριστικής βιομηχανίας και η δραστηριότητά του έχει αυξηθεί παγκοσμίως. Ο τουρισμός υγείας δεν πραγματοποιείται μόνο για την σωματική και ψυχολογική βελτίωση αλλά και για την αναψυχή και την χαλαρωτική εμπειρία. Στην σύγχρονη εποχή ωστόσο, ορισμένοι από τους πιο συνήθεις λόγους λουτροθεραπείας σε θερμομεταλλικά νερά αποτελούν, η αναζωογόνηση του δέρματος, η χαλάρωση των νευρών, η αποτοξίνωση του σώματος, και η ανανέωση των επιπέδων οξυγόνου. Πολλοί στρέφονται προς τα ιαματικά νερά σε μια προσπάθεια ίασης παθήσεων όπως, η αρθρίτιδα, οι δερματικές βλάβες, η κατάθλιψη, οι ασθένειες του αναπνευστικού συστήματος (άσθμα), και προβλήματα του κινητικού καθώς και του κυκλοφορικού συστήματος. Τα ιαματικά λουτρά αρχίζουν και αποτελούν πολύ σημαντικό κομμάτι της ζωής σήμερα διότι με την χρήση των λουτρών παρατηρείται η βελτίωσης της

υγείας, της εμφάνισης και η αποφυγή από το άγχος για την ανανέωση και την αναζωογόνηση του σώματος και του μυαλού (Porowski, 2019, σ.159).

1.2 Ακτινοβολίες στο περιβάλλον

1.2.1 Τα είδη ακτινοβολίας

Ο άνθρωπος όπως και κάθε έμβιος οργανισμός δέχεται διαρκώς ενέργεια με την μορφή ακτινοβολίας από το περιβάλλον. Ανάλογα από την ενέργεια που φέρει και την προέλευση της, η ακτινοβολία διαχωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες, την μη-ιοντίζουσα και την ιοντίζουσα ακτινοβολία. Η πρώτη μεταφέρει σχετικά χαμηλή ενέργεια, η οποία έχει μικρή εμβέλεια και δεν αποτελεί κίνδυνο στην ανθρώπινη υγεία. Σε αντίθεση, η ιοντίζουσα ακτινοβολία είναι η ακτινοβολία που μεταφέρει μεγάλη ποσότητα ενέργειας που είναι ικανή να εισχωρήσει στην ύλη, η οποία διασπά βίαια τους χημικούς δεσμούς, προκαλώντας βιολογικές βλάβες στον ανθρώπινο οργανισμό (Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, 2015). Η ιοντίζουσα ακτινοβολία είναι η ενέργεια στην φύση που μεταφέρεται με τη μορφή σωματιδίων ή κυμάτων που προέρχεται είτε από φυσικές πηγές είτε από ανθρώπινες δραστηριότητες (τεχνικές πηγές), όπως από α) την πυρηνική ιατρική β) την λειτουργία πυρηνικών εργοστασίων γ) τις δοκιμές πυρηνικών όπλων δ) τα πυρηνικά ατυχήματα και ε) άλλες πηγές. Οι φυσικές πηγές ακτινοβολίας κατατάσσονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

1. Την κοσμική ακτινοβολία που αποτελείται από το σύνολο της ιοντίζουσας ακτινοβολίας που προέρχεται από το διάστημα.
2. Την γήινη ακτινοβολία που αποτελείται από το σύνολο της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τα ραδιενεργά ισότοπα που υπάρχουν ή δημιουργούνται στον φλοιό της γης (Βογιάννης, 2005, σ.1 ;Νικολόπουλος, 2015, σ.13).

Ραδιενεργά ισότοπα καλούνται τα ισότοπα χημικών στοιχείων που χαρακτηρίζονται από ασταθείς πυρήνες. Οι ασταθείς πυρήνες έχουν την τάση να διασπώνται μέσω του μηχανισμού της μεταστοιχείωσης όπου στην ουσία ο αρχικός πυρήνας μεταπίπτει σε μία πιο σταθερή ενεργειακή κατάσταση. Πιο αναλυτικά, η ραδιενεργή διάσπαση πραγματοποιείται για την δημιουργία ενός νέου πυρήνα με καλύτερο συνδυασμό νετρονίων και πρωτονίων και ακολουθείται από την εκπομπή ιοντίζουσας

ακτινοβολίας, που καλείται ραδιενέργεια (radioactivity). Ένας ραδιενεργός πυρήνας μπορεί να υποστεί πολλές μεταπτώσεις πριν καταλήξει σε σταθερή κατάσταση.

1.2.2 Οι εκπεμπόμενες ακτινοβολίες κατά την ραδιενεργή διάσπαση

Κατά την διάσπαση ασταθών πυρήνων εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και αποβάλλεται μάζα ή ενέργεια. Η τρεις κοινοί τύποι ακτινοβολίας είναι: α, β και γ (εικόνα 1.3). Η α- και η β- ακτινοβολία δημιουργείται από μια αντίστοιχη διαδικασία μεταστοιχείωσης, ενώ η γ- έχει τις αιτίες στην κατανομή των ηλεκτρικών φορτίων στο εσωτερικό του πυρήνα. Θα επιχειρηθεί όσο πιο απλά, να δοθεί μια ερμηνεία στο φαινόμενο της ακτινοβολίας από τους ραδιενεργούς πυρήνες. Για να φανεί καλύτερα αυτό θα υποθεθεί ένας ραδιενεργός πυρήνας ως μητρικός και θα τον συμβολιστεί με A_ZM , όπου A ο μαζικός και Z ο ατομικός αριθμός του πυρήνα. Κατά την διάσπασή του θα προκύψει ένας θυγατρικός πυρήνας ${}^{A-4}_{Z-2}T$ και η όλη δράση μπορεί να περιγράψει με μια πυρηνική αντίδραση η οποία θα υπακούει στις αρχές της διατήρησης μάζας - ενέργειας και φορτίου:

ακτινοβολία - α (εκπομπή 4_2He): εξίσωση που περιγράφει, το φαινόμενο εκπομπής της α μπορεί να γραφεί: ${}^A_ZM = {}^{A-4}_{Z-2}T + {}^4_2He + \Delta E$

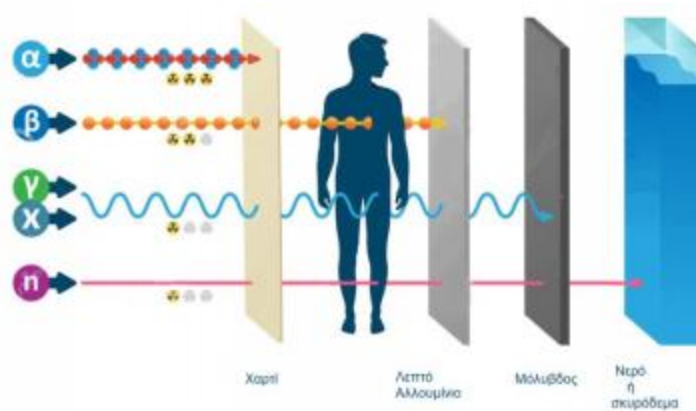
όπου ΔE είναι το ποσό της ενέργειας που εκλύεται κατά την δράση και οφείλεται στο γεγονός της διαφοράς μάζας (Δm) που υπάρχει μεταξύ των ατόμων των αντιδρώντων και των προϊόντων, διαφορά που ερμηνεύει το ποσό της εκλυόμενης ενέργειας (ΔE) με την εξίσωση του Einstein: $\Delta E = \Delta m \cdot C^2$, όπου C η ταχύτητα του φωτός.

ακτινοβολία - β: Βήτα διάσπαση συμβαίνει όταν ξαφνικά ένα νετρόνιο μετατραπεί σε πρωτόνιο με ταυτόχρονη εκπομπή ενός ηλεκτρονίου. Η αντίδραση που περιγράφει αυτή τη δράση είναι η εξής: ${}^A_ZM = {}^A_{Z+1}T + {}^0_{-1}e + V$

όπου V είναι ένα πυρηνικό σωματίδιο το νεutrίνο, που προτάθηκε από τους W. Pauli και E. Fermi το 1934 στη μελέτη της β-διάσπασης για να ερμηνευθεί η διατήρηση της ενέργειας και της ορμής κατά την διαδικασία αυτή. Ομοίως και στη περίπτωση αυτή η διαφορά μάζας προϊόντων - αντιδρώντων, ισοδυναμεί με την ενέργεια που διατίθεται στο ηλεκτρόνιο και το νεutrίνο σαν κινητική ενέργεια. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι β -

διάσπαση μπορεί να συμβεί και με την εκπομπή ποζιτρονίου ${}^0e_{+1}$ με ταυτόχρονη εκπομπή αντινετρίνου ν^-

ακτινοβολία – γ : Η ακτινοβολία αυτή είναι μια ηλεκτρομαγνητική διαδικασία που πηγάζει από την ανακατανομή των ηλεκτρικών φορτίων και ρευμάτων στο εσωτερικό του πυρήνα. Όπως είναι σήμερα γνωστό, ο πυρήνας δεν αποτελείται από στατικά σωματίδια, αλλά τα συστατικά του συμμετέχουν σε κινήσεις και έχουν ενεργειακές καταστάσεις οι οποίες μπορούν να αλλάζουν και να προκαλούν την εκπομπή ακτινοβολίας (από Βογιάννη, 2005, σ.5).



Εικόνα 1.3. Είδη ακτινοβολίας και η διεισδυτικότητά τους (American Nuclear Society, 2020).

1.2.3 Μονάδες Μέτρησης και ορισμοί ραδιενέργειας

Ως ενεργότητα (activity) ορίζεται η ποσότητα ενός ραδιενεργού υλικού σε δεδομένη χρονική στιγμή. Η μονάδα μέτρησης της ενεργότητας που ορίστηκε από το Διεθνές Σύστημα μονάδων είναι το 1 Becquerel (Bq), όπου ονομάστηκε έτσι από τον Γάλλο επιστήμονα Antoine Henri Becquerel και ισούται με τη μία πυρηνική διάσπαση ανά δευτερόλεπτο $1\text{Bq}=1\text{sec}^{-1}$. Η πρωτοπόρα μονάδα μέτρησης της ραδιενέργειας όμως ήταν το Ci (Curie) που ονομάστηκε έτσι από τη φυσικό Maria Curie (εικόνα 1.4). Η επιστήμονας αυτή έγινε γνωστή για την έρευνα της πάνω στα ραδιενεργά στοιχεία και στις διασπάσεις τους. Πιο συγκεκριμένα μέσω του μεταλλεύματος του διοξειδίου του ουρανίου (ουρανίτης – UO_2) ανακάλυψε δύο νέα ραδιενεργά στοιχεία το Πολώνιο και το Ράδιο. Το $1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10}\text{Bq}$ που αντιπροσωπεύει τις διασπάσεις

ανά δευτερόλεπτο και έχει υποπολλαπλάσια τα μCi και pCi . Επιπλέον ως μονάδα μέτρησης της ενεργότητας στο νερό χρησιμοποιείται το Bq/L ή Bq/m^3 που αντικατέστησε την μονάδα Mache που συχνά συμβολίζονταν και ως ME (Νικολόπουλος, 2015, σ.23).



Εικόνα 1.4. Στην αριστερή εικόνα είναι ο Γάλλος επιστήμονας Antoine Henri Becquerel και στην δεξιά εικόνα είναι η φυσικός Maria Curie (από Κουφάκης, 2018).

Απορροφούμενη δόση (absorbed dose): Είναι η ενέργεια που εναποτίθεται από την προσπίπτουσα, ραδιενεργή ακτινοβολία ανά μονάδα μάζας. Η μονάδα της απορροφημένης δόσης ορίζεται από το Διεθνές σύστημα μονάδων ως Gray όπου $1\text{Gy}=1\text{Joule/Kg}$.

Ισοδύναμη δόση (equivalent dose): Παρατηρήθηκε πως η ενέργεια που μεταφέρεται στους οργανισμούς δεν προκαλεί πάντοτε τις ίδιες βιολογικές βλάβες. Συνεπώς ανάλογα με το είδος και την ποιότητα της ακτινοβολίας (νετρόνιο, πρωτόνια), ορίζεται ένας συντελεστής ποιότητας Q . Έτσι η Ισοδύναμη δόση ισούται με το γινόμενο της απορροφημένης δόσης επί το συντελεστή ποιότητας Q . Από το Διεθνές σύστημα μονάδων ορίστηκε η μονάδα μέτρησης της ισοδύναμης δόσης το sievert (Sv) (Τσουκαλά, 2003). Επιπλέον σύμφωνα με την Ρυθμιστική Επιτροπή Πυρηνικής Ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών η ισοδύναμη δόση για οποιοδήποτε όργανο ή ιστό (εξαιρούνται οι φακοί των ματιών) δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 500 mSv (50 rem) ετησίως.

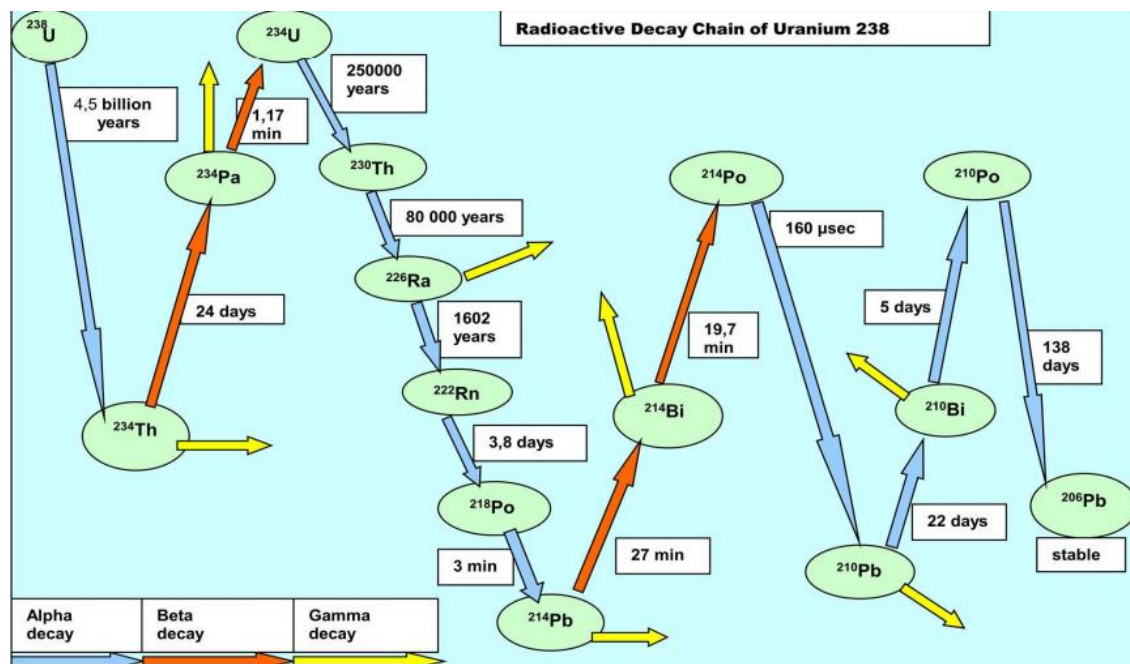
Ενεργός Δόση (effective dose): Χρησιμοποιείται στην ακτινοπροστασία για να εκφράσει τον κίνδυνο έκθεσης σε ακτινοβολίες για κάθε μέλος του ανθρώπινου σώματος. Λαμβάνει υπόψη όχι μόνο την φύση της ακτινοβολίας που εισέρχεται στο σώμα αλλά και την ευαισθησία των οργάνων του σώματος που επηρεάζονται από

αυτήν. Η ενεργός δόση προκύπτει από το άθροισμα των ισοδύναμων δόσεων σε όλους τους ιστούς και τα όργανα του σώματος. Η μονάδα μέτρησης της ενεργής δόσης είναι το Sievert(Sv), η ίδια μονάδα που χρησιμοποιείται για την ισοδύναμη δόση που απορροφάται από ένα όργανο, έναν αδένά ή οποιοδήποτε άλλο μέρος του σώματος. Συμπληρωματικά υποδεικνύεται από τον Κανονισμό Ακτινοπροστασίας ότι το όριο της ενεργού δόσης κατά την επαγγελματική έκθεση είναι 20 mS/έτος. Καθώς σε ειδικές περιπτώσεις σύμφωνα με την Ρυθμιστική Επιτροπή Πυρηνικής Ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών η ενεργός δόση που δέχεται ένα άτομο δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 50 mSv (5rem) ετησίως (Cherry et al., 2014).

1.3 Ραδόνιο

1.3.1 Βασικά χαρακτηριστικά Ραδονίου

Το 1900 ανακαλύφθηκε από τον Fedrich Ernst Dorn ότι από το χημικό στοιχείο ράδιο εκπέμπεται ένα ραδιενεργό αέριο. Αργότερα ο Ramsay και ο Gray έδωσαν στο ραδιενεργές αυτό αέριο την ονομασία niton που προέρχεται από την λατινική λέξη λάμψη. Το ραδόνιο (^{222}Rn) είναι ένα αδρανές αέριο (ευγενές αέριο) που δεν έχει ούτε χρώμα, ούτε οσμή, είναι άγευστο και έχει 27 ισότοπα, (από το ^{200}Rn μέχρι το ^{226}Rn). Ο όρος ραδόνιο δόθηκε στο πιο σταθερό ισότοπο του με την μεγαλύτερη διάρκεια ημίσειας ζωής (3,82 ημέρες) και είναι το (^{222}Rn). Το ραδόνιο είναι προϊόν διάσπασης του πατρικού ραδίου ^{226}Ra και μέλους της σειράς διάσπασης του ουρανίου (^{238}U). Το στερεό πατρικό ράδιο διασπάται με την εκπομπή δύο πρωτονίων και νετρονίων (καλείται α-διάσπαση) και δίνει το ραδιενεργές αέριο ραδόνιο. Στην σειρά διάσπασης του ουρανίου διασπώνται 8 μέλη που εκπέμπουν σωματίδια-α και 6 μέλη που εκπέμπουν σωματίδια-β για να καταλήξει στο τελικό σταθερό θυγατρικό ^{206}Pb (εικόνα 1.5). Το στοιχείο ουράνιο συναντάται κυρίως στα ορυκτά ουρανίνη (UO₂) και κοφινίτης (USiO₄) (Βαβελίδης κ.α., 2005). Τα βασικά ισότοπα του ραδονίου είναι τρία και ανήκουν σε τρεις φυσικές ραδιενεργές σειρές, το ακτινόνιο (^{219}Rn) από την σειρά ακτινίου (^{235}U), το θορόνιο (^{220}Rn) από την σειρά θορίου (^{232}Th) και το (^{222}Rn) από την σειρά ουρανίου (^{238}U). Οι χρόνοι ημίσειας ζωής τους είναι αντίστοιχα 3,96 sec, 55,6 sec και 3,82 days. Συνεπώς το ραδόνιο λόγω του μεγάλου χρόνου ημίσειας ζωής του, προλαβαίνει να διαφύγει από το έδαφος και τα πετρώματα και εν τέλει να συσσωρευτεί σημαντικά στον αέρα.



Εικόνα 1.5. Ραδιενεργή σειρά διάσπασης του ουρανίου (U^{232}), η εκπεμπόμενη ακτινοβολία και οι χρόνοι ημίσειας ζωής του κάθε ραδιονουκλιδίου (Coretchi et al., 2017).

1.3.2 Ραδόνιο σε εσωτερικούς χώρους

Η μέση συγκέντρωση ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους, παγκοσμίως εκτιμάται στα 39 Bq/m^3 . Το ραδόνιο έχει την ικανότητα να κινείται ελεύθερα σε πορώδη μέσα όπως το έδαφος και τα πετρώματα, με αποτέλεσμα να εισέρχεται σε εσωτερικούς χώρους όπου μπορεί να συσσωρευτεί. Συνεπώς η μεγαλύτερη έκθεση ραδονίου γίνεται σε εσωτερικούς χώρους όπως σπίτια, σχολεία, γραφεία με συγκεντρώσεις να κυμαίνονται από 10 Bq/m^3 μέχρι και τιμές 10.000 Bq/m^3 . Για τους περισσότερους ανθρώπους η μεγαλύτερη έκθεση γίνεται στο σπίτι. Η έκθεση αυτή εξαρτάται από (WHO, 2009):

1. Την σύσταση του εδάφους και των υποκείμενων πετρωμάτων που περιβάλλει το κτήριο.
2. Από τις διαθέσιμες διόδους για την εισχώρηση ραδονίου στα κτίρια.
3. Η εναλλαγή αέρα, που εξαρτάται από την κατασκευή του σπιτιού, τις συνθήκες εξαερισμού και την αεροστεγανότητα του κτιρίου.
4. Οικοδομικά υλικά
5. Τις εσωτερικές παροχές ύδρευσης και αποχέτευσης.

6. Από την παροχή νερού για οικιακή χρήση.

Το τελευταίο αποτελεί πολύ σημαντική πηγή εισχώρησης ραδονίου στα σπίτια. Υπολογίζεται ότι περίπου το 40% των σπιτιών χρησιμοποιούν νερό από ιδιωτικά πηγάδια ή παρόμοιες πηγές με υψηλή περιεκτικότητα ραδονίου. Παρόλο που η οικιακή χρήση νερού ποικίλλει σημαντικά όσον αφορά στην ποσότητα του ραδονίου που απελευθερώνεται, ορισμένες χρήσεις, όπως το ντους και το πλύσιμο πιάτων, απελευθερώνουν έως και το 98% του ραδονίου από το νερό προς τον αέρα σε εσωτερικούς χώρους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ραδόνιο βρίσκεται διαλυμένο στο νερό και όταν αυξηθεί η θερμοκρασία η διαλυτότητά του μειώνεται γρήγορα (WHO, 2017, σ.215). Επομένως όταν μια βρύση ή ντους είναι ενεργοποιημένη, απελευθερώνεται μέρος του διαλυμένου ραδονίου στον εσωτερικό αέρα. Από τα 190 έως 379 λίτρα νερού που χρησιμοποιείται ανά ημέρα ανά άτομο, περίπου το 70% του ραδονίου απελευθερώνεται στον αέρα σε εσωτερικούς χώρους. Με βάση αυτό περίπου 0,5 έως 3% της μέσης συγκέντρωσης ραδονίου, που έχει τιμή περίπου 40 Bq/m^3 , προέρχεται από την οικιακή παροχή νερού. Το ραδόνιο στο νερό από επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας εν τέλει δεν αποτελεί σημαντικό κίνδυνο (Wilkening, 1990). Επιπρόσθετα παρατηρήθηκε το γεγονός ότι ένας επιπρόσθετος παράγοντας που επηρεάζει τη συγκέντρωση του ραδονίου είναι ο τύπος της κατοικίας πχ μονοκατοικία, πολυκατοικία και τον όροφο διαμονής. Συγκεκριμένα, το επίπεδο ραδονίου είναι υψηλότερο στις μονοκατοικίες και στους πρώτους ορόφους των πολυκατοικιών. Ακόμη, το επίπεδο ραδονίου είναι χαμηλότερο στους πρώτους ορόφους των πολυκατοικιών όταν το κτίριο διαθέτει υπόγειο.

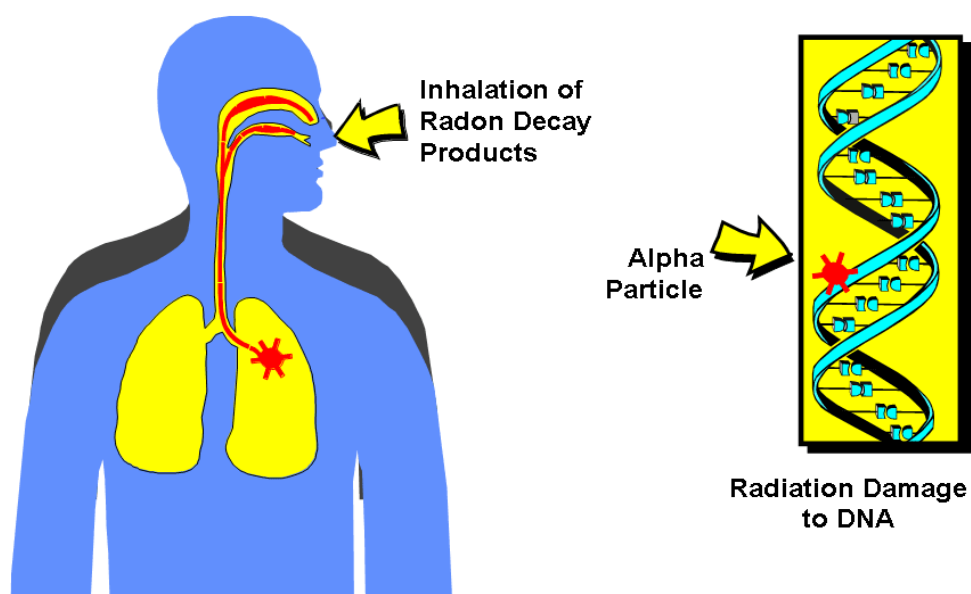
1.3.3 Το ραδόνιο και οι επιπτώσεις του στην ανθρώπινη υγεία

Το 55% από την φυσική ακτινοβολία που δέχεται ο μέσος άνθρωπος προέρχεται από το ραδόνιο (Νικολόπουλος, 2012, σ.13). Το ραδόνιο ως αδρανές αέριο με σχετικά μεγάλο χρόνο ημιζωής έχει την ικανότητα να διαφεύγει από τα πετρώματα και τα εδάφη και να εισέρχεται σε κλειστούς χώρους, όπου μπορεί να συσσωρευτεί. Έτσι το ραδόνιο μπορεί εύκολα να εισέλθει στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της εισπνοής καθώς και μέσω της κατάποσης. Σύμφωνα με την αξιολόγηση διεθνών δεδομένων έρευνας της UNSCEAR (2019) προκύπτει το συμπέρασμα ότι, κατά μέσο όρο, το 90% της δόσης που οφείλεται στο ραδόνιο στο πόσιμο νερό, προέρχεται από την εισπνοή και

όχι από την κατάποση (Μπαλταδώρος και Σαμψωνίδης, 2018). Κατά την εισπνοή, τα σωματίδια εναποτίθενται στις κυψέλες των πνευμόνων και αλληλεπιδρούν με τους βιολογικούς ιστούς οδηγώντας σε βλάβη του DNA. Όμως το ραδόνιο εξαιτίας του μεγάλου χρόνου ημίσειας ζωής του σε σχέση με την αναπνοή, δεν προλαβαίνει να διασπαστεί μέσα στο αναπνευστικό σύστημα. Ωστόσο, λόγω της λιποφιλικότητας του ραδονίου και της συγγένειας σύνδεσης με ορισμένες πρωτεΐνες, ένα μικρό κλάσμα του ραδονίου που υπάρχει στην αναπνευστική οδό απορροφάται στο αίμα και στη συνέχεια κατανέμεται στους ιστούς και τα όργανα. Ένα κλάσμα αυτού του παραμένου ^{222}Rn μεταφέρεται από τις φλέβες πίσω στους πνεύμονες για εκπνοή. Ως εκ τούτου, η αποδέσμευση του ραδονίου πραγματοποιείται κυρίως μέσω της εκπνοής, αν και αυτό δεν συμβαίνει στα θυγατρικά του. Τα βραχύβια θυγατρικά του ραδονίου είναι τέσσερα (Po-218, Pb-214, Bi-214 και Po-214) και δεν είναι χημικά αδρανή, σε αντίθεση με το ραδόνιο, με αποτέλεσμα λίγο μετά τον σχηματισμό τους να προσκολλώνται σε αιωρούμενα σωματίδια και εγκαθίστανται στους διάφορους ιστούς όπου διασπώνται εξαιτίας του μικρού χρόνου ημίσειας ζωής τους (λιγότερο από 27 min) στο μακρόβιο ^{210}Pb (Πατήρης, 2009). Τα σωματίδια-α που εκπέμπονται από το ραδόνιο καθώς και από τα δύο θυγατρικά το προϊόντα Po-218 και Pb-214, δεν έχουν την ικανότητα να ταξιδέψουν μακριά αλλά έχουν την ικανότητα μεταφέρουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας που μέσω της εισπνοής φωλιάζουν στο βλεννογόνο καταστρέφοντας έτσι τα κύτταρα (Savidou et al., 2001). Αντίθετα τα μακροβιότερα ισότοπα (Pb-210, Po-210, Bi-210) λόγω του μεγάλου χρόνου ημίσειας ζωής τους, προλαβαίνουν να φύγουν από τον οργανισμό πριν την διάσπαση τους. Η κατάποση ραδονίου που είναι διαλυμένο στο νερό μεταφέρει το ραδόνιο στο στομάχι που παραμένει εκεί για αρκετά λεπτά. Στην συνέχεια περνάει στο έντερο, όπου απορροφάται κυρίως από το αρτηριακό αίμα που υπάρχει στο γαστρεντερικό σύστημα. Λαμβάνοντας υπόψη τον γρήγορο βιολογικό ρυθμό αποβολής του ^{222}Rn σε σχέση με τη φυσική ημίσεια ζωή του ραδονίου και τη χαμηλή ημερήσια πρόσληψη του από τα άτομα που μελετήθηκαν, τα οποία κατανάλωναν κυρίως νερό βρύσης και/ή εμφιαλωμένο νερό, η συμβολή αυτής της οδού έκθεσης θεωρήθηκε αμελητέα (Kalef-Ezra και Valakis, 2016).

Οι έρευνες για τις επιπτώσεις του ραδονίου στην ανθρώπινη υγεία ξεκίνησαν στους εργαζόμενους σε υπόγεια ανθρακωρυχεία που σε καθημερινή βάση ήταν εκτεθειμένοι σε υψηλά επίπεδα ραδονίου. Μετέπειτα στην δεκαετία του 1980 άρχισαν έρευνες και

σε εσωτερικούς χώρους που οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η συγκέντρωση ραδονίου στους χώρους αυτούς μπορεί να προκαλέσει καρκίνο στο πνεύμονα. Το 1999 η Ατομική Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος αναφέρει ότι στις ΗΠΑ το ραδόνιο αποτελεί την δεύτερη κύρια αιτία καρκίνου στο πνεύμονα μετά το κάπνισμα και εκτιμάται ότι προκαλεί 3000-33000 θανάτους τον χρόνο. Οι περισσότερες από τις περιπτώσεις καρκίνου του πνεύμονα που προκαλούνται από ραδόνιο, εμφανίζονται μεταξύ των καπνιστών λόγω της ισχυρής συνδυασμένης επίδρασης του καπνίσματος και του ραδονίου. Η πλειοψηφία των καρκίνων του πνεύμονα που προκαλούνται από το ραδόνιο οφείλονται σε χαμηλές έως μέτριες συγκεντρώσεις ραδονίου και όχι σε υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι λιγότεροι άνθρωποι είναι εκτιθέμενοι σε χώρους με υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου. Επιπλέον, στις μελέτες ανθρακωρύχων για τις οποίες υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες για το κάπνισμα, η αναλογική αύξηση του κινδύνου καρκίνου του πνεύμονα ανά μονάδα αύξησης της συγκέντρωσης ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους είναι επίσης παρόμοια. Επομένως, η πλειονότητα των καρκίνων του πνεύμονα που προκαλούνται από το ραδόνιο προκαλούνται από κοινού από το ραδόνιο και από το κάπνισμα, υπό την έννοια ότι ο καρκίνος του πνεύμονα δεν θα είχε συμβεί εάν είτε το άτομο δεν είχε καπνίσει τσιγάρα είτε δεν είχε εκτεθεί στο ραδόνιο.



Εικόνα 1.6. Η εισπνοή των βραχύβιων θυγατρικών προϊόντων του ραδονίου και οι επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό (WHO, 2018).

1.4 Πηγές Ραδονίου

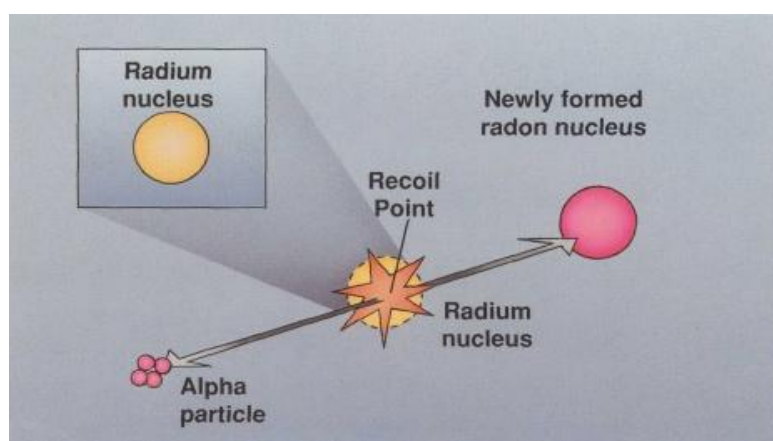
1.4.1 Ουράνιο(²³⁸U)

Για την καλύτερη κατανόηση της προέλευσης του ραδονίου, που και πως δημιουργείται και το πώς κινείται, πρέπει να εξεταστεί αρχικά η κύρια πηγή του, το ουράνιο. Όλα τα πετρώματα περιέχουν κάποια ποσότητα ουρανίου, αν και τα περισσότερα περιέχουν μόνο μια μικρή ποσότητα (1-3 ppm) ουρανίου. Με άλλα λόγια, σε 500 τόνους πετρωμάτων περιέχονται (0,45 -1,3 Kg) ουρανίου διάσπαρτα σε αυτήν την μάζα. Τα πετρώματα κατακερματίζονται μηχανικά και χημικά για να σχηματίσουν εδάφη στην επιφάνεια της Γης. Δεν προκαλεί λοιπόν έκπληξη το γεγονός ότι τα περισσότερα εδάφη περιέχουν επίσης μικρές ποσότητες (1-3 ppm) ουρανίου. Γενικά, η περιεκτικότητα του εδάφους σε ουράνιο θα είναι περίπου ίδια με το περιεχόμενο ουρανίου στα πετρώματα από το οποίο προέρχεται το έδαφος. Μερικά πετρώματα έχουν υψηλότερο από το μέσο όρο περιεχόμενο ουρανίου. Το ουράνιο είναι λιθόφιλο στοιχείο που σημαίνει ότι βρίσκεται συγκεντρωμένο σε μάγματα πλούσια σε πυρίτιο όπου οι τυπικές συγκεντρώσεις είναι (8,1-33 ppm) με μέση τιμή 12 ppm (Τριαντάφυλλος και Παπαδοπούλου, 2011). Σε αυτά ανήκουν συνήθως ανοιχτόχρωμα ηφαιστειακά πετρώματα, γρανίτες (6,1-300 mg/kg), σκουρόχρωμοι σχιστόλιθοι (3-1250 mg/kg), ιζηματογενή πετρώματα που περιέχουν φωσφόρο (50-300 mg / kg) και μεταμορφωμένα πετρώματα. Αυτά τα πετρώματα και τα εδάφη μπορούν να περιέχουν μέχρι 100 ppm ουρανίου (Otton, 1992).

1.4.2 Ράδιο (²²⁶Ra)

Όπως το ουράνιο παράγεται σε όλα τα πετρώματα και τα εδάφη έτσι και το ράδιο περιέχεται αφού αποτελεί θυγατρικό προϊόν της ραδιενεργούς διάσπασης του ουρανίου. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ²²⁶Ra παρατηρούνται στους σχιστόλιθους, στα βιτουμένια, στα ηφαιστειακά και φωσφορικά πετρώματα ακολουθούμενα από γρανίτες, αργιλώδης πετρώματα, ψαμμίτες και, τέλος, ιζηματογενή πετρώματα, ασβέστη και ανθρακικό άλας. Τα υψηλά επίπεδα ²²⁶Ra στους σχιστόλιθους και στα βιτουμένια οφείλονται στις ενώσεις πλούσιες σε αργιλικό υλικό οργανικής προέλευσης, ενώ τα φωσφορικά πετρώματα ιζηματογενούς προέλευσης είναι γνωστά ως ορυκτά πλούσια σε ουράνιο. Οι γρανίτες έχουν ένα ευρύ φάσμα συγκεντρώσεων ραδίου που εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλές τιμές σε πετρώματα που εμφανίζουν

ουράνιο. Με βάση τα δεδομένα από τις αξιολογήσεις UNSCEAR η μέση παγκόσμια τιμή της συγκέντρωσης του ραδίου στο έδαφος είναι 32Bq/kg (Goulet, 2014). Κάθε άτομο ^{226}Ra διασπάται εκτοξεύοντας από τον πυρήνα του ένα σωματίδιο-άλφα που αποτελείται από δύο νετρόνια και δύο πρωτόνια. Όσο το σωματίδιο-άλφα εκτοξεύεται, το νεοσυσταθέν άτομο ραδονίου εξαιτίας της Αρχής Διατήρησης της Ενέργειας και Ορμής ανακρούεται στην αντίθετη πατηθεί η σκανδάλη (εικόνα 1.6). Το αποτέλεσμα της ανάκρουσης αυτής είναι το ραδόνιο να μετακινηθεί από το μεταλλικό πλέγμα εντός ύλης σε απόσταση (0,02-0,07 μm). Όταν όμως πραγματοποιηθεί η μετακίνηση στα διάκενα μεταξύ των κόκκων που είναι κορεσμένα τότε γίνεται σε απόσταση 0,1 μm ενώ στον αέρα σε 63 μm (Otton, 1992, σ.8; Βογιάννης, 2005, σ33).



Εικόνα 1.7. Η διάσπαση ενός ατόμου ραδίου, η παραγωγή σωματιδίου-άλφα, καθώς και το νεοσύστατο άτομο ραδονίου (Otton, 1992).

1.4.3 Σχηματισμός-διαφυγή εκροή ραδονίου

Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την συγκέντρωση του ραδονίου είναι η ικανότητα παραγωγής του που καθορίζεται από την περιεκτικότητα σε ^{226}Ra η οποία ταυτίζεται με έννοια της **ειδικής ενεργότητας** (specific activity) του εδάφους (Κουφάκης, 2018, σ.26-27). Επιπλέον καθοριστικό ρόλο παίζει και η θέση του ατόμου, στους κόκκους του ορυκτού, δηλαδή το πόσο κοντά βρίσκεται στην επιφάνεια του κόκκου και η κατεύθυνση της ανάκρουσης του ^{222}Rn , αν είναι προς την επιφάνεια ή προς το εσωτερικό του κόκκου. Αυτό καθορίζει, εάν το νέο σχηματισμένο άτομο ^{222}Rn θα διαφεύγει και θα εισέλθει στους πόρους ανάμεσα στους κόκκους των ορυκτών. Αυτό καλείται το φαινόμενο εκροής (**emanation**

coefficient). Για τα περισσότερα εδάφη, μόνο το 10-50% του ραδόνιου που παράγεται στους κόκκους των ορυκτών καταφέρνει να φτάσει στο πορώδη χώρο. Με βάση το υλικό του κόκκου και την κινητική ενέργεια ο πυρήνας του ατόμου έχει τρεις δυνατότητες (Otton, 1992, σ.9):

α) Εάν το άτομο ραδίου είναι «βαθιά» στο εσωτερικό ενός μεγάλου κόκκου, ανεξάρτητου κατεύθυνσης της ανάκρουσης, δεν θα διαφύγει το ραδόνιο από το κόκκο, και το άτομο ραδονίου θα παραμείνει εγκλωβισμένο στο εσωτερικό του ορυκτού. Ακόμη και όταν ένα άτομο ραδίου είναι κοντά στην επιφάνεια ενός κόκκου, η ανάκρουση θα στείλει το άτομο ραδονίου βαθύτερα μέσα στο ορυκτό εάν η κατεύθυνση της ανάκρουσης είναι προς την κατεύθυνση του πυρήνα του κόκκου.

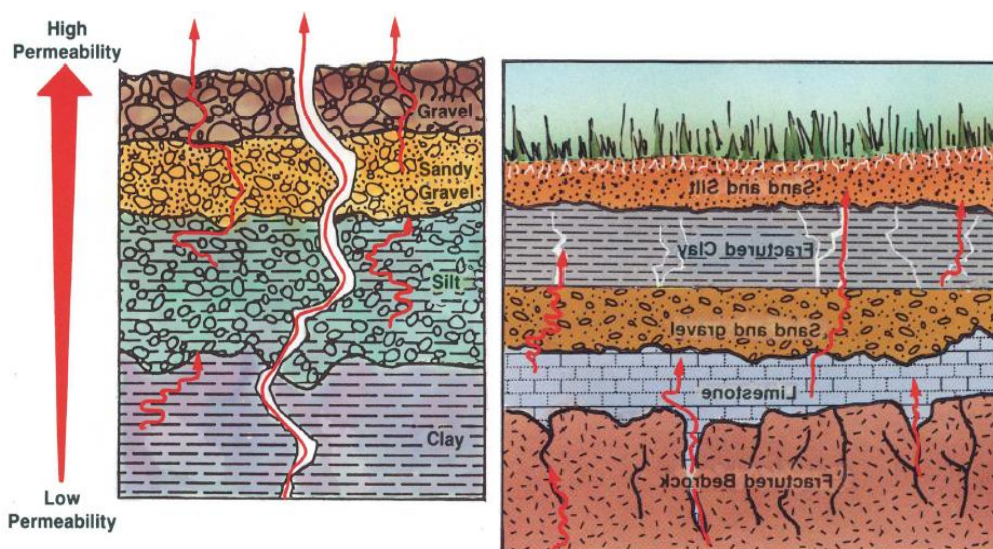
β) Ωστόσο, η ανάκρουση ορισμένων ατόμων ραδονίου κοντά στην επιφάνεια του κόκκου έχουν κατεύθυνση προς την επιφάνεια του κόκκου με αποτέλεσμα το νεοσυσταθέν ραδόνιο να εγκαταλείπει το ορυκτό και εισέρχεται στο πορώδη χώρο ανάμεσα των κόκκων ή στις ρωγμές των πετρωμάτων.

γ) Η εκτόξευση του ραδονίου με την διάσπαση είναι αρκετά ισχυρή. Συχνά νεοσυσταθέντα άτομα ραδονίου εισέρχεται στον πορώδη χώρο, διασχίζοντας τον και ενσωματώνοντας με τους κοντινότερους κόκκους των γειτονικών ορυκτών. Εάν υπάρχει νερό παρόν στο χώρο των πόρων τότε το κινούμενο άτομο ραδονίου επιβραδύνεται πολύ γρήγορα και είναι πιο πιθανό να παραμείνει στο χώρο των πόρων.

1.4.4 Η διαφυγή του ραδονίου από το αρχικό πέτρωμα

Το ραδόνιο ως αέριο έχει πολύ μεγαλύτερη κινητικότητα σε σχέση με το ουράνιο και το ράδιο, που είναι στερεά υλικά στα πετρώματα και στα εδάφη. Το ραδόνιο διαφεύγει εύκολα από τα πετρώματα και τα εδάφη, λόγω των ρηγμάτων στα πετρώματα και στο πορώδη χώρο ανάμεσα στους κόκκους του εδάφους (εικόνα 2.7). Η ευκολία και η αποδοτικότητα με την οποία το ραδόνιο κινείται στο χώρο των πόρων ή ρηγμάτων επηρεάζει το πόσο ραδόνιο εισέρχεται σε ένα σπίτι. Η μετακίνηση ανάμεσα στους πόρους γίνεται είτε μέσω της **διάχυσης** είτε μέσω την **μεταφοράς**. Σε ορισμένες περιπτώσεις η εμφάνιση CO₂ και CH₄ βοηθάει στην μεταφορά ραδονίου προς την ατμόσφαιρα που σε συνδυασμό με τις διαφορές θερμοκρασίας, της πίεσης του εδάφους και την διεισδύουσα βροχή ενισχύει την μεταφορά αυτή. Η διάχυση του

ραδονίου από τα εδάφη εξαρτάται από την ποσότητα του νερού μέσα στους πόρους (η περιεκτικότητα σε υγρασία του εδάφους), το ποσοστό των πόρων στο έδαφος (το πορώδες), και η διασύνδεση των πόρων καθορίζουν την διαπερατότητα. Το ραδόνιο κινείται ευκολότερα στα διαπερατά εδάφη, όπως αδρομερής άμμος και χαλίκια, σε σχέση με αδιαπέρατα εδάφη, όπως οι άργιλοι. Οι ρωγμές στα εδάφη και τα πετρώματα επιτρέπουν στο ραδόνιο να κινηθεί πιο γρήγορα. Επειδή το ραδόνιο έχει περιορισμένο χρόνο ημίσειας ζωής, το μεγαλύτερο μέρος του διασπάται μέσα στο έδαφος. Για παράδειγμα το 90% του ραδονίου που «παράγεται» από μια πηγή ραδίου βαθιά στο έδαφος και μεταφέρεται με διάχυση, θα έχει διασπασθεί **μετά από απόσταση 5 cm στο νερό, περίπου 2 m σε αμμώδες έδαφος με κανονική υγρασία και σε 5 m στον αέρα** (Κουφάκης, 2018 σ.30-31; Otton, 1992, σ.11).



Εικόνα 1.8. Η μεταφορά του ραδονίου στα εδάφη σύμφωνα με την διαπερατότητα (Otton, 1992).

1.5 Το ραδόνιο στο νερό

Τα επιφανειακά και υπόγεια νερά περιέχουν ραδόνιο σε διάφορες συγκεντρώσεις ανάλογα με την προέλευση τους. Το ραδόνιο απελευθερώνεται στα νερά μέσω φυσικών διεργασιών όπως η διάσπαση του μητρικού νουκλεϊδίου του ^{226}Ra αλλά κυρίως λόγω της διάλυσής του από το γεωλογικό περιβάλλον και πιο συγκεκριμένα από τα πετρώματα και τα εδάφη. Όσο πλησιέστερα βρίσκονται τα πετρώματα στον υδροφόρο ορίζοντα τόσο πιο πολύ νερό περιέχουν οι πόροι με αποτέλεσμα να

εγκλωβίζεται το ραδόνιο και να μειώνεται η κινητικότητα του στο χώρο. Συνεπώς τα πετρώματα που είναι κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα τείνουν να είναι κορεσμένα με αποτέλεσμα το ραδόνιο απελευθερώνεται και να διαλύεται στο νερό. *Το ραδόνιο έχει έντονη παρουσία σε περιπτώσεις που το υπόγειο νερό κινείται κοντά σε ρήγματα ή σε περιοχές με ηφαιστειακή δραστηριότητα ή ακόμα και μέσα από καρστικές κοιλότητες, όπου το ραδόνιο μπορεί να είναι εγκλωβισμένο* (από Βογιάννη, 2005, σ.25).

Το ραδόνιο στο νερό μπορεί επίσης να προέρχεται από τη διάλυση του ατμοσφαιρικού ραδονίου στο νερό καθώς στη λεκάνη απορροής μπορεί να καταλήξει και νερό με υψηλή περιεκτικότητα σε ραδόνιο προερχόμενο από άλλη πηγή στην περιοχή. Η διαλυτότητα του ραδονίου στο νερό είναι σχετικά χαμηλή ($0,01 \text{ mol/Kg} \cdot \text{bar}$ στους 293 K). Επιπλέον η διαλυτότητα εκφράζεται συνήθως με τον συντελεστή διαχωρισμού (L) του ^{222}Rn μεταξύ καθαρού διαλύτη και αέρα. Ο συντελεστής διαχωρισμού του ^{222}Rn στο νερό είναι περίπου $0,23\text{-}0,25$ στους 293 K . Η χημική συγγένεια του ραδονίου με τους οργανικούς διαλύτες και τα έλαια είναι μεγαλύτερη, για παράδειγμα ο συντελεστής διαχωρισμού για την αιθανόλη είναι περίπου ίσο με 6 . Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια των διαφορετικών αναλυτικών προσεγγίσεων όπου απαιτείται η μεταφορά φάσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η αλυσίδα των ατόμων του άνθρακα τόσο μεγαλύτερη είναι η διαλυτότητα του ραδονίου. Παρά τη σχετικά χαμηλή διαλυτότητα του ραδονίου στο νερό, η ενεργή συγκέντρωση του μέσα στα νερά μπορεί να είναι μερικές τάξεις μεγέθους υψηλότερη από αυτές των άλλων φυσικών ραδιονουκλιδίων (Jobbagy et al., 2017).

Τα επίπεδα συγκεντρώσεων ^{222}Rn στο νερό ποικίλλουν και οι τιμές τους εκτείνονται σε ένα ευρύ φάσμα. Τα επιφανειακά νερά, έχουν γενικά πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις ^{222}Rn , που φτάνουν σε επίπεδα μερικών kBq/m^3 , ενώ στα υπόγεια νερά οι συγκεντρώσεις κυμαίνονται από $1\text{-}50 \text{ kBq/m}^3$ σε υδροφορείς σε ιζηματογενή πετρώματα, από $10\text{-}300 \text{ kBq/m}^3$ σε πολύ βαθιές γεωτρήσεις και από $100\text{-}50000 \text{ kBq/m}^3$ σε κρυσταλλικά πετρώματα (Coretchi et al., 2017). Αυξημένες συγκεντρώσεις ^{238}U παρατηρήθηκαν σε δείγματα του εδάφους, που περιέχουν σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις ^{222}Rn και ράδιου (^{226}Ra). Οι ενεργές δόσεις σε αυτά τα νερά δείχνουν ότι η τακτική χρήση του νερού παρουσιάζουν μια πρόσθετη ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας, έως και 4 mSv/έτος .

Κατά την διάρκεια της συμπύκνωσης και ανάπτυξης σταγόνων βροχής, μοιάζει σαν ο αέρας να παρασέρνει μικρές ποσότητες ραδονίου με αποτέλεσμα το νερό της βροχής να περιέχει μόνο 50 Bq/m^3 ($1,4 \text{ pCi/L}$) και τα επιφανειακά νερά λιγότερο από 2.000 Bq/m^3 . Το νερό στους υπόγειους υδροφορείς που βρίσκεται κοντά στα πετρώματα και στα εδάφη, περιέχουν φυσιολογικές ποσότητες ουρανίου και ραδίου, και μία σημαντική ποσότητα διαλυμένου ραδονίου που μπορεί να κυμαίνεται από 20 έως 44.000 Bq/m^3 (Wilkening, 1990, σ.111).

1.6 Το ραδόνιο στους ωκεανούς

Υπάρχουν διάφορες διεργασίες και πηγές που συνεισφέρουν στον εμπλουτισμό του θαλασσινού νερού σε ^{222}Rn , όπως για παράδειγμα οι επιφανειακές αλληλεπιδράσεις στη διεπιφάνεια νερού/ατμόσφαιρας, η ανάμιξη με γλυκό νερό που καταλήγει σε αυτήν, η διάχυση από τα ιζήματα του βυθού, η επιτόπια παραγωγή του από το ^{226}Ra σε εκφορτίσεις υπογείων υδάτων και υδροθερμικές οπές. Στη Νότια Βαλτική Θάλασσα οι τυπικές τιμές του ^{226}Ra είναι $1,7\text{-}2,2 \text{ mBq/L}$. Στον Κόλπο της Βεγγάλης $5,4\text{-}29 \text{ mBq/L}$, με επίπεδα ^{222}Rn $1,3\text{-}1,7 \text{ Bq/L}$. Στη Μαύρη Θάλασσα το ^{222}Rn και το ^{226}Ra κυμαίνονται μεταξύ $22\text{-}48 \text{ mBq/L}$ και $11\text{-}56 \text{ mBq/L}$ αντίστοιχα και στη Νεκρά Θάλασσα το ^{222}Rn έχει συγκέντρωση στο εύρος $4,3\text{-}6,3 \text{ Bq/L}$. Στο πυθμένα του ωκεανού παρατηρείται να υπάρχουν μεγάλες ποσότητες ραδονίου σε σχέση με το πατρικό ράδιο, που οφείλεται στα ορυκτά του βυθού του ωκεανού. Δεδομένου ότι τα άτομα του ραδονίου δεν μπορούν να ξεφύγουν εύκολα από την επιφάνεια του νερού σε σύγκριση με το έδαφος και τα πετρώματα των ηπειρωτικών περιοχών, **οι θαλάσσιες μάζες αέρα περιέχουν μόνο 1% ή λιγότερο ραδόνιο ανά μονάδα όγκου σε σχέση με τον αέρα σε μεγάλες χερσαίες περιοχές** (Wilkening, 1990, σ.110-111). Το φαινόμενο των μικροφυσαλίδων εμπλουτίζει τα νερά με ^{222}Rn , κατά το οποίο μεταφέρεται ραδόνιο από την πηγή του προς την επιφάνεια. Η μικροφυσαλίδα μπορεί επίσης συνεισφέρει στη μεταφορά επιφανειοδραστικών ουσιών προς την επιφάνεια του νερού. Όμως κοντά στην επιφάνεια του ωκεανού παρατηρούνται μικρές ποσότητες ραδονίου λόγω της διαφυγής του μέσω σχηματισμού φυσαλίδων και μέσω εξάτμισης. Η αύξηση της αλατότητας αυξάνει τη μεταφορά των επιφανειοδραστικών ουσιών (Salih, 2003). Το νερό από θερμές πηγές της

Ανατολικό-Ειρηνικής ωκεάνιας Ράχης (east Pacific rise) παρουσιάζει αραιή ποσότητα ουρανίου. Τέτοια αραίωση μάλλον οφείλεται στην αναγωγή του U^{6+} σε αδιάλυτο U^{4+} κατά την διάρκεια κυκλοφορίας θαλασσινού νερού στο σύστημα ανακύκλωσης. Κατά την διάρκεια κυκλοφορίας (ανακύκλωσης) το θαλασσινό νερό χάνει ουσιαστικά όλο το ουράνιο του, περίπου 3 ppb. Η παγκόσμια ροή νερού μέσα στην ράχη του υδροθερμικού συστήματος είναι 1.35×10^{17} g/έτος και η συνολική απώλεια ουρανίου είναι 0.04×10^{10} g/έτος (Khater, 2003).

Κεφάλαιο 2^ο Μέθοδοι μέτρησης ραδονίου

2.1 Ο σκοπός των μετρήσεων της συγκέντρωσης ραδονίου

Με βάση τα άρθρα 35-36 της Ευρωπαϊκής Κοινότητας Ατομικής Ενέργειας (EURATOM, 2010) η παρακολούθηση και υποβολή των εκθέσεων για τη ραδιενέργεια στο περιβάλλον είναι υποχρέωση για όλα τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Για τον έλεγχο της ποιότητας και της συγκρισιμότητας αυτών των αποτελεσμάτων μέτρησης, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Γενικής Διεύθυνσης Ενέργειας (EC DG ENER) ζήτησε από το Ινστιτούτο Υλικών Αναφοράς και Μετρήσεων (JRC-IRMM /JRC-Gee11) να οργανώσει ενδοεργαστηριακές συγκρίσεις (ILC). Το ILC εστιάζεται κυρίως σε μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους παρακολούθησης και μέτρησης της ενεργής συγκέντρωσης του ραδονίου στα δείγματα νερού. Οι μετρήσεις γίνονται αποκλειστικά για το ραδόνιο (^{222}Rn) και όχι για άλλα βραχύβια ισότοπα του ραδονίου, όπως το θορόνιο (^{220}Rn) και το ακτίνιο (^{219}Rn). Στο Ελληνικό κράτος θεσπίστηκαν δύο νομοθετικές ρυθμίσεις, η πρώτη (ΦΕΚ 194/Α/20-11-2018) αναφέρεται στην προσαρμογή της ελληνικής νομοθεσίας στην Οδηγία 2013/59/Ευρατόμ του Συμβουλίου, της 5ης Δεκεμβρίου 2013, για τον καθορισμό βασικών προτύπων ασφάλειας για την προστασία από τους κινδύνους που προκύπτουν από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες και την κατάργηση των Οδηγιών 89/618/Ευρατόμ, 90/641/Ευρατόμ, 96/29/Ευρατόμ, 97/43/Ευρατόμ και 2003/122/Ευρατόμ (ΕΕ L13/17.1.2014). Καθώς η δεύτερη νομοθετική ρύθμιση (ΦΕΚ 1881/Β/8-5-2020) περιγράφει το εθνικό σχέδιο δράσης για την αντιμετώπιση των μακροπρόθεσμων κινδύνων από την έκθεση στο ραδόνιο.

2.2 Κανονισμοί για το ραδόνιο στο νερό

Η Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας στην οδηγία της για το πόσιμο νερό (E-DWD, EURATOM, 2013) τονίζει πως πρέπει να γίνονται αναλύσεις για τη περιεκτικότητα του νερού σε ραδόνιο. Για νερά που προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση η E-DWD καθορίζει παραμετρικές τιμές, ο Παγκόσμιος Οργανισμός

Υγείας ([WHO, 2008](#)) χρησιμοποιεί κατευθυντήριες γραμμές, ενώ στις Ηνωμένες Πολιτείες χρησιμοποιούνται μέγιστα επίπεδα ρύπων (πίνακας 2.1). Οι κατευθυντήριες γραμμές και οι παραμετρικές τιμές δεν πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ως οριακές τιμές, ή τιμές αναφοράς, όπως αναφέρεται στον WHO και στην E-DWD. Η κάθε χώρα καθορίζει τις παραμετρικές τιμές με βάση την επικινδυνότητα στην ανθρώπινη υγεία από την άποψη της ακτινοπροστασίας (δηλαδή εάν απαιτούνται ή όχι περαιτέρω μέτρα αποκατάστασης). Για τα ύδατα που προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι κατευθυντήριες γραμμές και οι παραμετρικές τιμές είναι σύμφωνα με την E-DWD και κυμαίνονται μεταξύ **100.000 και 1.000.000 Bq/m³**. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα μεταλλικά νερά εξαιρούνται από την οδηγία παρά την τακτική τους κατανάλωση. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, δίνονται δύο διαφορετικά μέγιστα επίπεδα ρύπανσης ([US-EPA, 1999](#)). Η υπέρβαση του μέγιστου επιπέδου ρύπανσης μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία από το ραδόνιο σε εσωτερικούς χώρους (δηλαδή το ραδόνιο που διαφεύγει από το νερό προς τον εσωτερικό αέρα) έτσι απαιτείται μετριασμός στους σχετικούς χώρους. Το μέγιστο επίπεδο ρύπανσης δίνει το ένα δέκατο (14,8 Bq/m³) του συνολικού εσωτερικού ραδονίου που ισοδυναμεί με τη μέση συγκέντρωση ραδονίου σε εξωτερικούς χώρους στις ΗΠΑ. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας στην τρίτη έκδοση του με οδηγίες για το πόσιμο νερό καθορίζει τις κατευθυντήριες γραμμές στα 100.000 Bq/m³ ([WHO, 2008](#)). Ωστόσο, στην έκδοση του [WHO \(WHO, 2011\)](#) για το πόσιμο νερό, δεν έχουν οριστεί κατευθυντήριες γραμμές για το ραδόνιο. Στην Ελλάδα με την Οδηγία 2013/51/Euratom «περί θεσπίσεως απαιτήσεων προστασίας της υγείας του πληθυσμού από ραδιενεργές ουσίες που περιέχονται στο νερό ανθρώπινης κατανάλωσης», **ορίζονται ως επίπεδο δράσης για τη λήψη μέτρων για το πόσιμο νερό τα 100.000 Bq/m³**. Στην περίπτωση που η συγκέντρωση ραδονίου στο πόσιμο νερό είναι μικρότερη από 100.000 Bq/m³ δεν απαιτούνται περιοριστικά μέτρα (Ε.Ε.Α.Ε, 2019). Η ενεργή συγκέντρωση του ραδονίου είναι εξαιρετικά μεταβλητή όχι μόνο μεταξύ των διαφορετικών τύπων νερού, αλλά ακόμη και εντός του ίδιου τύπου. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί κυρίως από την προέλευσή τους, τη λιθολογία των πετρωμάτων που φιλοξενούν, τον υδροφόρο ορίζοντα, καθώς και τις διάφορες διαδικασίες επεξεργασίας, πριν φτάσει στον καταναλωτή (π.χ. απαέρωση-απομάκρυνση αέριας φάσης (degassing), αραίωση, διάσπαση). Σε γενικές γραμμές η κατανάλωση νερού που περιέχει ραδόνιο, μπορεί να θεωρηθεί ασφαλής, δεδομένου

ότι οι τυπικές συγκεντρώσεις ραδονίου των υδάτων είναι κατώτερες των αντίστοιχων διεθνών και ευρωπαϊκών οδηγιών. Ωστόσο, υπάρχουν νερά με ακραίες τιμές, πάνω από τις παραμετρικές τιμές και τις κατευθυντήριες γραμμές, επομένως η συνεχής παρακολούθηση τους είναι απαραίτητη. Οι τεχνικές μέτρησης του ραδονίου που εφαρμόζονται πρέπει να είναι ικανές να μετρούν την ενεργή συγκέντρωση του ραδονίου με αξιοπιστία και ακρίβεια, από τιμές χαμηλότερης της μονάδας και μέχρι αρκετές χιλιάδες Bq/L. Σύμφωνα με μελέτες για την ενεργή συγκέντρωση του ραδονίου, η πλειονότητα των υπό μελέτη πόσιμων και επιφανειακών υδάτων πληρούν τις οδηγίες και τους κανονισμούς (πίνακας 2.2), επομένως, κανένα υψηλό επίπεδο ραδονίου στο νερό δεν προκαλεί κίνδυνο στον καταναλωτή. Αυτό συμβαίνει στα νερά διότι υφίστανται επεξεργασία (απαέρωση) όπου το ραδόνιο απομακρύνεται μαζί με άλλα διαλυμένα αέρια όπως το μεθάνιο. Το ραδόνιο έχει χαμηλότερες πιθανότητες συσσώρευσης και υψηλότερες πιθανότητες διαφυγής όπως συμβαίνει στην περίπτωση των επιφανειακών υδάτων. Η κατάσταση είναι διαφορετική στην περίπτωση των υπόγειων υδάτων, δεδομένου ότι είναι σε επαφή με γεωλογικούς σχηματισμούς πλούσιους σε ουράνιο και σε ορισμένες περιπτώσεις βρίσκονται σε κλειστό σύστημα όπου το ραδόνιο μπορεί να συσσωρευτεί και να φτάσει ενεργή συγκέντρωση αρκετών kBq/L. Τα νερά τείνουν να έχουν μεγαλύτερη συγκέντρωση ραδονίου σε περιοχές με ηφαιστίτες και σε περιοχές τεκτονικών ρηγμάτων.

Πίνακας 2.1. Διεθνής κατευθυντήριες και παραμετρικές τιμές για το ραδόνιο στο πόσιμο νερό (Jobbagy, et al., 2017).

Οδηγία/ Σύσταση	Συγκέντρωση ενεργότητας (Bq/L)	Αναφορά
EYPATOM (E-DWD)	100-1000^a	EYPATOM, 2013
24 Ευρωπαϊκά κράτη μέλη ^β	100	MS National Law
Ιρλανδία, Πορτογαλία, Ισπανία	500	MS National Law
Φινλανδία	1000	MS National Law
WHO επίπεδο καθοδήγησης	100	WHO, 2008
US-EPA μέγιστο επίπεδο ρύπων	-11.1	US-EPA 1999
US-EPA εναλλακτικό μέγιστο	148	

επίπεδο ρύπων		
^a >1000 Bq/L τα διορθωτικά μέτρα χωρίς περαιτέρω εξέταση δικαιολογούνται σε όλες τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. ^b Αυστρία, Βέλγιο, Βουλγαρία, Κροατία, Κύπρος, Τσεχία, Δανία, Εσθονία, Γαλλία, Γερμανία, Ελλάδα, Ιταλία, Λεττονία, Λιθουανία, Λουξεμβούργο, Μάλτα, Ολλανδία, Πολωνία, Ρουμανία, Σλοβακία, Σλοβενία, Σουηδία και Αγγλία.		

Πίνακας 2.2. Παραδείγματα τυπικών συγκεντρώσεων ραδονίου σε διαφορετικά είδη νερού (Jobbagy, et al., 2017).

Τύπος νερού	Συγκέντρωση ραδονίου (Bq/L)	Χώρα, περιφέρεια	Γεωλογία	Αναφορά
Πόσιμα νερά	<3	Σερβία	Δεν υπάρχουν πληροφορίες	Todorovic et al. 2012
	0.3-24	Κύπρος και Ελλάδα (Αττική-Κρήτη)		Nikolopoulos & Louizi, 2008
	1.46-644	Αυστρία	Γρανιτικό πέτρωμα υποβάθρου	Wallner and Steininger, 2007
	<1.3-1800	Γερμανία		Beyermann et al., 2010
	1.9-112.77	Πορτογαλία	Βρύση	Lopes et al., 2005
	0.19-71.1	Αγγλία	Βρύση	Henshaw et al., 1993
Επιφανειακά νερά	<1	Σλοβενία	-	ISO 13164-3, 2013
	5,4			Kobal et al., 1990
Υπόγεια νερά	1-1000	Ισπανία, Γκαρότσα	-	ISO 13164-3, 2013
	0,2-26		Ηφαιστειακά	Moreno et al., 2014
	3043	Πολωνία,	Ηφαιστειακά (π. χ κρυσταλλικά πετρώματα)	Przylibski et al., 2014
	3800	Φινλανδία	Έδαφος (χωρίς	Salonen, 1988

			πληροφορίες)	
	1220	Γερμανία, Ανατολική Βαυαρία	Γρανίτης, γνεύσιος	Trautmannsheimer et al., 2002
	17-3856	Πορτογαλία, Νίσσα	Γρανίτης, ιζήματα	Pereira et al., 2015
	5,8-36,6	Ηνωμένο Βασίλειο, Βόρεια Ιρλανδία	Sherwood ψαμμιτικός υδροφόρος ορίζοντας	Gabbons & Kalin 1997
Πηγές και μη εμφιαλωμένα μεταλλικά νερά	1,4-105	Ισπανία, Νότια Καταλονία	Γρανίτης και ιζηματογενή πετρώματα (π.χ ασβεστόλιθος ψαμμίτης)	Fonollosa et al., 2016
	2,11-120	Ουγγαρία, Ορεινή Μπάλατον	Διάφορα	Somlai et al., 2007
	Μεταλλικό νερό 0,91-1463			Todorovic et al., 2012
	1595	Βουλγαρία		Pressyanov et al., 2007
	1,4-43,7	Λιθουανία	κρυσταλλικό και ιζηματογενές πέτρωμα	Ladygiene et al., 1999
	1,5-181	Ιταλία, Πάντοβα,	ηφαιστειακό πέτρωμα	Cantaluppi et al., 2014
	1029	Ισπανία, Γαλικία	γρανίτης και σχιστόλιθος	Uerena et al., 2013
Νερό πηγαδιών	10-300	Νορβηγία		ISO 13164-3, 2013
	32000		Δεν υπάρχουν πληροφορίες	Strand et al., 1998
	4-63560	Σουηδία, Στοκχόλμη	διάφορα, κρυσταλλικό υπόβαθρο	Skeppstrom & Olofsson, 2006

	47-1600	Βέλγιο,		Bourgoignie et al., 1982
	77000	Φιλανδία	Κυρίως γρανιτικό πέτρωμα υπόβαθρου	Salonen, 1988

2.3 Οι χειρισμοί δειγμάτων και η αποθήκευση τους, πως επηρεάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων

Η δειγματοληψία, η μεταφορά και η αποθήκευση έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην αποτελεσματικότητα των μετρήσεων. Κατά τη δειγματοληψία μπορεί να χαθεί ένα σημαντικό μέρος του ραδονίου. Ο χρόνος αποθήκευσης και το υλικό του δοχείου επηρεάζουν τα αποτελέσματα της μέτρησης, ειδικά αν η ανάλυση πραγματοποιηθεί ημέρες αργότερα αφού συλλέχθηκε το δείγμα. Μελετήθηκαν διάφορα υλικά δοχείων και διαπιστώθηκε ότι το πολυτερεφθαλικό αιθυλένιο (PET) και το πολυγαλακτικό βιοπολυμερές (PLBP) είναι πιο κατάλληλα υλικά από ότι αυτά από πολυαιθυλένιο (HD / LDPE). **Μετά από τέσσερις ημέρες αποθήκευσης σε δοχεία PET / PLBP και σε δοχεία PE παρατηρήθηκε απώλεια ραδονίου της τάξης των 2% και 15-27%, αντίστοιχα. Μετά από 5 ημέρες αποθήκευσης σε γυάλινες φιάλες βρέθηκε απώλεια ραδονίου κάτω της τάξης 5%.** Όταν απαιτείται μεταφορά, πρέπει να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία του νερού καθώς μπορεί να επηρεάσει το επίπεδο απαέρωσης και να οδηγήσει σε απώλεια ραδονίου κατά τη μεταφορά. Για την διατήρηση του ραδονίου στο δείγμα προτείνεται η διατήρηση της θερμοκρασίας σε χαμηλότερα επίπεδα, αλλά άνω των 0°C για την αποφυγή ψύξης του. Η επαφή μεταξύ του δείγματος νερού και του αέρα πρέπει να αποφεύγεται, ειδικά εάν αναμένεται συγκέντρωση ^{222}Rn κάτω από 10.000 Bq/m³. Όταν εφαρμόζεται απαέρωση τότε η αποτελεσματικότητα μεταφοράς ραδονίου θεωρείται ότι είναι κοντά στο 100%, αλλά προτείνεται να προσδιορίζεται για κάθε δείγμα. Υπάρχουν γενικοί παράγοντες σχετικά με, την διαχείριση και την αποθήκευση των δειγμάτων που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Ένα από τα πιο σημαντικά γενικά ζητήματα κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας είναι να αποφεύγεται οποιαδήποτε επαφή μεταξύ του δείγματος και του περιβάλλοντα αέρα. Για να εξασφαλιστεί αυτό, είναι απαραίτητη η

αεροστεγανότητα του δοχείου κατά τη δειγματοληψία και μεταφορά. Το δοχείο πρέπει να είναι κατασκευασμένο κατά προτίμηση από γυαλί ή άλλο μη πορώδες υλικό που πληροί τα πρότυπα δειγματοληψίας αερίων. Εάν χρησιμοποιηθεί φασματομετρία ακτινών-γ αμέσως μετά τη δειγματοληψία τότε το δοχείο πρέπει να είναι κατασκευασμένο από μη αγωγίμο υλικό ώστε να αποφεύγετε η απορρόφηση των θυγατρικών του ραδονίου από το περιβάλλον. Επιπλέον, όταν σε δοχείο δειγματοληψίας έχει κενό χώρο, τότε το ^{222}Rn καταλαμβάνει τον χώρο αυτό. Αυτό αλλάζει τη γεωμετρία μέτρησης του ^{222}Rn και των θυγατρικά του ως εκ τούτου την αποτελεσματικότητα. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί γεμίζοντας όσο το δυνατόν περισσότερο τον κενό χώρο του δοχείου ώστε το ^{222}Rn να παραμένει στο ίδιο το δείγμα (Jobbagy, et al., 2017).

2.4 Τεχνικές μέτρησης ραδονίου

Οι τεχνικές μέτρησης του ραδονίου έχουν χαμηλό κόστος και είναι απλές στην εφαρμογή τους με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται σε πολλά εργαστήρια. Στην αγορά υπάρχουν πολλές αξιόπιστες συσκευές μέτρησης ραδονίου με χαμηλά όρια ανίχνευσης, προσιτή τιμή και απλή λειτουργία. Η προετοιμασία του δείγματος για την ανάλυση του ραδονίου είναι συνήθως απλή, γρήγορη και δεν χρειάζεται εκτεταμένους χημικούς χειρισμούς. Αυτό δίνει ένα πλεονέκτημα πολύ μικρότερου χρόνου εκτέλεσης σε σχέση με άλλες ραδιοαναλυτικές τεχνικές που περιλαμβάνουν ραδιοχημικούς χειρισμούς. Σε ορισμένες περιπτώσεις το αποτέλεσμα του πειράματος μπορεί να παραδοθεί ακόμη και μέσα σε μία ώρα. Υπάρχουν τρεις διαφορετικές μέθοδοι μέτρησης ραδονίου στο νερό (πίνακας 2.3). Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί φασματομετρία ακτινών-γ. Η δεύτερη μέθοδος βασίζεται στην εκροή ραδονίου από το δείγμα (emanometry) και η τρίτη μέθοδος βασίζεται στην μέτρηση υγρών σπινθηρισμών (Liquid Scintillation Counting, LSC). Οι μέθοδοι αυτοί καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τεχνικών ανίχνευσης από απλές και φθηνές έως πιο εξελιγμένες και ακριβές. Εξαιτίας αυτού, η ανάλυση του ραδονίου στο νερό πραγματοποιείται σε περισσότερα εργαστήρια σε σχέση με την ανάλυση άλλων νουκλιδίων. Για αξιόπιστα και συγκρίσιμα αποτελέσματα, συνιστάται να επιλέγεται μία από τις πρότυπες μεθόδους. Η E-DWD επιτρέπει στα κράτη μέλη να χρησιμοποιούν διάφορες στρατηγικές για την μέτρηση της ραδιενέργειας στο νερό που προορίζεται για την

ανθρώπινη κατανάλωση. Υπάρχουν ελάχιστες απαιτήσεις από την E-DWD σχετικά με το όριο ανιχνευσιμότητας ραδονίου και την συχνότητα δειγματοληψίας του νερού. Η επιλεγμένη τεχνική μέτρησης ραδονίου πρέπει να είναι ικανή ώστε να μετράει την ενεργή συγκέντρωση του ραδονίου με όριο ανίχνευσης στο 10% (στα 100.000 Bq/m³ να υπολογίζονται τα 10.000 Bq/m³). Η ετήσια συχνότητα δειγματοληψίας και ο αριθμός των δειγμάτων ορίζονται από τα κράτη μέλη και εξαρτώνται από τον όγκο του νερού που διανέμεται ή παράγεται κάθε μέρα εντός κάθε ζώνης εφοδιασμού. Η ευκολότερη τεχνική είναι η άμεση μέτρηση χρησιμοποιώντας φασματομετρία ακτινών-γ, χωρίς μεταφορά φάσης. Όταν εμπλέκεται η μεταφορά φάσης, το ²²²Rn μεταφέρεται από την υγρή φάση στον αέρα. Αυτό πραγματοποιείται με την τεχνική της εκροής ραδονίου από το νερό. Όταν πρόκειται για την μέτρηση υγρού σπινθηρισμού, ο στόχος προορισμού είναι μία οργανική φάση. Επιπλέον μπορεί να γίνει προσρόφηση του ραδονίου σε στερεά πορώδη επιφάνεια, όπως σε μία επιφάνεια ενεργού άνθρακα, που μετά επιτρέπει την μέτρηση του ραδονίου με φασματομετρία ακτινών-γ. Οι μετρήσεις στο εργαστήριο απαιτούν προσεκτική δειγματοληψία και στη συνέχεια μεταφορά υπό καλά καθορισμένες συνθήκες. Λόγω του μικρού χρόνου ημιζωής του ²²²Rn, που είναι 3.8232 ημέρες, η διόρθωση της διάσπασης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν αρχίζουν οι μετρήσεις ή πιθανώς όταν υπάρχουν καθυστερήσεις μετά τη δειγματοληψία αλλά και για μεθόδους όπου απαιτούνται χρονοβόρες μετρήσεις. Δείγματα με χαμηλή ενεργή συγκέντρωση ραδονίου πρέπει να μετρώνται επί τόπου ή στο εργαστήριο σε σύντομο χρονικό διάστημα από την συλλογή του δείγματος (π.χ. εντός ενός χρόνου ημιζωής ²²²Rn).

2.4.1 Φασματομετρία ακτινών-γ

Στη φασματομετρία ακτινών-γ, η ενεργή συγκέντρωση του ²²²Rn προκύπτει από τη μέτρηση των θυγατρικών του, ²¹⁴Bi και ²¹⁴Pb. Τα θυγατρικά του ραδονίου είναι βραχύβια και έρχονται σε ραδιενεργή ισορροπία εντός 3 ωρών. Ωστόσο αν το ²²⁶Ra είναι παρόν στο δείγμα, τότε παράγονται και άλλες ποσότητες ²²²Rn και καθίσταται απαραίτητο να εκτελεστεί μια δεύτερη μέτρηση μετά που θα επέλθει ισορροπία μεταξύ των δύο στοιχείων. Δεδομένου ότι ο χρόνος ημιζωής του ²²²Rn είναι σχεδόν 4 ημέρες, μετέπειτα από ένα σημαντικό χρονικό διάστημα (προτιμότερα 10 χρόνοι ημιζωής) μπορεί να εφαρμοστεί αυτή η διόρθωση. Ο ανιχνευτής σπινθηρισμού

στερεάς κατάστασης ή ανιχνευτής Γερμανίου υψηλής καθαρότητας (HPGe) είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι ανιχνευτές ακτινών-γ. Ωστόσο, λόγω της κακής ανάλυσης οι ανιχνευτές στερεάς κατάστασης που είναι φτιαγμένοι από σπινθηριστές ιωδιούχου νάτριου (NaI) χρησιμοποιούνται για απλό έλεγχο, ενώ οι ανιχνευτές Γερμανίου υψηλής καθαρότητας HPGe είναι πιο κατάλληλοι για ποιοτική και ποσοτική ανάλυση. Πρέπει να τονιστεί ότι πυκνότητα του δείγματος και η ομοιογένεια του επηρεάζονται από την θερμοκρασία του νερού, τα αιωρούμενα υλικά και τις φυσαλίδες αέρα, με συνέπεια την μείωση της αποτελεσματικότητας της ανίχνευσης.

Εάν το περιεχόμενο ^{226}Ra στο δείγμα είναι υψηλό, τότε οι μετρήσεις θα πρέπει να επαναληφθούν μετά από δέκα ^{222}Rn ημιζωές (38 ημέρες), με συνέπεια τα αποτελέσματα της ανάλυσης να καθυστερούν σημαντικά. Επιπλέον τα αποτελέσματα της μέτρησης επηρεάζονται από το ραδόνιο που εκπέμπεται από τα οικοδομικά υλικά στον αέρα του εργαστηρίου. Για να ξεπεραστεί αυτό επιβάλλεται η χρήση αδρανούς αερίου χωρίς ραδόνιο για τον καθαρισμό του περιβαλλοντικού αέρα του ανιχνευτή σύμφωνα με δεύτερο μέρος του πρότυπου ISO 13164 ([ISO 13164-3, 2013](#)).

2.4.2 Εκροή ραδονίου από το δείγμα νερού –(emanometry)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην απομάκρυνση της αέριας φάσης (degassing) δειγμάτων ακολουθούμενη από την ανίχνευση σωματιδίων-α με διάφορα συστήματα ανίχνευσης. Όταν σε ένα δείγμα νερού απομακρύνεται η αέρια φάση, το ^{222}Rn μεταφέρεται από την υγρή φάση σε ένα κελί μετρήσεων είτε με ροή αδρανούς αερίου είτε με κυκλοφορία αέρα ή κενού αέρος. Αρκετές τεχνικές ανίχνευσης μπορούν να εφαρμοστούν για τον προσδιορισμό της ενεργής συγκέντρωσης του ραδονίου στην αέρια φάση συμπεριλαμβανομένων των κελιών σπινθηρισμού όπως το κελί Lucas, τον ανιχνευτή πυριτίου (ημιαγωγού) και του θαλάμου ιονισμού. Η τεχνική αυτή είναι ευαίσθητη στη θερμοκρασία του νερού και μπορεί να επηρεάσει το ποσοστό απομάκρυνσης αερίων κατά τη μεταφορά του ([ISO 13164-3, 2013](#)). Πρέπει να ελεγχθεί πιθανή επιμόλυνση του ανιχνευτή για να διασφαλιστεί ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί ανάλυση για χαμηλά επίπεδα ραδονίου και να μην συσσωρευτούν θυγατρικά προϊόντα με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (π.χ. ^{210}Po). Μερικά δείγματα νερού μπορούν να περιέχουν υψηλά επίπεδα ^{220}Rn (θορόνιο) που μπορούν να μεταφερθούν στο σύστημα ανίχνευσης. Μια λύση είναι να τοποθετηθεί το δείγμα

νερού σε κελί απομάκρυνσης αερίων και να εισαγάγετε αέρας χωρίς ραδόνιο ή αδρανές αέριο στο κλειστό σύστημα. Μια άλλη προσέγγιση είναι η έγχυση μίας κατάλληλης ποσότητας δείγματος σε κελί σπινθηρισμού κενού αέρος με σύριγγα. Λόγω του κενού αέρος, το ραδόνιο απελευθερώνεται από το δείγμα νερού και έπειτα με την εισαγωγή αερίου χωρίς ραδόνιο ή του αδρανούς αερίου η πίεση ρυθμίζεται στην τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης. Τρεις ώρες μετά την έγχυση, το κελί σπινθηρισμού είναι έτοιμο για ανάλυση.

2.4.3 Μέτρηση υγρών σπινθηρισμών - Liquid scintillation counting (LSC)

Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στην αφαίρεση του ραδονίου από το νερό στο μη αναμίξιμο μίγμα σπινθηρισμών. Αρχικά ένας απαραίτητος όγκος μίγματος εισάγεται σε φιαλίδιο. Λαμβάνεται δείγμα κάτω από την επιφάνεια και εισάγεται αργά στο φιαλίδιο LSC με μια αεροστεγή σύριγγα. Το εξίσου αεροστεγές φιαλίδιο, ανακινείται καλά και έπειτα αποθηκεύεται για τρεις ώρες σε ένα σκοτεινό δωμάτιο με σταθερή θερμοκρασία. Έπειτα το δείγμα είναι έτοιμο για μετρήσεις. Το ^{222}Rn και τα βραχύβια προϊόντα του μετρώνται επιλέγοντας την λειτουργία alpha b beta ή μόνο την λειτουργία alpha του φασματομέτρου LS. Προκειμένου να ληφθούν σωστά αποτελέσματα απαιτείται η χρήση φιαλιδίων σπινθηρισμού των 20 mL για ανάλυση LSC, για ένα δείγμα νερού όγκου μεταξύ 500 και 900 mL. Η μέθοδος LSC σε ένα επιλεκτικό περιβάλλον έχει μεγάλη σημασία, καθώς μπορεί εύκολα να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα. Μπορεί επίσης να εμφανιστεί φωταύγεια και χημιφωταύγεια, αλλά η τελευταία κυρίως σε περίπτωση μονοφασικών μιγμάτων. Η φωταύγεια μπορεί να αποφευχθεί με την αποθήκευση του φιαλιδίου για λίγες ώρες σε σκοτεινό μέρος πριν αρχίσουν οι μετρήσεις. Μια άλλη πηγή σφάλματος είναι η βαθμονόμηση. Συνήθως για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται το ράδιο ως πρότυπο διάλυμα με το επιλεγμένο μίγμα υγρού σπινθηρισμού. Ωστόσο, εάν χρησιμοποιείται ως πρότυπο διάλυμα ένα παλιό διάλυμα (^{226}Ra) ραδίου (>5 ετών) τότε ο (^{210}Pb) και οι πρόγονοι του αφαιρούνται μαζί με το ραδόνιο (^{222}Rn) που οδηγεί σε εσφαλμένη απόδοση της βαθμονόμησης.

2.5 Συντελεστής αβεβαιότητας και η επαλήθευση των μεθόδων

Όσον αφορά τους συντελεστές αβεβαιότητας, ενδέχεται να ποικίλλουν σε ένα ευρύ φάσμα ακόμη και σε κανονικές συνθήκες (από <1% έως 100% σε ορισμένες εξαιρετικές περιπτώσεις). Τα εργαστήρια πρέπει να έχουν την ικανότητα να εντοπίζουν τις πηγές αβεβαιότητας και να τις ποσοτικοποιούν για να δώσουν ένα ρεαλιστικό υπολογισμό της αβεβαιότητας. Συνήθως οι κύριοι συντελεστές αβεβαιότητας είναι τα ακόλουθα στοιχεία και αναφέρονται κατά σειρά σημασίας: η καταμέτρηση στατιστικών στοιχείων, η βαθμονόμηση οργάνου (αποδοτικότητα μέτρησης), η αποδοτικότητα μεταφοράς όταν εμπλέκεται η απαέρωση, η αποδοτικότητα βαθμονόμησης πηγών, και σε μικρότερο βαθμό, ο υπολογισμός διάσπασης ραδονίου σε ημερομηνία αναφοράς. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η δειγματοληψία και η προετοιμασία του δείγματος είναι σφάλματα και όχι αβεβαιότητες που εν τέλει επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα. Οι αβεβαιότητες σχετικά με τον χρόνο μέτρησης, την πίεση και τη θερμοκρασία δηλώνεται ότι έχουν παραμεληθεί (ISO 13164). Το ISO 13164-1: 2013 αναφέρει ότι η επαλήθευση της μεθόδου είναι ουσιαστικό μέρος της εργαστηριακής εργασίας και πρέπει να γίνεται σε τακτική βάση με την ανάλυση υλικών αναφοράς. Επιπλέον, στην μέθοδο πρέπει να ελεγχθεί η ακρίβεια και η επαναληψιμότητα της. Αυτό το πρότυπο ISO τονίζει επίσης τη σημασία της συμμετοχής σε ενδοεργαστηριακές συγκρίσεις ή διεργαστηριακών δοκιμών.

2.6.1 Βαθμονόμηση οργάνων

Για να βελτιωθούν οι τρόποι βαθμονόμησης υπήρξαν κάποιες διεθνείς προσπάθειες για να δημιουργηθούν αξιόπιστα, πρότυπα ραδονίου και περεταίρω να αναπτύχθηκαν δευτερογενή πρότυπα. Εκτός από την κοινή προσέγγιση βαθμονόμησης ^{226}Ra και τις ιδιαιτερότητες του, στην πράξη τυποποιημένη πηγή ραδονίου-νερού χρησιμοποιείται ήδη ως μέθοδος βαθμονόμησης.

2.6.2 Η βαθμονόμηση στην Φασματομετρία ακτινών-γ

Η βαθμονόμηση του ανιχνευτή γερμανίου υψηλής καθαρότητας μπορεί να εκτελεστεί πειραματικά ή χρησιμοποιώντας την προσομοίωση Monte Carlo. Το ^{226}Ra ως διάλυμα αναφοράς με γνωστή ενεργή συγκέντρωση τοποθετείται σε αεροστεγές

δοχείο. Μετά την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ ^{226}Ra και ^{222}Rn , γίνεται η ανάλυση μέσω φασματομετρίας ακτινών-γ. Η απόδοση μέτρησης καθορίζεται από την ενεργειακή περιοχή μεταξύ των δύο βραχύβιων προϊόντων αποσύνθεσης του ^{222}Rn που είναι το ^{214}Pb και το ^{214}Bi . Πρέπει να σημειωθεί ότι για τον υπολογισμό της αποδοτικότητας στη συγκεκριμένη ενέργεια πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι πιθανότητες εκπομπής ακτινών-γ. Το κενό δείγμα παρασκευάζεται ζυγίζοντας την ίδια μάζα απαερωμένου, αποσταγμένου ή απιονισμένου νερού σε αεροστεγώς δοχείο και υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως το πρότυπο βαθμονόμησης. Για την προσομοίωση με τη μέθοδο Monte Carlo χρειάζεται να εισαχθούν πολλές παραμέτροι όπως η γεωμετρία του δοχείου, η απόσταση πηγής ανιχνευτή, το υλικό του δείγματος συγκράτησης, το πάχος του τοιχώματος και τέλος η κατανομή της ραδιενέργειας στο δείγμα βαθμονόμησης.

Πίνακας 2.3 : Σύνοψη των τεχνικών χαρακτηριστικών μέτρησης ραδονίου νερού. (Jobbagy, et al., 2017).

Σύστημα ανίχνευσης	Αποδ. μέτρησης	Χαμηλότερο εφικτό όριο ανίχνευσης (Bq/L) ^a	Αβεβ. μέτρησης (K=1)	Χαρ. όγκος δείγματος (L)	Επεξεργασία δειγμάτων	Χρόνος (ώρες)	In-situ μέτρηση
Φασματομετρία ακτινών-γ	1,5% ^c	10	5-15%	0,1-2	Όχι	4-13	Όχι
Θάλαμος ιονισμού		0,3	5-12%	0,05-0,2	Απαέρωση	≤1	Ναι
Μετρητής υγρών σπινθηρισμών (LSC)	280-300% ^b	0,05-1	=10%	0,01-2	Εξαρτάται από το μη αναμίξιμο δείγμα	3-8	Ναι
Σπινθηρισμός /κελί Lucas	15-90%	0,3-1	<10%	0,05-1	Απαέρωση	1-3	Ναι
Ανιχνευτής πυριτίου		0,04-0,4	5-12%	0,1-0,4	Απαέρωση	≤1	Ναι
				1-2	Διείσδυση	Μερικές ώρες	Ναι

^a E-DWD όριο ανίχνευσης: 10% της παραμετρικής τιμής του 100 Bq/L, που είναι 10 Bq/L.

^b Συμπεριλαμβανομένων ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Po .

^c Απόλυτη προσομοίωση της απόδοσης για ένα δείγμα του 1 L στα 609 keV στο σημείο αιχμής.

2.6.3 Η βαθμονόμηση στην εκροή ραδονίου από το νερό –(emanometry)

Η απόδοση μέτρησης των σωματιδίων-άλφα ενός κελιού σπινθηρισμού μπορεί να προσδιοριστεί με τη χρήση ραδονίου σε θαλάμους βαθμονόμησης αέρα με την καθιέρωση της ενεργής συγκέντρωσης του ^{222}Rn . Το ραδόνιο μεταφέρεται από το θάλαμο βαθμονόμησης στο εκκενωμένο κελί σπινθηρισμού. Ακολουθώντας μια διαδικασία ρουτίνας μπορεί να γίνουν οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί. Εάν εφαρμόζεται απαέρωση για την μεταφορά ραδονίου από την υδάτινη φάση προς τη ροή του αέρος, τότε θα πρέπει να καθοριστεί η αποτελεσματικότητα είτε της απόδοσης μεταφοράς ραδονίου για τον χρόνο απαέρωσης είτε για τον χρόνο επίτευξης σχεδόν 100% απαέρωσης. Μερικοί ανιχνευτές (π.χ. βασίζονται σε θάλαμος ιονισμού) μπορούν να βαθμονομηθούν σύμφωνα με τις εθνικές μετρολογικές εγκαταστάσεις βαθμονόμησης ραδονίου.

2.6.4 Η βαθμονόμηση στην μετρητή υγρών σπινθηρισμών (LSC)

Για την προετοιμασία πηγών βαθμονόμησης ^{226}Ra ή ^{222}Rn , μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα πρότυπο διάλυμα εάν υπάρχει διαθέσιμο. Εάν χρησιμοποιείται το πρότυπο ^{222}Rn τότε η πηγή βαθμονόμησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατευθείαν μετά από τρεις ώρες από την παρασκευή του. Στον οργανικό σπινθηριστή εκχυλίζεται μόνο ^{222}Rn ενώ το ^{226}Ra παραμένει στην υδάτινη φάση. Επομένως, δεν επηρεάζει την αποδοτικότητα της βαθμονόμησης της μέτρησης. Εφόσον το νερό και άλλα διαλυμένα υλικά δεν μεταφέρονται στο μίγμα σπινθηρισμού εκτός από το ^{222}Rn , δεν απαιτείται διόρθωση λόγω απόσβεσης. Η διαδικασία βαθμονόμησης είναι η ακόλουθη. Γνωστή μάζα πρότυπου διαλύματος μεταφέρεται σε φιαλίδιο σπινθηρισμού. Στη συνέχεια προστίθεται απαερωμένο, αποσταγμένο ή απιονισμένο νερό μέχρι τη προκαθορισμένη μάζα και προστίθεται στο μίγμα σπινθηρισμού. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται πρότυπο ^{226}Ra το δείγμα πρέπει να αποθηκευτεί για να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ ^{226}Ra και ^{222}Rn . Πριν ξεκινήσει η καταμέτρηση LSC πρέπει να βελτιστοποιηθούν οι συνθήκες καταμέτρησης. Επίσης χρησιμοποιούνται μετρήσεις με διάκριση alpha-beta ή μέτρηση alpha b beta. Η επιλογή εξαρτάται από το εφικτό όριο ανίχνευσης που είναι χαμηλότερο σε περίπτωση επιλογής διάκρισης alpha-beta. Η γραμμικότητα της μεθόδου πρέπει να ελέγχεται καλύπτοντας το εύρος λειτουργίας. Τα κενά δείγματα παρασκευάζονται με τον ίδιο τρόπο όπως οι πηγές βαθμονόμησης, χρησιμοποιώντας την ίδια ποσότητα

απαερωμένου (degassed), αποσταγμένου ή απιονισμένου νερού, αλλά η διαφορά είναι ότι το ραδιενεργό πρότυπο δεν προστίθεται στην λύση.

2.7 Συσκευές μέτρησης της συγκέντρωσης του ραδονίου και ραδίου στην Ελλάδα από το Ι.Γ.Μ.Ε

Στην Ελλάδα πραγματοποιήθηκαν από το ΙΓΜΕ μία σειρά μετρήσεων για το περιεχόμενο ράδιο και ραδόνιο στα ιαματικά νερά. Κατά την περίοδο 2005-2007 χρησιμοποιήθηκε το όργανο DURRIDGE RAD 7 που είναι ένα φορητό αυτόματο αναλυτή ραδονίου στον αέρα που με κατάλληλο επιπρόσθετο εξοπλισμό που κάνει μετρήσεις στο νερό και στο έδαφος. Το όργανο DURRIDGE RAD 7 ανιχνεύει άλφα σωματίδια που εκπέμπονται από το ραδόνιο χωρίς παρεμβολές από άλλες ακτινοβολίες. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε θάλαμο πυριτίου στερεάς κατάσταση 700ml. Απαιτείται η επιπρόσθετη χρήση αφυγραντή.

Για τις μετρήσεις που έγιναν το 2008 χρησιμοποιήθηκε το όργανο SARAD RTM 1688-2 (εικόνα 2.1) με μία ενσωματωμένη αντλία. Οι μετρήσεις γίνονται με ευκολία τόσο στο έδαφος όσο και στα ρευστά εξαιτίας της αντλίας. Το δείγμα αναρροφάται από ενσωματωμένη στη συσκευή αντλία (0.25 l/min) και η μέτρηση γίνεται σε θάλαμο με ανιχνευτή ημιαγωγού. Το μετρούμενο μέγεθος είναι η ενεργότητα σε Bq/m^3 ενώ ταυτόχρονα γίνεται μέτρηση και καταγραφή στη μνήμη της συσκευής των ενδείξεων από τα επίσης ενσωματωμένα στη συσκευή αισθητήρια θερμοκρασίας και ατμοσφαιρικής πίεσης (Ι.Γ.Μ.Ε, 2009). . Μέσω του λογισμικού υπάρχει επιλογή μεταξύ μονάδων SI (Bq/m^3 , °C, mbar) και US (pCi/L, °F, inHg).



Εικόνα 2.1. Το όργανο SARAD RTM 1688-2 που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ραδονίου.

Αρχή λειτουργίας

Η μέτρηση ραδονίου (^{222}Rn) γίνεται μέσω της μέτρησης των βραχύβιων θυγατρικών του, τα οποία παράγονται από τις διασπάσεις του ραδονίου μέσα στο μετρητικό θάλαμο της συσκευής. Αμέσως μετά από κάθε διάσπαση οι υπολειπόμενοι πυρήνες ^{218}Po , φορτίζονται θετικά για μικρό χρονικό διάστημα διότι κάποια ηλεκτρόνια «σκιάζονται» από τα εκπεμπόμενα σωματίδια α - ακτινοβολίας. Τα θετικά αυτά ιόντα οδηγούνται από τις ηλεκτρικές δυνάμεις πάνω στην επιφάνεια ενός ανιχνευτή ημιαγωγού. Ο αριθμός των ιόντων ^{218}Po που συλλέγονται πάνω στην επιφάνεια του ανιχνευτή είναι ανάλογα της συγκέντρωσης ραδονίου στο θάλαμο μέτρησης.

Το ^{218}Po έχει χρόνο ημίσειας ζωής μόνο 3.05 min και περίπου 50% όλων των σωματιδίων που εκπέμπονται από όλες τις διασπάσεις καταγράφονται από τον ανιχνευτή. Η ισορροπία μεταξύ διασπάσεων ραδονίου και δραστηριότητας ^{218}Po στον ανιχνευτή επέρχεται μετά από περίπου 5 χρόνους υποδιπλασιασμού, δηλαδή μετά από 15 min περίπου. Αυτός είναι και ο ελάχιστος απαιτούμενος χρόνος απόκρισης για τη μέτρηση ραδονίου.

Η αλυσίδα διάσπασης συνεχίζει με τις β - εκπομπές ^{214}Pb και ^{214}Bi και ακολουθεί η α - εκπομπή ^{214}Po . Αυτό σημαίνει ότι για κάθε διάσπαση ^{218}Po ακολουθείται από μια ακόμα ανιχνεύσιμη, από τον ανιχνευτή - α , διάσπαση ^{214}Po , για τη μέτρηση του οποίου όμως πρέπει να περάσουν περίπου 3 ώρες λόγω του χρόνου

υποδιπλασιασμού των προηγούμενων νουκλιδίων. Όταν το RTM-1688-2 ρυθμίζεται στη λειτουργία *Slow*, τότε μετράει τις διασπάσεις ^{218}Po και ^{214}Po , ενώ στη λειτουργία *Fast* μετράει μόνο ^{218}Po . Η λειτουργία *Fast* επιλέγεται για ταχεία απόκριση σε γρήγορες μεταβολές της συγκέντρωσης, ενώ η αρχή λειτουργία *Slow* δίνει διπλάσια τουλάχιστον ευαισθησία και καλύτερη ακρίβεια της μέτρησης.

Η διαδικασία της μέτρησης: Η συσκευή, για τη μέτρηση των υδάτινων δειγμάτων, προγραμματίστηκε σε *fast mode* με χρόνο ολοκλήρωσης 20 min. Το δείγμα νερού τοποθετείται στην ειδική φιάλη (*Bubble*), με τρόπο τέτοιο ώστε να μη δημιουργούνται φυσαλίδες. Η φιάλη κλείνεται και το δείγμα παραμένει για να ψυχθεί στη θερμοκρασία της συσκευής, έτσι ώστε να αποφευχθούν οι συμπυκνώσεις κατά τη μέτρηση που μπορεί να αλλοιώσουν το αποτέλεσμα. Έπειτα γίνονται οι συνδέσεις των φιαλιδίων με τη συσκευή από τα σωληνάκια *PVC* και θέτεται η συσκευή σε λειτουργία, έτσι ώστε ο αέρας να ανακυκλοφορεί συνεχώς σε κλειστό κύκλωμα μέσω της φιάλης. Μετά από 20 min έχει επιτευχθεί ισορροπία συγκέντρωσης ραδονίου στο νερό και τον αέρα και εξάγεται το αποτέλεσμα της μέτρησης (από Κυρκιμτζή 2013).

2.8 Τα οφέλη του ραδονίου στην ανθρώπινη υγεία

Η θεραπεία με ραδόνιο είναι μια φυσική θεραπεία που συνήθως χορηγείται ταυτόχρονα με φαρμακευτική αγωγή και που πραγματοποιείται σε ιαματικά λουτρά, σε σπηλιές και εγκαταλειμμένα υπόγεια ορυχεία. Σε αυτές τις περιοχές το ραδόνιο είναι είτε διαλυμένο στο νερό είτε συσσωρευμένο στον αέρα. Κατά την διάρκεια της θεραπείας εισέρχεται στο ανθρώπινο σώμα μέσω της έκθεσης σε αυτό, δηλαδή με ποσιθεραπεία, με θεραπεία θερμού ή ξηρού *spr* και εισπνοθεραπεία. Όλα τα δεδομένα συμφωνούν σχετικά με την αναλγητική δράση του ραδονίου στο σώμα κατά τη διάρκεια της θεραπείας. Η αναλγητική δράση διατηρείται για μήνες μετά τις θεραπείες και σχετίζεται με την αύξηση των επιπέδων β-ενδορφίνης. Εκτός από την αναλγητική δράση φαίνεται να ενισχύει την αυξημένη ανάπτυξη των τριχοειδών αγγείων και την απέκκριση του ουρικού οξέος, διεγείρει την παραγωγή αδρεναλίνης, μειώνει τη σύνθεση του DNA, ενισχύει τους μηχανισμούς επιδιόρθωσης του DNA και το ανοσοποιητικό σύστημα, ενισχύει τους μηχανισμούς του αμυντικού συστήματος και τη λειτουργία των γεννητικών οργάνων. Η θεραπεία με ραδόνιο ενδείκνυται: για τις φλεγμονώδεις παθήσεις των αρθρώσεων και της σπονδυλικής στήλης (π.χ. ρευματοειδής αρθρίτιδα, ψωρίαση και ψωριασική αρθρίτιδα,

αγκυλοποιητική σπονδυλίτιδα), για τη νευρίτιδα, τη νευραλγία καθώς και για τις εκφυλιστικές ασθένειες της σπονδυλικής στήλης και των αρθρώσεων. Επιπλέον είναι απαραίτητη για την φυσιολογική λειτουργία του οργανισμού, όπως οι βιταμίνες και τα μέταλλα, σύμφωνα με τον ερευνητή Δρ. Luckey. Ο ίδιος θεωρεί ότι ο σύγχρονος άνθρωπος με τη λιγοστή του επαφή με τον ήλιο και τη φύση υποφέρει από «έλλειψη ραδιενέργειας» (από Κουφάκης, 2018, σ.56). Η θεραπεία με ραδόνιο είναι φαρμακευτική θεραπεία όπου η δραστική ουσία είναι γνωστή, ωστόσο, δεν έχει προσδιοριστεί ούτε η δόση για θεραπευτική δράση ούτε η διάρκεια της απαιτούμενης θεραπείας. Κατά τη διάρκεια των θεραπειών η δόση του ραδονίου ποικίλλει σημαντικά. Δεδομένου ότι εφαρμόζεται ως φυσική θεραπεία δεν εφαρμόζεται ποτέ από μόνη της αλλά σε συνδυασμό με άλλες δραστικές ουσίες. Για παράδειγμα σε περίπτωση της θεραπείας σε ιαματικά λουτρά χορηγούνται ορυκτά συστατικά καθώς και μικρο-και μακρο-στοιχεία διαλυμένα στο νερό. Στις σπηλιές αξιοποιείται η βακτηριακή/ικη στείρωση του αέρα, η υψηλή περιεκτικότητα του αέρα σε διοξείδιο του άνθρακα, τα διαλυμένα ιόντα (Mg^{2+} , Ca^{2+}) στο συνεχώς ανανεωμένο αεροζόλ, η έλλειψη γρήγορων ατμοσφαιρικών μετώπων, οι ηλεκτρικές και βαρομετρικές αλλαγές κτλ. (Nagy, et al, 2008).

Κεφάλαιο 3: Συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων

3.1 Δεδομένα από την έκθεση του τ. ΙΓΜΕ υδροσημείων που περιέχουν συγκεντρώσεις ραδονίου

Η πρώτες προσεγγίσεις σχετικές με τον χημισμό των υδάτων της Ελλάδος ανάγονται στην εποχή του κυβερνήτη της χώρας Καποδίστρια. Η συστηματική όμως προσέγγιση και οργάνωση των ιαματικών πηγών ξεκίνησε με τις πρώτες επιστημονικές εργασίες χημικών, φαρμακοποιών και γιατρών της χώρας μας στις αρχές του 20ου αιώνα. Στο τότε Υπουργείο Εθνικής Οικονομίας ιδρύθηκε το 1918, για πρώτη φορά, τμήμα για τις ιαματικές πηγές. Το 1936 οι ιαματικές πηγές περιήλθαν στην δικαιοδοσία του τότε υφυπουργείου Τύπου και Τουρισμού. Το 1928 εκδόθηκε η πρώτη ολοκληρωμένη καταγραφή των μεταλλικών πηγών της χώρας (Λέκκας, 1938). Από τις 752 μεταλλικές πηγές που περιγράφηκαν, στην Κρήτη είχαν καταγραφεί 101 πηγές από τις οποίες το χρονικό εκείνο διάστημα ήταν ενεργές 38 πηγές. Το 1945 η ευθύνη για τις ιαματικές πηγές της χώρας μεταβιβάστηκε στην Γενική Γραμματεία Τουρισμού και από το 1950 μέχρι και σήμερα είναι στις αρμοδιότητες του Ελληνικού Οργανισμού Τουρισμού (ΕΟΤ), το οποίο ιδρύθηκε τον ίδιο χρόνο και υπάγεται στο Υπουργείο Προεδρίας.

Σύμφωνα με τον Βογιάννη (2005) στην εργασία «Το Ραδόνιο στο περιβάλλον της Λέσβου» (Ευσταθίου και Παπαναστασίου, 2000), έγιναν οι πρώτες σχετικές μετρήσεις που έδειξαν και την ύπαρξη ραδονίου σε πηγές της Λέσβου, που σε ορισμένες περιπτώσεις είχαν υψηλές τιμές και ήταν το έναυσμα να ξεκινήσει η έρευνα αυτή στις ιαματικές πηγές της Λέσβου.

Στην συνέχεια η Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών – Ε.Α.Γ.Μ.Ε (τέως Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών - Ι.Γ.Μ.Ε) πραγματοποίησε μία ευρύτερη μελέτη με τίτλο "Περιοδική παρακολούθηση Ιαματικών πηγών Ελλάδας, *Ολοκληρωμένη ποσοτική και ποιοτική μελέτη των θερμομεταλλικών υδάτων της χώρας*" με σκοπό την μελέτη των κυριότερων θέρμων και μεταλλικών υδάτων στην Ελλάδα (Αθανασούλη κα., 2009), κατά την διάρκεια της οποίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις που ξεκίνησαν από το 2005 και ολοκληρώθηκαν το 2008. Το υπόεργο κάλυψε τις περισσότερες περιοχές του Ελλαδικού

χώρου, εκτός Κρήτης και Ιονίων νήσων λόγω μειωμένου ενδιαφέροντος και μικρού αριθμού ιαματικών πηγών. Στην Ελλάδα αναβλύζει ιαματικό μεταλλικό νερό από 752 διαφορετικές πηγές σύμφωνα με την καταγραφή από τον Νικόλαο Γ. Λέκκα (1938). Ο συνολικός αριθμός των υδροσημείων, από όπου πάρθηκαν δείγματα και έγιναν μετρήσεις, είναι 239 υδροσημεία εκ των οποίων τα 64 μελετήθηκαν λεπτομερέστερα. Τα πρώτα 58 ανήκουν στα μέχρι τώρα από τον ΕΟΤ αναγνωρισμένα λουτροθεραπευτήρια, παρουσιάζουν και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον τόσο από τουριστικής όσο και οικονομικής άποψης. Σε αυτά τα υδροσημεία είναι καταγεγραμμένες 160 τιμές συγκέντρωσης ραδονίου από δείγματα νερού από πηγές και 75 από γεωτρήσεις. Στον πίνακα 3.1 φαίνεται ότι η μέγιστη συγκέντρωση ραδονίου καταγράφηκε στην πηγή του Ασκληπιού στην Ικαρία και ισούται με $6.289.100 \text{ Bq/m}^3$ ενώ πολλές είναι οι πηγές με ελάχιστη συγκέντρωση ραδονίου.

Πίνακας 3.1. Τα δείγματα με τις μέγιστες συγκεντρώσεις ραδονίου στην Ελλάδα.

Αριθμός δείγματος	Ονομασία πηγής	Ημερομηνία μέτρησης	Rn ²²² ελάχιστη τιμή (Bq/m ³)	Rn ²²² μέγιστη τιμή (Bq/m ³)
Aig-041-04	Πηγή Απόλλωνος Ικαρίας	22/06/2006	2.846.800	4.199.400
Aig-045-08	Πηγή Ασκληπιού Ικαρίας	14/10/2008	3.250.200	6.289.100
Aig-075-01	Πηγή Θερμία Σαντορίνης	12/04/2007	2.906.400	

3.2 Δεδομένα από υδροσημεία πηγών

Από τον συνολικό αριθμός των 77 των υδροσημείων που παρουσιάζουν τιμές συγκέντρωσης ραδονίου οι 50 έχουν πάνω από μία μέτρηση, ενώ οι υπόλοιπες 27 έχουν μία μέτρηση ραδονίου. Έτσι για επεξεργασία αρχικά από το σύνολο των 239 υδροσημείων επιλέχτηκαν **οι 50 πηγές** για τις οποίες υπήρχαν τουλάχιστον 2 μετρήσεις για τη συγκέντρωση του ραδονίου. Για κάθε πηγή βρέθηκε η ελάχιστη, η μέγιστη συγκέντρωση ραδονίου και από αυτές υπολογίστηκε η μέση τιμή της

συγκέντρωσης ραδονίου. Με βάση αυτές τις τιμές κατασκευάστηκαν ιστογράμματα σε λογαριθμική κλίμακα καθώς και ιστογράμματα σε κλίμακα που βασίζεται στην κατάταξη που θεσπίστηκε στο ΦΕΚ 2997/6-11-2014.

Σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 περί «διαδικασίας αναγνώρισης ιαματικών φυσικών πόρων» και τον πίνακα του παραρτήματος IV περί χαρακτηρισμού ιαματικών φυσικών πόρων, κριτήριο 5, σχετικά με την **συγκέντρωση του Rn²²² των ιαματικών πηγών**, οι πηγές στον Ελλαδικό χώρο κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες με βάση την συγκέντρωσή τους σε ραδόνιο (Bq/m³).

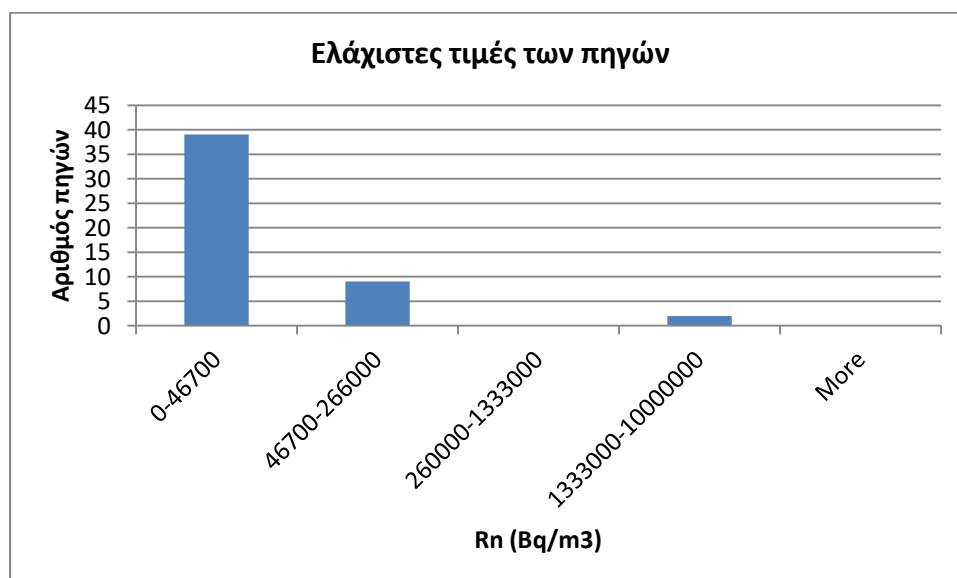
A) Ασθενείς → (46.700-266.000 Bq/m³)

B) Μέτριες → (266.000-1.333.000 Bq/m³)

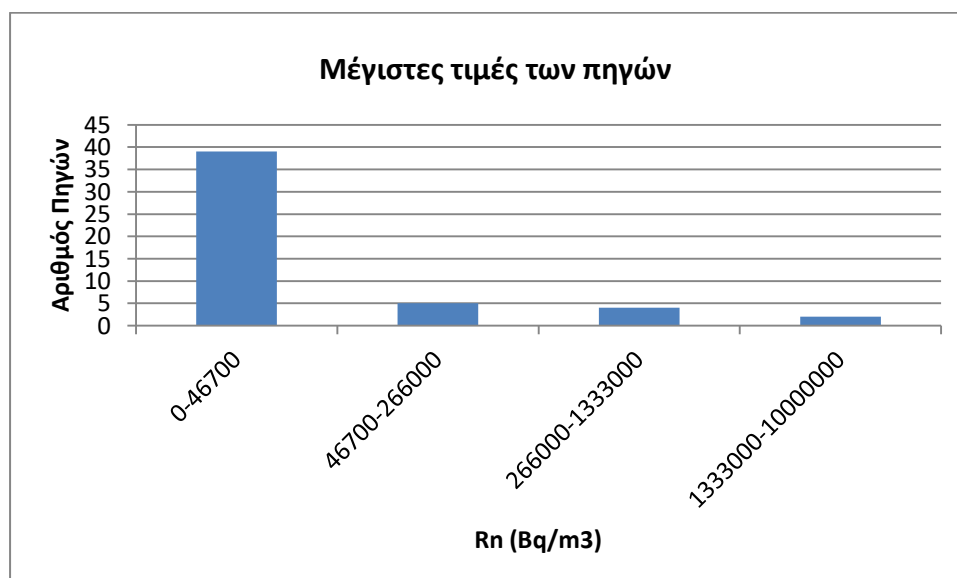
Γ) Ισχυρές → (1.333.000 Bq/m³ <).

Στα ιστογράμματα των σχημάτων 3.1 έως 3.3, απεικονίζεται η κατανομή των πηγών με βάση την ελάχιστη, τη μέγιστη και τη μέση τιμή συγκέντρωσής τους σε ραδόνιο, αντίστοιχα, από όπου διαπιστώνεται:

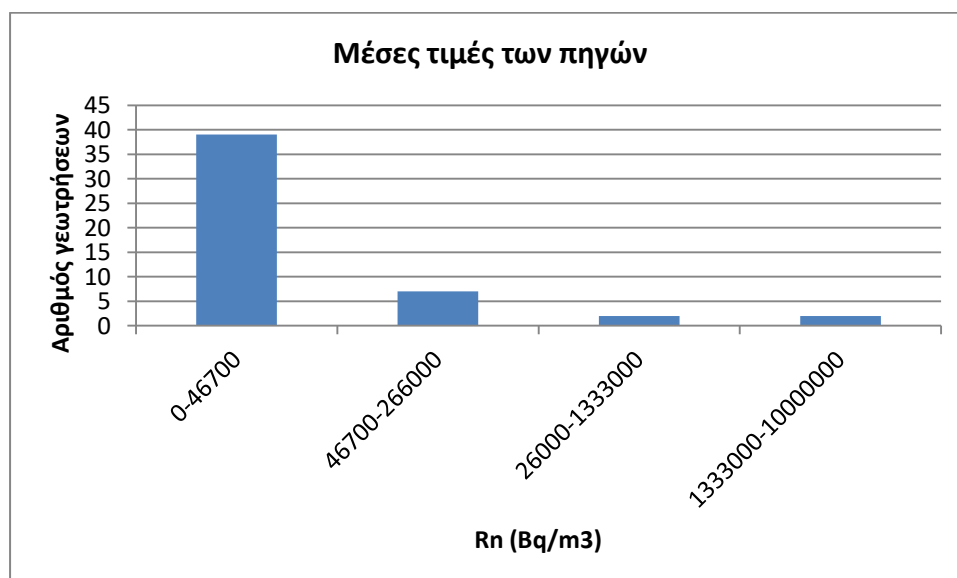
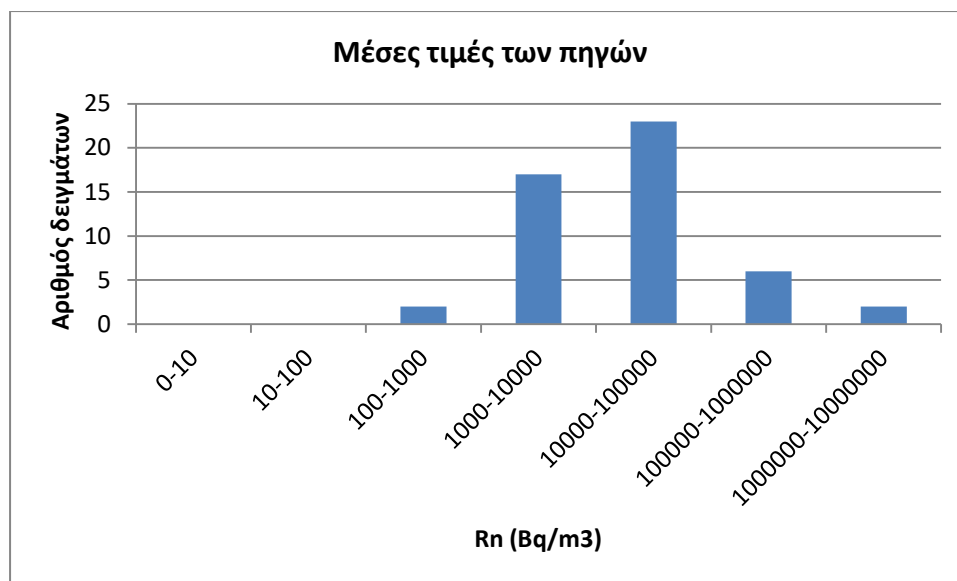
Σχετικά με τις τιμές ελάχιστης και μέγιστης συγκέντρωσης που μετρήθηκαν οι περισσότερες από τις επιλεγείσες πενήντα (50) πηγές ήτοι οι τριάντα εννιά (39) κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-ιαματικών όσον αφορά την περιεκτικότητά τους σε ραδόνιο. Εννέα (9) στις ελάχιστες τιμές και (5) στις μέγιστες τιμές κατατάσσονται στην κατηγορία των ασθενών ραδονιούχων ιαματικών πηγών, και (4) αντίστοιχα κατατάσσονται στην κατηγορία των μέτριων και τέλος (2) από τα μέγιστα και ελάχιστα κατατάσσονται στην κατηγορία των ισχυρών ραδονιούχων ιαματικών πηγών.



Σχήμα 3.1. Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις ελάχιστες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου στις πηγές, σε λογαριθμική κλίμακα (πάνω) και σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 (κάτω). Οι περισσότερες πηγές κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-ιαματικών (39)-ασθενών (9). Οι περισσότερες πηγές έχουν τιμές να κυμαίνονται στο εύρος 1.000-10.000 Bq/m³ (21).



Σχήμα 3.2. Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις μέγιστες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου στις πηγές, σε λογαριθμική κλίμακα (πάνω) και σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 (κάτω). Οι περισσότερες πηγές κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-ιαματικών (39)-ασθενών (5). Έχουν τιμές να κυμαίνονται στο εύρος 10.000-100.000 Bq/m³ (21).



Σχήμα 3.3. Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις μέσες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου στις πηγές, σε λογαριθμική κλίμακα (πάνω) και σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 (κάτω). Οι περισσότερες πηγές κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-ιαματικών (39)-ασθενών (7).

Αναλυτικότερα στο ιστόγραμμα με βάση το ΦΕΚ, που απεικονίζει τις μέσες συγκεντρώσεις ραδονίου στις πηγές (σχήμα 3.3) φαίνεται ότι (39) πηγές κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-ιαματικών όσον αφορά την περιεκτικότητά τους σε ραδόνιο (7) στην κατηγορία των ασθενών ραδονιούχων ιαματικών πηγών, (2) στην κατηγορία των μέτριων και τέλος (2) στην κατηγορία των ισχυρών ραδονιούχων ιαματικών πηγών.

Ακολούθως και σύμφωνα πάντα με την κατηγοριοποίηση στο ΦΕΚ 2997/6-11-2014 και τον πίνακα του παραρτήματος IV περί χαρακτηρισμού ιαματικών φυσικών πόρων, κριτήριο 5, για την θερμοκρασία των πηγών, οι πηγές στον Ελλαδικό χώρο κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες με βάση την θερμοκρασία τους.

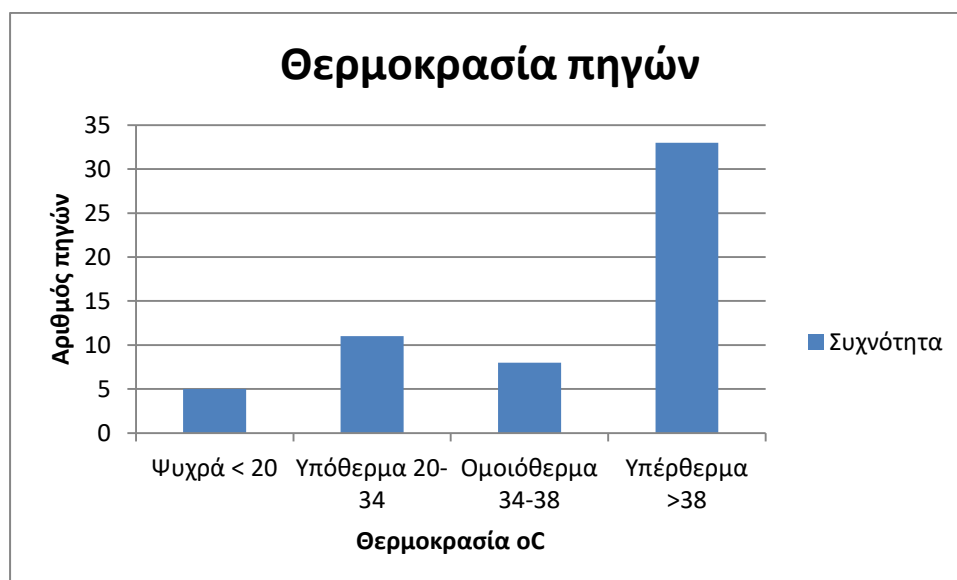
Α) Ψυχρές < 20

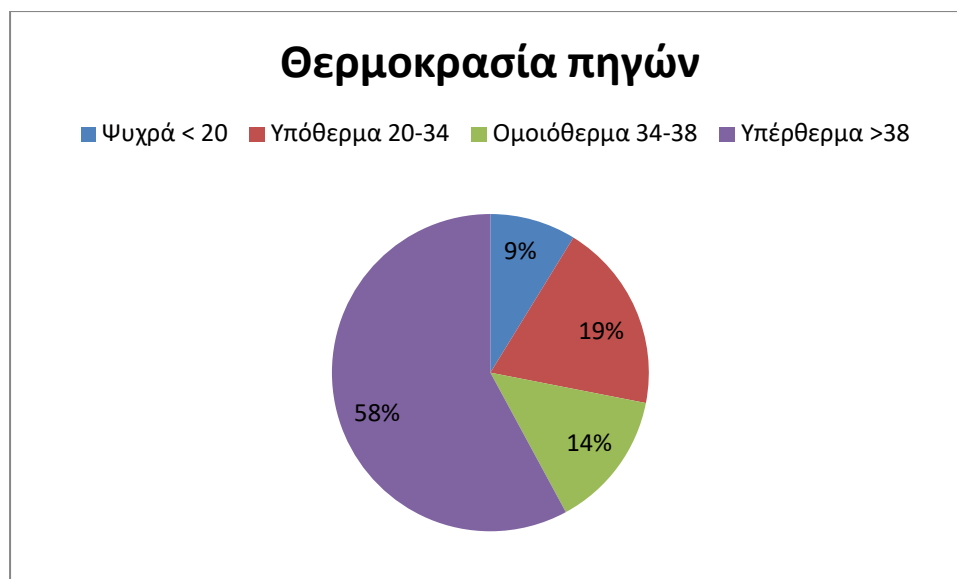
Β) Υπόθερμες 20-34 °C

Γ) Ομοιόθερμες 34-38 °C

Δ) Υπέρθερμες >38 °C

Στην Ελλάδα διακρίθηκαν οι πηγές ως προς την θερμοκρασία των υδάτων (σχήμα 3.4) από το σύνολο των πενήντα πηγών οι (33) να είναι υπέρθερμες , οι (11) κατατάσσονται ως υπόθερμες, οι (8) ως ομοιόθερμες και τέλος (5) ψυχρές.





Σχήμα 3.4. Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις θερμοκρασίες στις πηγές (πάνω) σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 και (κάτω) είναι γράφημα που δείχνει την ποσοστιαία κατανομή για την κάθε κατηγορία. Οι περισσότερες πηγές κατατάσσονται στην κατηγορία των υπέρθερμων (33)- υπόθερμων (11) με βάση την θερμοκρασία τους.

Στην συνέχεια διερευνήθηκε η πιθανή συσχέτιση του ραδονίου με τα κύρια χημικά στοιχεία που περιέχονταν στα δείγματα του νερού των πηγών. Από τον πίνακα 3.2 διαπιστώνεται ότι ο συντελεστής συσχέτισης του ραδονίου με τα χημικά στοιχεία είναι πολύ μικρός, ακόμα και με το ράδιο, άρα δεν υπάρχει συσχέτιση. Θα πρέπει να τονιστεί όμως ότι οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ άλλων χημικών στοιχείων είναι μεγάλος, όπως για παράδειγμα μεταξύ Na και Ca, Mg και Na με τα SO₄ καθώς και των TDS με τα περισσότερα στοιχεία.

Πίνακας 3.2. Συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των φυσικοχημικών ιδιοτήτων στα νερά των πηγών

	<i>Rn</i>	<i>TDS</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Na</i>	<i>SO4</i>	<i>Sr</i>	<i>Ra</i>
Rn	1							
TDS	0,318304	1						
Ca	0,198218	0,916408	1					
Mg	0,316953	0,864011	0,67711	1				
Na	0,325847	0,997613	0,905798	0,850756	1			
SO4	0,361583	0,880137	0,728415	0,875476	0,874862	1		
Sr	0,072674	0,464992	0,552279	0,359261	0,455763	0,32025	1	
Ra	0,112539	0,579394	0,593786	0,419773	0,592827	0,451155	0,208659	1

Ακόμη ελέγχθηκε εάν ορισμένες από τις πενήντα πηγές που αναλύθηκαν ανήκουν σε κάποια επιπρόσθετη κατηγορία ιαματικών πηγών (σχήμα 3.5): των παραμέτρων ποιοτικού χαρακτήρα, ποσοστό % στο σύνολο των κατιόντων. Με βάση το ΦΕΚ ένα χημικό στοιχείο θεωρείται πως βρίσκεται σε ποσοτική υπεροχή όταν συμμετέχει σε τουλάχιστον το 20% στο σύνολο των κατιόντων. Με βάση την μετατροπή των μονάδων σε meq/L, παρατηρείται πως από τις (50) πηγές οι (48) έχουν αυξημένη την συμμετοχή του στοιχείου νάτριου, (10) του ασβεστίου, (6) του μαγνησίου αντιθέτως με το κάλιο που δεν σε καμία πηγή ποσοτική υπεροχή.



Σχήμα 3.5. Γραφήματα που απεικονίζουν τα χημικά κατιόντα και την ποσοτική υπεροχή τους στο σύνολο των κατιόντων στα νερά. Παρατηρείται στο (πάνω- αριστερά) και (πάνω- δεξιά) ένας μικρός αριθμός πηγών να χαρακτηρίζονται ασβεστούχα-

μαγνησιούχα. (Κάτω- δεξιά) παρουσιάζεται πως τα περισσότερα νερά είναι νατριούχα και τέλος κανένα δεν χαρακτηρίζεται καλιούχο.

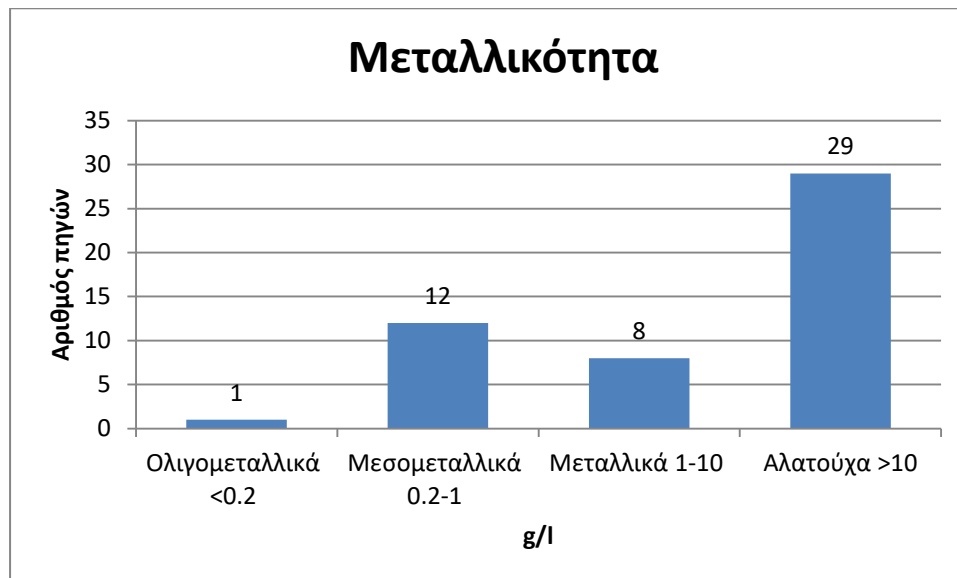
Ένα ακόμη κριτήριο για το χαρακτηρισμό των ιαματικών νερών είναι με βάση την μεταλλικότητα (σχήμα 3.6). Σύμφωνα με το ΦΕΚ, τα ιαματικά νερά της Ελλάδος κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες ως προς την μεταλλικότητά τους:

Α) Ολιγομεταλλικά $<0,2$ g/L

Β) Μεσομεταλλικά 0,2-1 g/L

Γ) Μεταλλικά 1-10 g/L

Δ) Αλατούχα >10 g/L



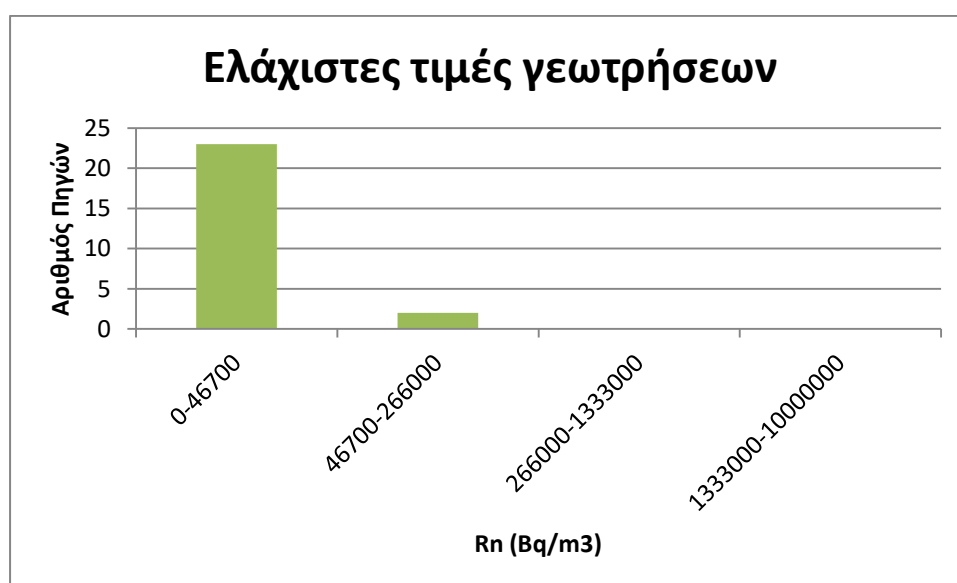
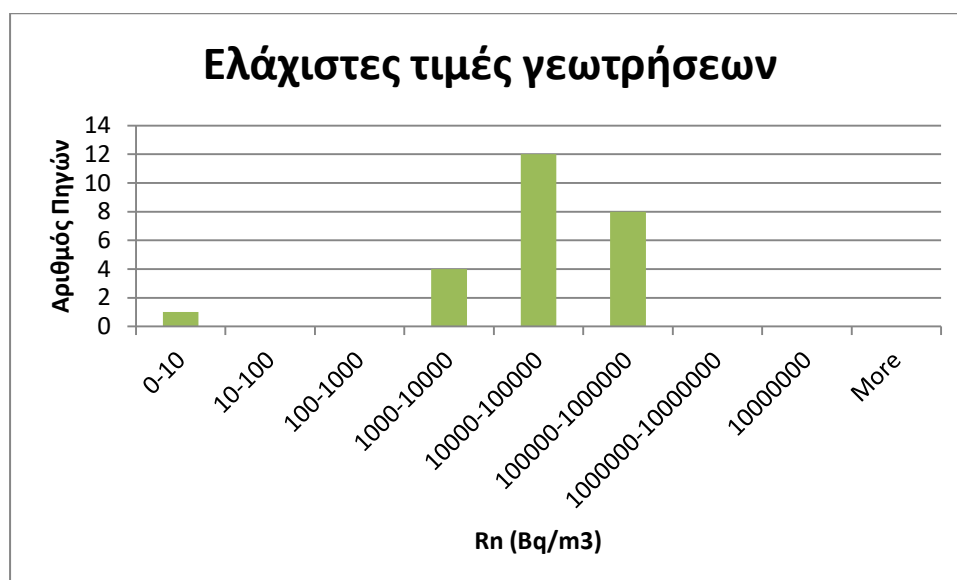
Σχήμα 3.6. Ιστογράμμο που απεικονίζει την μεταλλικότητα των πηγών. Οι περισσότερες πηγές (29) είναι αλατούχες και (12) μεσομεταλλικές.

3.3 Η ανάλυση των μετρήσεων στις γεωτρήσεις

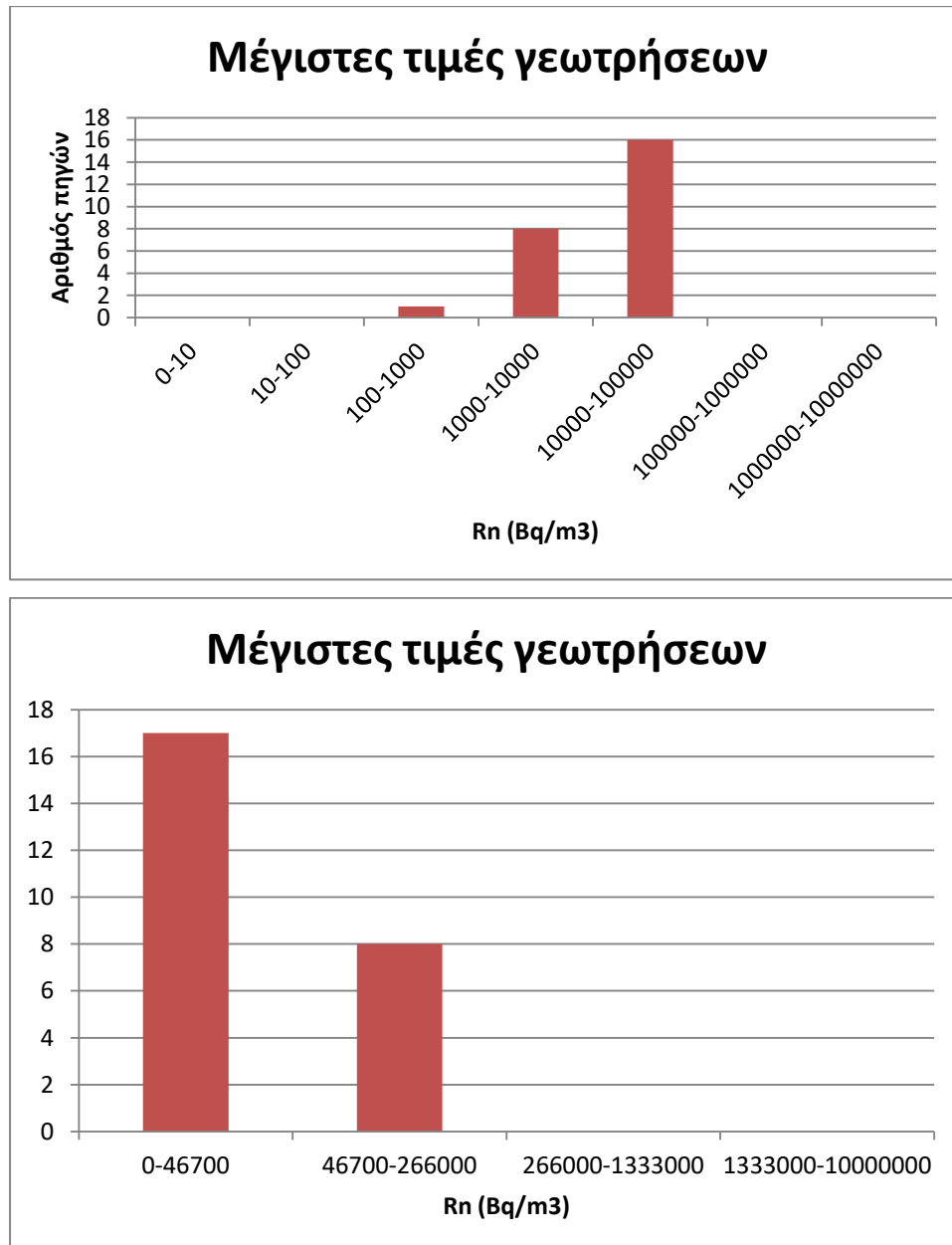
Για επεξεργασία επιλέχθηκαν οι 25 γεωτρήσεις για τις οποίες υπήρχαν τουλάχιστον 2 μετρήσεις για τη συγκέντρωση του ραδονίου. Αντίστοιχα με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για τις πηγές, για κάθε γεώτρηση βρέθηκε η ελάχιστη, η μέγιστη συγκέντρωση ραδονίου στις γεωτρήσεις και από αυτές υπολογίστηκε η μέση τιμή της. Με βάση αυτές τις τιμές κατασκευάστηκαν ιστογράμματα σε λογαριθμική κλίμακα

καθώς και ιστογράμματα σε κλίμακα που βασίζεται στην κατάταξη που θεσπίστηκε στο ΦΕΚ 2997/6-11-2014.

Στα ιστογράμματα των σχημάτων 3.7 έως 3.9, απεικονίζεται η κατανομή των πηγών με βάση την ελάχιστη, τη μέγιστη και τη μέση τιμή συγκέντρωσής τους σε ραδόνιο, αντίστοιχα. Με βάση την ελάχιστη τιμή, (23) γεωτρήσεις κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-ιαματικών και (2) στην κατηγορία των ασθενών ραδονιούχων ιαματικών υδάτων, ενώ με βάση τη μέγιστη τιμή, (17) γεωτρήσεις κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-ιαματικών και (8) στην κατηγορία των ασθενών ραδονιούχων ιαματικών υδάτων.

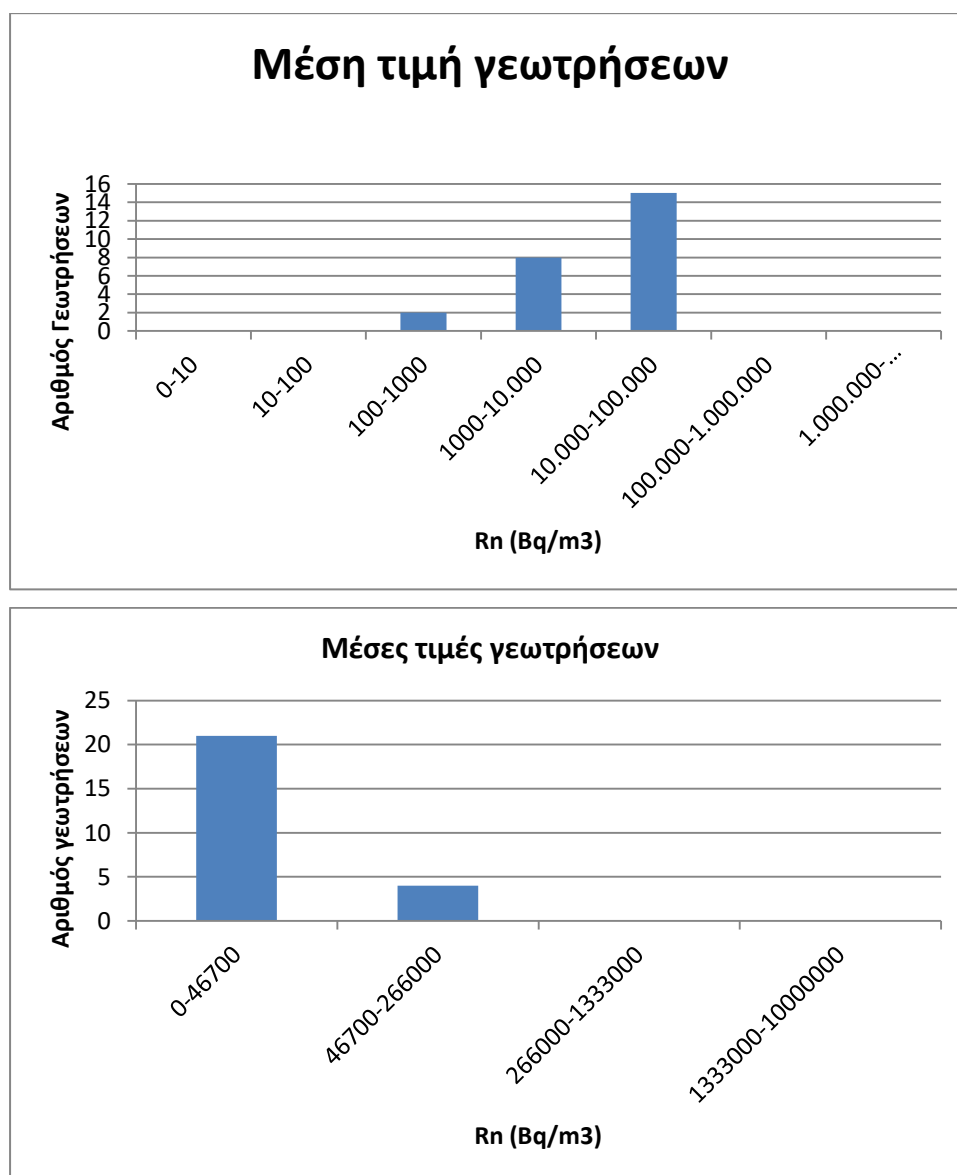


Σχήμα 3.7. Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις ελάχιστες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου στις γεωτρήσεις, σε λογαριθμική κλίμακα (πάνω) και σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 (κάτω). Οι περισσότερες γεωτρήσεις κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-ιαματικών (23)-ασθενών (2).



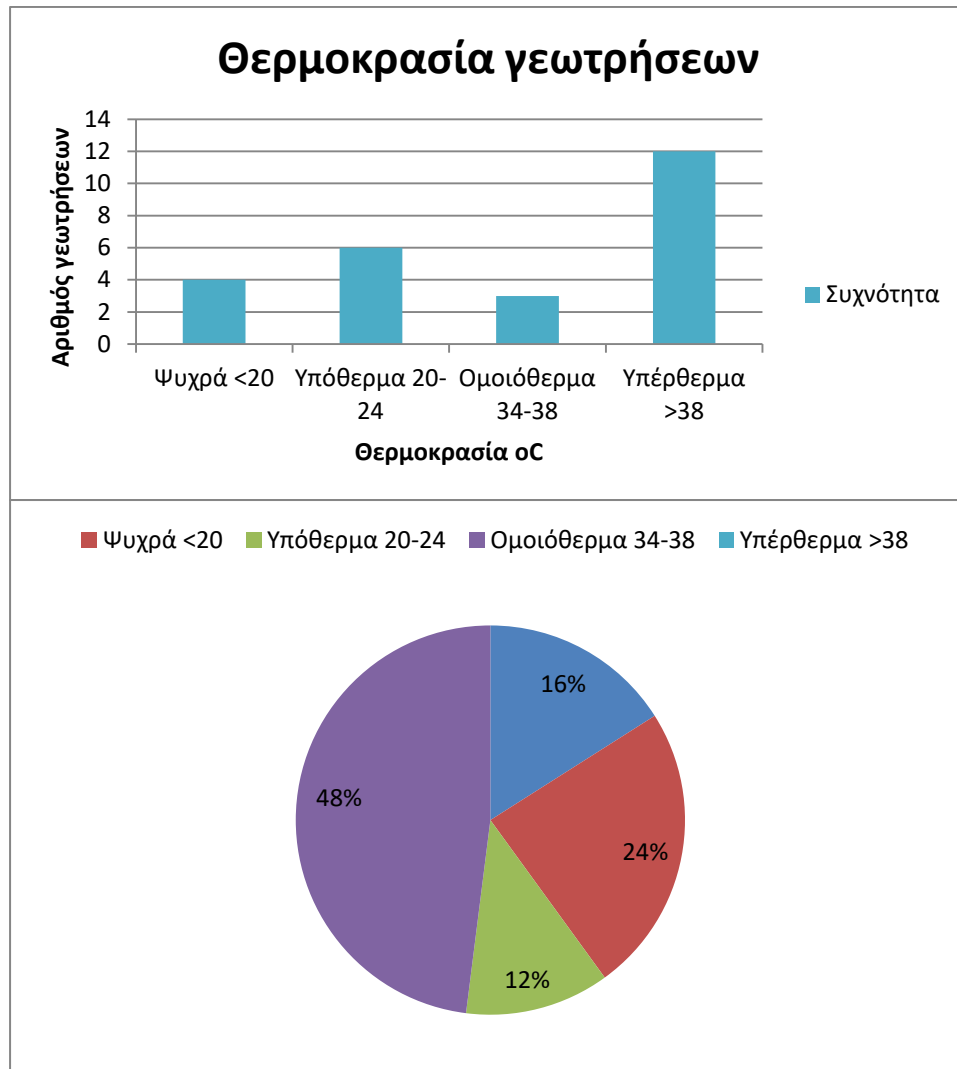
Σχήμα 3.8. Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις μέγιστες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου στις γεωτρήσεις, σε λογαριθμική κλίμακα (πάνω) και σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 (κάτω). Οι περισσότερες γεωτρήσεις κατατάσσονται στην κατηγορία μη-ιαματικών (17)-ασθενών (8).

Στο ιστόγραμμα που απεικονίζει τις μέσες συγκεντρώσεις ραδονίου στις γεωτρήσεις (σχήμα 3.8) φαίνεται ότι (21) γεωτρήσεις κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-ραδιενεργών και (4) στην κατηγορία των ασθενών. Καθώς και το εύρος τιμών για τις μέσες τιμές ραδονίου στις γεωτρήσεις κυμαίνονται στα 1.000-10.000 Bq/m³ (15).



Σχήμα 3.9. Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις μέγιστες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου στις γεωτρήσεις, σε λογαριθμική κλίμακα (πάνω) και σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 (κάτω). Τα ύδατα των περισσότερων γεωτρήσεων κατατάσσονται στην κατηγορία των πολύ ασθενών (21)-ασθενών (4).

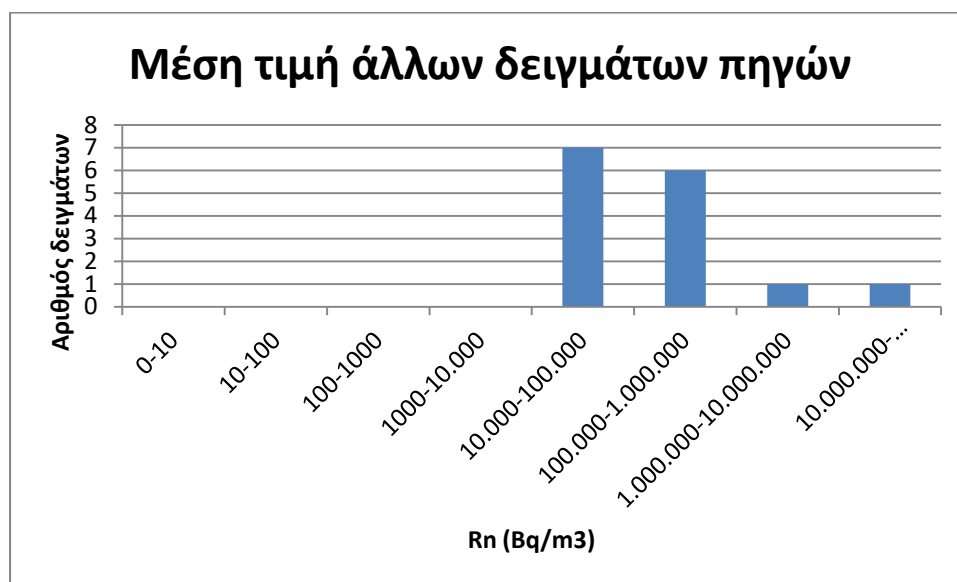
Στην Ελλάδα ταξινομήθηκαν οι γεωτρήσεις και ως προς την θερμοκρασία των υδάτων τους (σχήμα 3.10). Από το σύνολο των εικοσιπέντε γεωτρήσεων οι (12) ανήκουν στην κατηγορία των υπέρθερμων νερών, οι (6) ταξινομούνται ως υπόθερμες, οι (4) ψυχρές και τέλος (3) ως ομοιόθερμες.

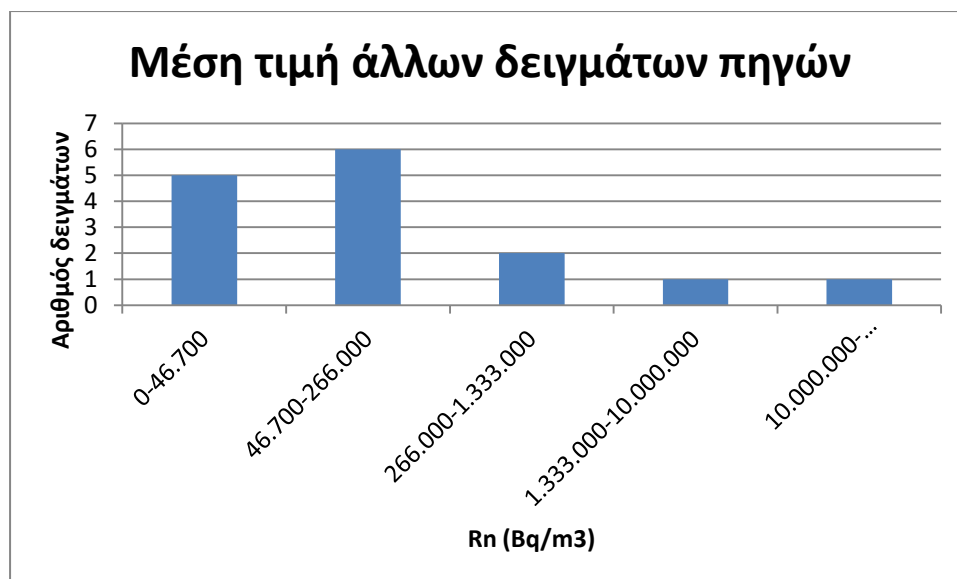


Σχήμα 3.10. Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις θερμοκρασίες στις γεωτρήσεις (πάνω) σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 και (κάτω) είναι γράφημα που δείχνει την ποσοστιαία κατανομή για την κάθε κατηγορία. Οι περισσότερες πηγές κατατάσσονται στην κατηγορία των Υπέρθερμων (12)- Υπόθερμων (6) με βάση την θερμοκρασία τους.

3.4 Ανάλυση των μετρήσεων από επίκαιρη βιβλιογραφία

Στην Ελλάδα υπήρξαν και άλλες έρευνες για το προσδιορισμό της συγκέντρωσης ραδονίου στα νερά. Οι τιμές είναι από επίκαιρη βιβλιογραφία για τα νερά της Λέσβου και Ικαρίας (Voggianis et al., 2004), Μυγδονίας (Savvidou et al., 2001), Αρναίας (Μπαλταδώρος και Σαμψωνίδης, 2018) και Χανίων. Επιλέχτηκαν 15 πηγές για τις οποίες υπήρχαν 2 μετρήσεις για τη συγκέντρωση ραδονίου και από αυτές υπολογίστηκε η μέση τιμή τους. Με βάση αυτές τις τιμές κατασκευάστηκαν ιστογράμματα σε λογαριθμική κλίμακα όπως έγινε και για τις μετρήσεις της Ε.Α.Γ.Μ.Ε, καθώς και ιστογράμματα σε κλίμακα που βασίζεται στην κατάταξη που θεσπίστηκε στο ΦΕΚ 2997/6-11-2014. Στα ιστογράμματα του σχήματος 3.11, απεικονίζεται η κατανομή των πηγών με βάση τη μέση τιμή συγκέντρωσής τους σε ραδόνιο, αντίστοιχα, από όπου διαπιστώνεται ότι οι περισσότερες πηγές κατατάσσονται στην κατηγορία των ασθενών ραδονιούχων ιαματικών υδάτων και οι συγκεντρώσεις κυμαίνονται στο εύρος 10.000-100.000 Bq/m³ (7) και 100.000-1.000.000 Bq/m³ (6).

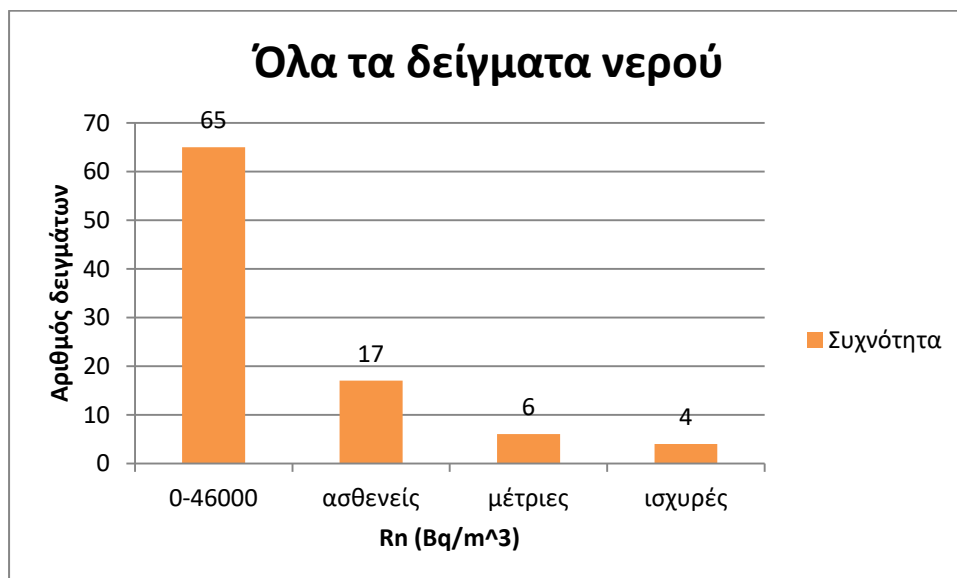
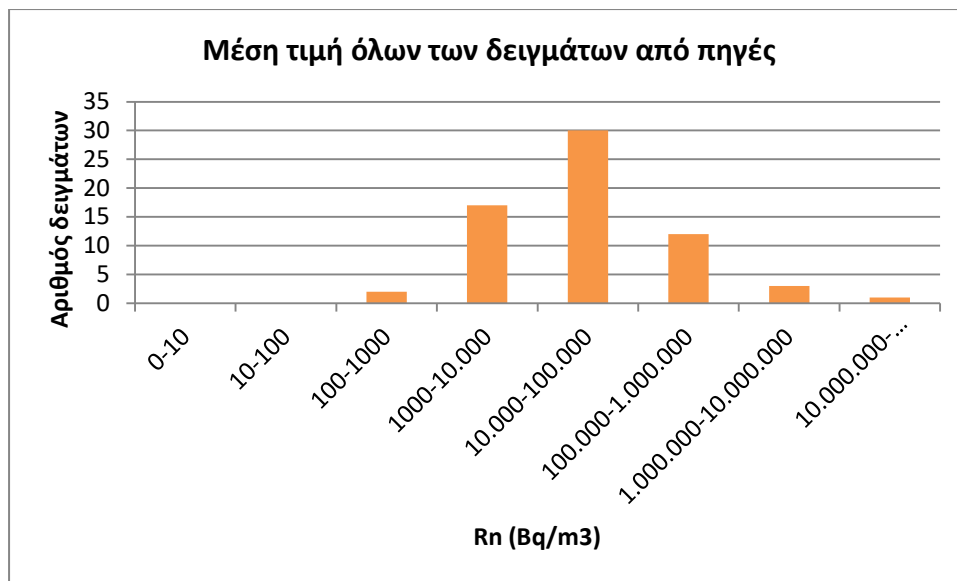




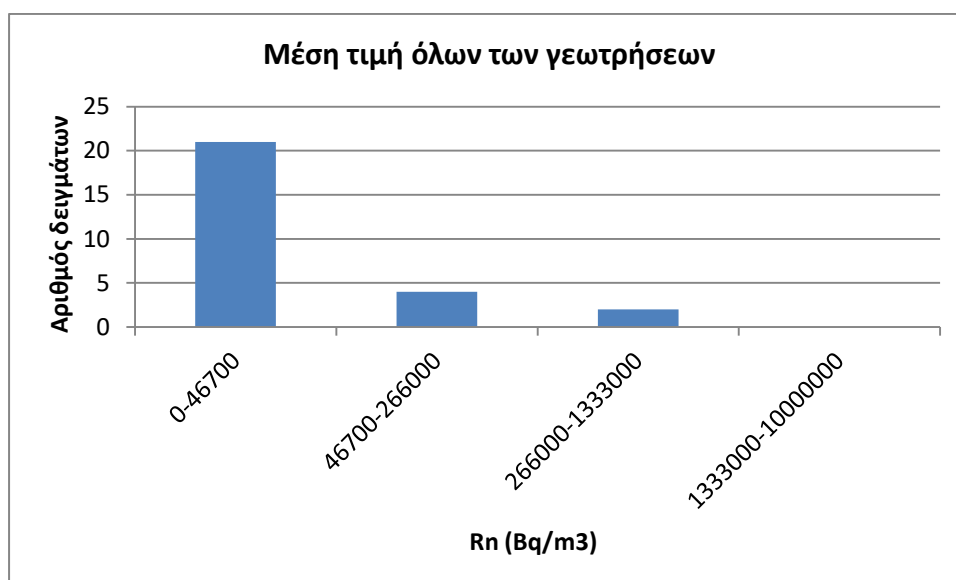
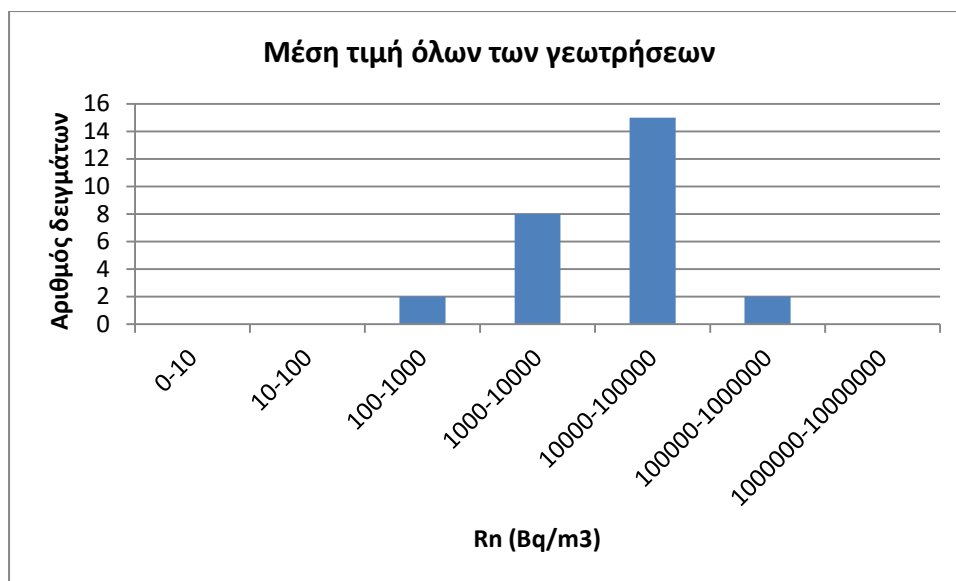
Σχήμα 3.11: . Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις μέσες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου στα δείγματα πηγών, σε λογαριθμική κλίμακα (πάνω) και σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 (κάτω). Οι περισσότερες πηγές κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-ιαματικών (5)-ασθενών (6).

3.5 Η ανάλυση των συνολικών μετρήσεων από πηγές και γεωτρήσεις

Για την τελική επεξεργασία επιλέχθηκαν οι μέσοι όροι των δεδομένων από 50 πηγές και 25 γεωτρήσεις από την βάση δεδομένων του Ε.Α.Γ.Μ.Ε και από 15 πηγές και 2 γεωτρήσεις από την επίκαιρη βιβλιογραφία. Με βάση αυτές τις τιμές κατασκευάστηκαν ιστογράμματα σε λογαριθμική κλίμακα καθώς και ιστογράμματα σε κλίμακα που βασίζεται στην κατάταξη που θεσπίστηκε στο ΦΕΚ 2997/6-11-2014. Με βάση τα ιστογράμματα του σχήματος 3.12, παρατηρείται πως τα δείγματα νερών από πηγές χαρακτηρίζονται στην πλειοψηφία τους μη-ιαματικά (65) έως ασθενώς ραδονιούχα ιαματικά (17). Αντίστοιχα, στα ιστογράμματα του σχήματος 3.13 παρατηρείται πως τα δείγματα νερών από τις γεωτρήσεις χαρακτηρίζονται στην πλειοψηφία τους μη-ιαματικά (21) έως ασθενώς ραδονιούχα ιαματικά (4).



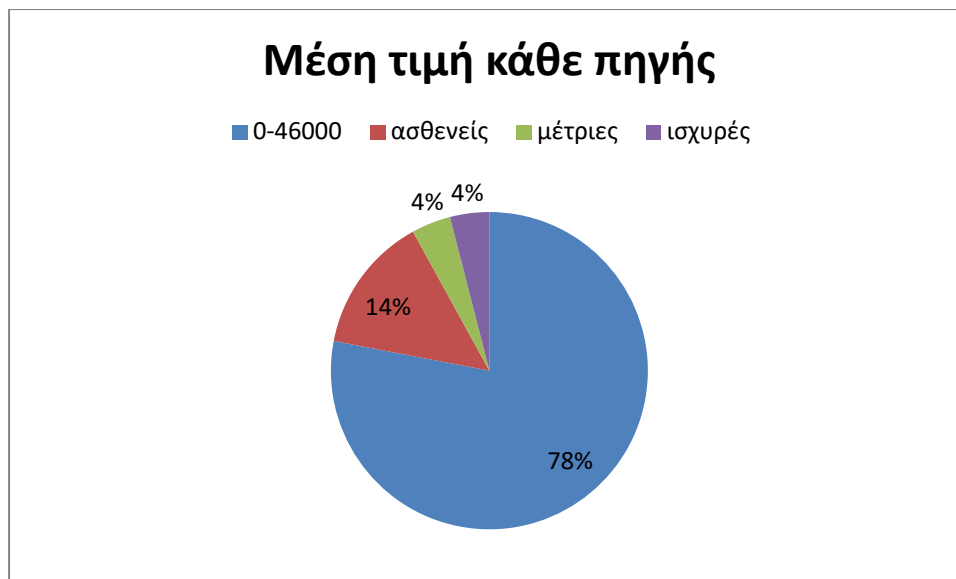
Σχήμα 3.12: Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις μέσες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου στις πηγές, σε λογαριθμική κλίμακα (πάνω) και σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 (κάτω). Οι περισσότερες τιμές δειγμάτων κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-ιαματικών (65) και ασθενών ραδιενεργών (21).



Σχήμα 3.13: Ιστόγραμμα που απεικονίζει τις μέσες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου για το σύνολο των γεωτρήσεων, σε λογαριθμική κλίμακα (πάνω) και σε κλίμακα σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 (κάτω). Οι περισσότερες τιμές δειγμάτων κατατάσσονται στην κατηγορία των μη-ιαματικών (21)-ασθενών ραδιενεργών (4).

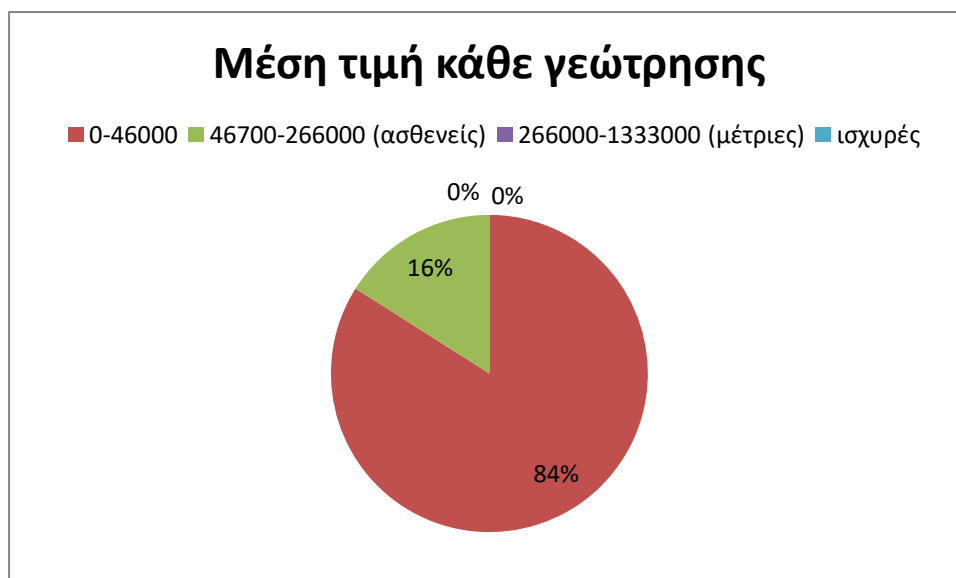
Κεφάλαιο 4: Συζήτηση-Συμπεράσματα

- 1) Από την έκθεση του Ε.Α.Γ.Μ.Ε επιλέχθηκαν τα δεδομένα από πηγές και γεωτρήσεις που περιείχαν πάνω από μία μέτρηση συγκέντρωσης ραδονίου. Πιο συγκεκριμένα επιλέχθηκαν μετρήσεις 50 πηγές και 25 γεωτρήσεις. Με βάση την οδηγία 2013/51/EYPATOM «περί θεσπίσεως απαιτήσεων προστασίας της υγείας του πληθυσμού από ραδιενεργές ουσίες που περιέχονται στο νερό ανθρώπινης κατανάλωσης», ορίζει ως παραμετρική τιμή για το πόσιμο νερό τα $100 \text{ Bq/L} = 100.000 \text{ Bq/m}^3$. Παρατηρείται ότι από τις 50 πηγές, οι 8 (16%) ξεπερνάνε την παραμετρική τιμή που θέσπισε η ΕΥΑΡΑΤΟΜ, καθώς δύο εκ των οποίων είχαν μέγιστες τιμές συγκέντρωσης που κυμαίνονταν στο εύρος των $1.000.000\text{-}10.000.000 \text{ Bq/m}^3$. Στις γεωτρήσεις όλες οι μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου δεν υπερέβαιναν την παραμετρική τιμή για το πόσιμο νερό. Για τα συνολικά 92 δείγματα από το Ε.Α.Γ.Μ.Ε και από την επίκαιρη βιβλιογραφία συμπεραίνεται ότι σχεδόν το 20% των τιμών συγκέντρωσης ραδονίου ξεπερνάνε την παραμετρική τιμή των 100.000 Bq/m^3 . Οι υψηλότερες τιμές καταγράφηκαν στην πηγή Ασκληπιού με μέγιστη τιμή $6.289.100 \text{ Bq/m}^3$ και στην πηγή Απόλλωνος με μέγιστη τιμή Κρήτη $4.199.400 \text{ Bq/m}^3$ ενώ μια ασθενώς ραδιενεργή πηγή (του Αγίου Αντωνίου, στην ευρύτερη περιοχή της Σούγιας) έχει καταγραφεί και στην Κρήτη (Κουφάκης, 2018).
- 2) Σύμφωνα με το ΦΕΚ 2997/6-11-2014 περί «διαδικασίας αναγνώρισης ιαματικών φυσικών πόρων» και τον πίνακα του παραρτήματος IV περί χαρακτηρισμού ιαματικών φυσικών πόρων, κριτήριο 5 (σχήμα 4.1) από τις 50 πηγές το 78% κατατάσσεται ως μη-ιαματικές όσον αφορά την περιεκτικότητά τους σε ραδόνιο ($0\text{-}46.000 \text{ Bq/m}^3$), 14% ασθενείς ραδιενεργές/ραδονιούχες ($46.000\text{-}266.000 \text{ Bq/m}^3$), 4% μέτρια ραδιενεργές/ραδονιούχες ($266.000\text{-}1.333.000 \text{ Bq/m}^3$) και 4% ισχυρά ραδιενεργές/ραδονιούχες ($> 1.333.000 \text{ Bq/m}^3$). Την ίδια κατανομή έχουν οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές συγκέντρωσης ραδονίου για τις πηγές.



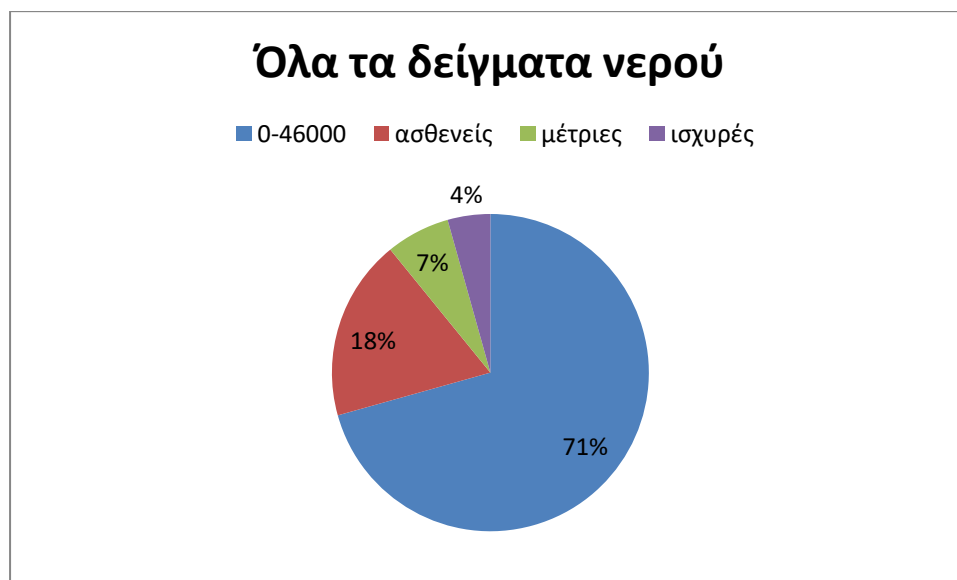
Σχήμα 4.1. Γράφημα που απεικονίζει της % ποσοστά που ανήκει η κάθε πηγή με βάση το ΦΕΚ 2997/6-11-2014. Το 78% των πηγών είναι μη-ιαματικά.

Στο σχήμα 4.2 παρατηρείται πως από τις 25 γεωτρήσεις το 84% των υδάτων ταξινομείται ως μη-ιαματικά, 16% ως ασθενώς ραδιενεργά/ραδονιούχα ιαματικά και τέλος καμία γεώτρηση δεν χαρακτηρίζεται ως μέτρια ή ισχυρή ραδονιούχα ιαματική με βάση την συγκέντρωση τους σε ραδόνιο.



Σχήμα 4.2. Γράφημα που απεικονίζει την ποσοστιαία κατανομή για την γεώτρηση με βάση το ΦΕΚ 2997/6-11-2014. Το 84% των γεωτρήσεων είναι μη-ιαματικές.

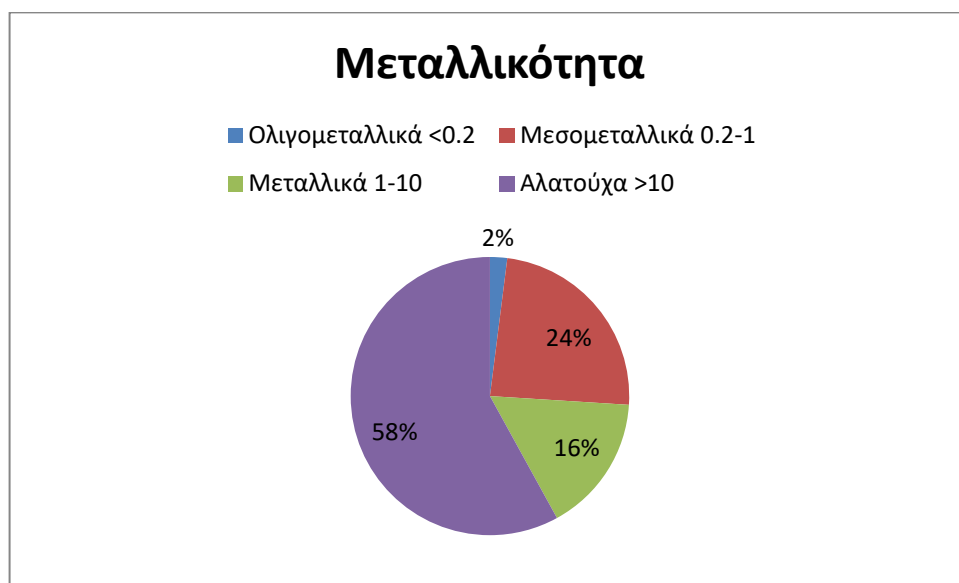
Από τα 92 δείγματα που επιλέχθηκαν (σχήμα 4.3) το 71% είναι μη-ιαματικά πάντα σε σχέση με την περιεκτικότητα τους σε ραδόνιο ($0-46.000 \text{ Bq/m}^3$), 18% κρίνεται ως ασθενώς ραδονιούχα ιαματικά ($46.000-266.000 \text{ Bq/m}^3$), 7% ως μέτρια ραδονιούχα ($266.000-1.333.000 \text{ Bq/m}^3$) και τέλος 4% ως ισχυρά ραδονιούχα ιαματικά ($> 1.333.000 \text{ Bq/m}^3$).



Σχήμα 4.3. Γράφημα που απεικονίζει την ποσοστιαία κατανομή για τα 92 δείγματα με βάση το ΦΕΚ 2997/6-11-2014. Το 71% των δειγμάτων είναι μη-ιαματικές.

- 3) Από τη διερεύνηση της πιθανής συσχέτισης του ραδονίου με τα άλλα φυσικοχημικά χαρακτηρίστηκα στα δείγματα νερού από τις πηγές, διαπιστώθηκε ότι ο συντελεστής συσχέτισης ήταν πολύ μικρός ακόμα και μεταξύ του ραδονίου με το πατρικό του στοιχείο, το ράδιο. Βέβαια υπήρχε μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των άλλων φυσικοχημικών χαρακτηριστικών (νάτριο, ασβέστιο, θειικά, μαγνήσιο).
- 4) Ακολουθώς και σύμφωνα πάντα με την κατηγοριοποίηση στο ΦΕΚ 2997/6-11-2014 και τον πίνακα του παραρτήματος IV περί χαρακτηρισμού ιαματικών φυσικών πόρων, κριτήριο 5, με βάση την θερμοκρασία των πηγών, από τις 50 πηγές το 58% είναι υπέρθερμες ($>38^\circ\text{C}$), 19% υπόθερμες ($20-34^\circ\text{C}$). Ενώ από τις 25 γεωτρήσεις το 48% κατατάσσεται στην κατηγορία των υπέρθερμων ($>38^\circ\text{C}$) και το 24% υπόθερμων ($20-34^\circ\text{C}$).

- 5) Με βάση το ΦΕΚ για το χαρακτηρισμό των υδάτων ως προς την μεταλλικότητα τους (σχήμα 4.4) από τις 50 πηγές οι 48% κατατάσσονται ως αλατούχες (>10 g/l), 24% ως μεσομεταλλικές (0,2-1 g/l), το 16% μεταλλικές (1-10 g/l) και το 2% ως ολιγομεταλλικές ($<0,2$ g/l).



Σχήμα 4.4. Γράφημα που απεικονίζει την ποσοστιαία κατανομή των πηγών με βάση το ΦΕΚ 2997/6-11-201 ως προς την μεταλλικότητα τους. Το 58% των πηγών ανήκει στα αλατούχα.

- 6) Τέλος σε ότι αφορά την κατάταξη των πηγών με βάση ένα χημικό στοιχείο θεωρείται ότι έχει ποσοτική υπεροχή όταν συμμετέχει με τουλάχιστον το 20% του συνόλου των κατιόντων, συνεπώς το 96% των πηγών μπορεί να χαρακτηριστούν ως νατριούχες, το 20% ασβεστούχες, το 12% μαγνησιούχες και τέλος καμία πηγή δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως καλιούχα.

Βιβλιογραφία

1.4 Διεθνής

1. Cherry, S. R., Sorenson, J. A., Phelps, M. E. (2012) '*Physics in Nuclear Medicine: chapter 23- radiation safety and health physics*'. Elsevier
2. Coretchi, L., Plavan, I., Virvan, S., Ursulean, I., Bahnarel, I. (2017) 'Natural radioactivity in drinking water sources of the republic of Moldova' *Rad conference proceedings*. Vol2, pp. 109-114.
3. Gianfaldoni, S., Tchernev, G., Wollina, U., Roccia, M. G., Fioranelli, M., Gianfaldoni, R., Lotti, T. (2017) 'History of the baths and thermal medicine'. *Macedonian journal of medical sciences*(special issue Global Dermatology), pp.1-3.
4. Goulet, R. (2014) *The environmental behavior of radium: revised edition*. Vienna, International Atomic Energy Agency.
5. Jobbagy, V., Altitzoglou, T., Malo, P., Tanner, V., Hult, M. (2017)'A brief overview on radon measurements in drinking water'. *journal of environmental radioactivity*. vol.173, pp.18-24.
6. Kalef-Ezra, J. A., Valakis, S. T., (2016): 'Direct total body ^{214}Bi measurements and their implications for radon dose assessment'. *Journal of Radiological Protection*, 36(3), pp. 518-531.
7. Khater, A. (2003) 'Radiological aspects of some Egyptian thermo-mineral springs' *journal of environmental monitoring*, 5(3), pp. 414-418.
8. Nagy, K., Kavasi, N., Kovacs, T., Somlai, J. (2008) 'Radon therapy and speleotherapy in Hungary'. *press therm climat*,(145): pp.219-225
9. Otton, J. k., (1992):*The geology of radon*. Washington, DC: U.S Government Printing Office
10. Porowski, A. (2019) *Environmental Geology: mineral and thermal waters*. Poland:Springer
11. Salih, I. (2003) *Radon in natural waters*.(Μη εκδοθείσα διδακτορική διατριβή) Linkoping University.
12. Savidou, A., Sideris, G., Zouridakis, N. (2001)' Radon in public water supplies in Migdonia Basin, Central Macedonia, Northern Greece' *health physics*.vol80(2), pp.170-174

13. Tsoucalas, G., Sgantzios, M., Karamanou, M., Gritzalis, K. and Androutsos G. (2015) 'Hydrotherapy: Historical Landmarks of a cure all remedy'. *History of medicine*, 50(3), pp. 430-432.
14. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) (2019). *Sources and effects of ionizing radiation*. New York, United Nations publication.
15. Vogiannis, E., Nikolopoulos, D., Louizi, A., Halvadakis, C.P., 2004, Radon exposure in the thermal spas of Lesvos Island – Greece, *Radiation Protection Dosimetry*, vol.111, pp.121-127.
16. Wilkening M. (1990): *Radon in the Environment: chapter 11*. New Mexico: Elsevier Science.
17. World Health Organization (WHO). (2009) *Who handbook on indoor radon: a public health perspective*. Geneva: WHO Press.
18. Zdrojewicz, Z. and Strzelczyk, J. (2006) 'Radon treatment controversy'. *Dose response*, 4(2), pp.106-118

Ελληνική

1. Αθανασούλης, Κ., Βακαλόπουλος, Π., Ξενάκης, Μ., Περσιάνης, Δ. και Τακτικός Σ. (2009): *Περιοδική παρακολούθηση ιαματικών πηγών Ελλάδας*. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών Αθήνα.
2. Βαβελίδης, Μ., Μιχαηλίδης, Κ., Φιλίππιδης, Α. (2005): Σημειώσεις Κοιτασματολογίας 2, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, 87-88 σελ., Θεσσαλονίκη.
3. Βογιάννης, Γ. (2005): *Το ραδόνιο στα ιαματικά λουτρά, Μυτιλήνη*, Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Αγαίου.
4. Γκόλφη, Μ. (2017): *Ιαματικές πηγές στην Ελλάδα-Γεωγραφική κατανομή και θεραπευτικές ιδιότητες*, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών.
5. Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (2015): *Η ιοντίζουσα ακτινοβολία*. Αττική. Ανακτήθηκε από: <https://eeae.gr>
6. Κουφάκης, Μ., (2018): *Μελέτη γεωλογικών και γεωχημικών χαρακτηριστικών θερμομεταλλικών πηγών στην δυτική Κρήτη*, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.

7. Κυρκιμτζη Ι. Χ., (2013): *Καθορισμός γεωλογικών παραμέτρων εμφάνισης γεωθερμικών ρευστών, εντός σχηματισμών της Λεκάνης Μεσσαράς*, Πολυτεχνείο Κρήτης.
8. Μπαλταδώρος Λ., Σαμψωνίδης Χ. (2018): *Μελέτη συγκέντρωσης ραδονίου στο νερό*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
9. Νικολόπουλος, Δ., Γιαννακόπουλος, Π., Κόττου, Σ. (2015): *Ακτινοβολίες περιβάλλοντος και άνθρωπος*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
10. Πατήρης Δ. (2009): *Μελέτη της συμπεριφοράς των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα*, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων.
11. Ρουσάκος, Ν. και Φλαμπούρης, Ι. (2012): *Ιστορικές εγκαταστάσεις λουτρών στην Ελλάδα, μελέτη περίπτωσης: κτίριο ιαματικών λουτρών στα Μέθανα*, Διπλωματική εργασία, Τ.Ε.Ι Πειραιά.
12. Τριαντάφυλλος Σ., Παπαδοπούλου Λ.: *Σημειώσεις Ραδιενέργειας, Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
13. Τσουκαλά Δ. (2013): *Μετρήσεις ραδονίου και αξιολόγηση αποτελεσμάτων σε σπήλαια και ζώνες ρηγμάτων στην Κρήτη*, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης.