



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
Τομέας Μεταλλευτικής Τεχνολογίας
Ερευνητική μονάδα Γεωλογίας
(Τεκτονική- Στρωματογραφία- Γεωλογία Περιβάλλοντος)

TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE
SCHOOL OF MINERAL RESOURCES ENGINEERING
Division of Mining Technology – Laboratory of Geology
(Tectonics- Stratigraphy- Environmental Geology)

Μελέτη Κατανομής Ραδονίου σε Ενεργούς και Ανενεργούς Μεταλλευτικά Χώρους

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ασημάκου Κωνσταντίνα

Εξεταστική Επιτροπή:

<u>Εμμανουήλ Μανούτσογλου</u>	<u>Καθηγητής Π.Κ (επιβλέπων)</u>
<u>Νικόλαος Καλλίθρακας- Κόντος</u>	<u>Καθηγητής Π.Κ</u>
<u>Αντώνιος Βαφείδης</u>	<u>Καθηγητής Π.Κ</u>

Χανιά
Ιούλιος, 2021

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το ραδόνιο (Rn) ένα φυσικό άχρωμο, άοσμο, ευγενές ραδιενεργό αέριο, με χρόνο ημιζωής 3,8 ημέρες, αποτελεί τη σημαντικότερη πηγή φυσικής ιοντίζουσας ακτινοβολίας. Προέρχεται από τις αρχικές συγκεντρώσεις ουρανίου και των μεταστοιχειομένων θυγατρικών του σε πετρώματα, έδαφος και τελικά ύδατα και τείνει να συγκεντρώνεται σε κλειστούς χώρους όπως υπόγεια ορυχεία, σπήλαια καθώς επίσης σε υπόγειες και ισόγειες κυρίως κατοικίες. Η συγκέντρωση ραδονίου στους παραπάνω χώρους συμβάλλει σημαντικά στη αύξηση της δόσης της ιοντίζουσας ακτινοβολίας που λαμβάνει ο άνθρωπος με επίσκεψη, προσπέλαση, εργασία ή/και διαβίωση στους χώρους αυτούς.

Οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία από το ραδόνιο, έχουν διερευνηθεί εδώ και αρκετές δεκαετίες μέσα στις οποίες περισσότερες δημοσιευμένες εργασίες ασχολούμενες με το θέμα αυτό καταγράφουν και παρακολουθούν τις τιμές των συγκεντρώσεων του ραδονίου σε όλους τους ανωτέρω περιγραφόμενους χώρους και υποστηρίζοντας την ανάγκη για θέσπιση κανόνων, από παγκόσμιο (WHO, Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας), περιφερειακό (ΕΥΡΑΤΟΜ) σε εθνικό επίπεδο (αρμόδια υπουργεία, Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, ΕΕΑΕ, επιστημονικοί και ερευνητικοί φορείς κτλ.), για προστασία διαβιούντων, εργαζομένων αλλά και απλών επισκεπτών σε χώρους αυξημένης συγκέντρωσής του.

Η σύγκριση και αξιολόγηση της συγκέντρωσης ραδονίου σε χώρους ενεργών και μη μεταλλευτικών χώρων, οι διάφορες μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή και παρακολούθηση των τιμών αυτών, οι χρόνοι μετρήσεων, η επίδραση της συγκέντρωσης στην ανθρώπινη υγεία αλλά και τα διαφορετικά ανά κράτος ισχύοντα ανώτερα όρια συγκέντρωσης, αποτελούν τον στόχο της διπλωματικής αυτής εργασίας. Η συγκέντρωση και αξιολόγηση όλων αυτών των συναφών μεταξύ τους δεδομένων, προέκυψαν από μια εκτενή βιβλιογραφική έρευνα. Τα δεδομένα συγκεντρώθηκαν από 82 συνολικά δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά που έχουν τύχει των περισσότερων αναφορών στην διεθνή βιβλιογραφία. Αρχικά τα στοιχεία αυτά καταχωρήθηκαν σε ένα ενεργό αρχείο Excel. Τα ορυχεία που μελετήθηκαν κατηγοριοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες μεταλλευτικών χώρων: «ορυχεία ουρανίου», «ανθρακωρυχεία» και «λοιπά ορυχεία» (στα οποία συμπεριελήφθησαν χρυσωρυχεία, ορυχεία σιδήρου, ορυχεία χαλκού και ορυκτών αλάτων).

Όπως προκύπτει από τα στοιχεία των εργασιών που χρησιμοποιήθηκαν, οι ανωτέρω εργασίες αφορούν σε συνολικά 164 μεταλλευτικούς χώρους που είναι κατανεμημένοι σε 29 χώρες ανά την υφήλιο. Από τους χώρους αυτούς οι 107 ήτοι ένα ποσοστό 65.24 % αφορά ενεργούς και το υπόλοιπο ανενεργούς μεταλλευτικούς χώρους. Από τους ανενεργούς μεταλλευτικούς χώρους ένα αριθμός 15

επαναχρησιμοποιούνται ήδη για τουριστικούς σκοπούς ενώ για τον ίδιο σκοπό οδηγούνται και άλλοι 3.

Είναι αυτονόητο ότι οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ραδονίου σχετίζονται με τα ορυχεία ουρανίου. Στα 30 υπό μελέτη ορυχεία ουρανίου, οι συγκεντρώσεις ραδονίου βρέθηκε να κυμαίνονται από λίγα Bq/m³ έως μερικά εκατομμύρια Bq/m³ (8 - 3,932,920 Bq/m³). Στα 71 υπό μελέτη ανθρακωρυχεία, οι συγκεντρώσεις βρέθηκαν από 1.22 έως 64,400 Bq/m³. Στα ορυχεία άνθρακα επικρατούσαν γενικότερα χαμηλότερες συγκεντρώσεις ραδονίου σε σχέση με τις άλλες δύο κατηγορίες ορυχείων, δεδομένης της πιο ενδεδειγμένης χρήσης εξαερισμού που πραγματοποιούνταν με σκοπό τη μείωση του μεθανίου και άλλων αερίων, για την αποφυγή εκρήξεων. Τέλος στα υπόλοιπα ορυχεία άλατος, σιδήρου, χαλκού, αιματίτη κ.λπ., οι συγκεντρώσεις κυμαίνονταν από μερικές δεκάδες έως μερικές χιλιάδες Bq/m³, όπως φαίνεται και στα υπόγεια ανθρακωρυχεία.

Πέρα από τις συγκεντρώσεις ραδονίου, γίνεται στην εργασία εκτενής σχολιασμός σχετικά με τους χρόνους έκθεσης στην ακτινοβολία καθώς και με την έννοια της «δόσης» (ισοδύναμη, απορροφούμενη, ενεργός) που σχετίζεται με τον χρόνο ακτινοβολίας των εργαζομένων, των τουριστών αλλά και των επισκεπτών, με επίφαση στους επαγγελματικούς χώρους, που αποτελούν στις κατευθυντήριες οδηγίες χώροι προτεραιότητας.

ABSTRACT

Radon (Rn), a natural colorless, odorless, noble radioactive gas, with a half-life of 3.8 days, is the most important source of natural ionizing radiation. It comes from the initial concentrations of uranium and its transmuted daughters in rocks, soil and finally waters and tends to be concentrated in closed spaces such as underground mines, caves as well as in underground and mainly ground floor houses. The concentration of radon in the above areas contributes significantly to the increase of the dose of ionizing radiation received by humans by visiting, accessing, working and / or living in these areas.

The effects of radon on human health have been investigated for several decades in which more published papers on the subject, record and monitor the values of radon concentrations in all the areas described above and support the need for rules, from global (WHO, World Health Organization), regional (Euratom) to national level (competent ministries, Hellenic Atomic Energy Commission, GAEC, scientific and research bodies, etc.), for the protection of living, working and ordinary visitors to places where radon is highly concentrated.

The comparison and evaluation of radon concentration in active and non-active mining sites, the various methodologies used to record and monitor these values, the measurement times, the effect of the concentration on human health and the different upper concentration limits applicable by state, are the target of this thesis. The collection and evaluation of all these related data emerged from an extensive literature study. Data were collected from a total of 82 publications in international journals that have received the most citations in the international literature. These items were originally input in an active Excel file. The mines studied were categorized into three different categories of mining sites: "uranium mines", "coal mines" and "other mines" (including gold mines, iron mines, copper mines and salt mines).

According to the data of the works used, the above works refer to a total of 164 mining sites that are distributed in 29 countries around the world. Out of these sites, 107, i.e. a percentage of 65.24%, refers to active and the rest to inactive mining sites. As far as the inactive mining sites are concerned, 15 of those are already being reused for tourist purposes, while 3 others are about to be used for the same purpose.

It goes without saying that higher radon concentrations are associated with uranium mines. In the 30 uranium mines under study, radon concentrations were found to range from a few Bq/m³ to some million Bq/m³ (8 - 3,932,920 Bq/m³). In the 71 coal mines under study, concentrations were found from 1.22 to 64,400 Bq/m³. Generally, coal mines had lower radon concentrations than the other two categories of mines, given the more appropriate use of ventilation to reduce methane and other gases,

in order to prevent explosions. Finally, in the other mines of salt, iron, copper, hematite, etc., the concentrations ranged from a few tens to a few thousand Bq/m³, as also seen in the underground coal mines.

In addition to radon concentrations, the work extensively comments on radiation exposure times as well as the concept of "dose" (equivalent, absorbed, effective) associated with the radiation time of employees, tourists and visitors with emphasis on workplaces, which are priority areas in the guidelines.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η σύγκριση των συγκεντρώσεων ραδονίου τόσο σε ενεργούς, όσο και ανενεργούς μεταλλευτικούς χώρους λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά όρια συγκέντρωσής του ανά κράτος, καθώς και τις επιπτώσεις που έχει στον ανθρώπινο οργανισμό. Η εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια. Στο **1^ο κεφάλαιο** γίνεται μία γενικότερη αναφορά στο ραδόνιο, την προέλευσή του, τις μεθόδους μέτρησής του, καθώς και τις επιπτώσεις του στον άνθρωπο, ενώ, στο **2^ο κεφάλαιο** συζητείται η συγκέντρωση ραδονίου σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους μαζί με το κανονιστικό πλαίσιο ακτινοπροστασίας και τους αρμόδιους φορείς (επιτροπές) ελέγχου ραδονίου. Στη συνέχεια, στο **3^ο κεφάλαιο** παρουσιάζονται, ομαδοποιούνται και αναλύονται οι συγκεντρώσεις ραδονίου που συλλέχθηκαν από τη διεθνή βιβλιογραφία. Τέλος, στο **4^ο κεφάλαιο**, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις καθώς και τα μέτρα προστασίας από το ραδόνιο.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής, καθηγητή κ. Εμμανουήλ Μανούτσογλου, για την πολύτιμη στήριξή του όλους αυτούς τους μήνες της συνεργασίας μας καθώς και για το πολύ καλό κλίμα συνεργασίας που διαμόρφωσε, συμβάλλοντας έτσι στην αποτελεσματική αποπεράτωση της εργασίας αυτής. Ευχαριστώ επίσης για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ και να εμβαθύνω στο θέμα του ραδονίου.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου την οικογένεια μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου που ήταν δίπλα μου ανιδιοτελώς και με αστείρευτη υπομονή, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και φυσικά και κατά το διάστημα εκπόνησης της διπλωματικής μου, στηρίζοντάς με σε κάθε επιλογή και νέο βήμα μου.

Τέλος ευχαριστώ την Α., Σ., διότι χωρίς τη στήριξή της δε θα είχα καταφέρει τίποτα...

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Γενικά για το ραδόνιο	2
1.2 Μονάδες μέτρησης συγκέντρωσης του ραδονίου	3
1.2.1 Μεγέθη και μονάδες δοσιμετρίας.....	4
1.2.2 Μετατροπές μονάδων ραδιενέργειας και συγκέντρωσης ραδονίου.....	5
1.3 Ταξινόμηση μεθόδων μέτρησης του ραδονίου.....	6
1.3.1 Ταξινόμηση μεθόδων βάσει των ανιχνεύσιμων αερίων	6
1.3.2 Ταξινόμηση βάσει του χρόνου που απαιτείται για τη μέτρηση.....	7
1.3.3 Ταξινόμηση βάσει των απαιτήσεων των ανιχνευτικών συστημάτων σε τροφοδοσία ενέργειας	8
1.4 Πηγές, σχηματισμός και έκλυση ραδονίου	8
1.4.1 Έξοδος και διαφυγή ραδονίου.....	9
1.5 Επιπτώσεις του ραδονίου στην υγεία	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ	13
2.1 Γενικά για τη συγκέντρωση ραδονίου	13
2.1.1 Συγκέντρωση ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους	13
2.1.2 Συγκέντρωση ραδονίου σε εξωτερικούς χώρους (ατμόσφαιρα)	14
2.2 Συγκέντρωση ραδονίου σε εργασιακούς χώρους	15
2.3 Επιτροπές ελέγχου ραδονίου	16
2.4 Κανονιστικό πλαίσιο για το ραδόνιο	17
2.5 Ραδόνιο και μεταλλευτικοί χώροι	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ	20
3.1 Ορυχεία ουρανίου	21
3.1.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	22
3.1.2 Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων	24
3.1.2.1 <i>Μετάλλευμα ουρανίου (τοιχία ορυχείου και θραυσμένο μετάλλευμα)</i>	24
3.1.2.2 <i>Απορρίμματα επιχωμάτωσης</i>	26
3.1.2.3 <i>Υπόγεια νερά του ορυχείου</i>	28
3.1.3 Μέθοδοι μέτρησης ρυθμού διαφυγής ραδονίου (σε μεταλλεύματα ουρανίου και απορρίμματα επιχωμάτωσης)	30
3.1.3.1 <i>Μέθοδος μέτρησης ραδονίου σε δύο τοποθεσίες</i>	30
3.1.3.2 <i>Μέθοδος δοχείου άνθρακα (charcoal canister method)</i>	30
3.1.3.3 <i>Μέθοδος ροής (flow method)</i>	31
3.1.3.4 <i>Μέθοδος συσσώρευσης (Accumulation method)</i>	32

3.1.4 Μέθοδοι μέτρησης ρυθμού διαφυγής ραδονίου (σε υπόγεια νερά)	33
3.1.5 Σχολιασμός.....	34
3.2 Ανθρακωρυχεία	35
3.2.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	36
3.2.2 Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων	38
3.2.2.1 Αυτανάφλεξη γαιανθράκων (<i>coal fires</i>).....	38
3.2.2.2 Μεθάνιο γαιανθράκων (<i>Coal Seam Gas-CSG</i>)	40
3.2.3 Σχολιασμός.....	47
3.3 Άλλα ορυχεία	48
3.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	49
3.3.2 Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων	51
3.3.2.1 Αλατωρυχεία.....	51
3.3.2.2 Ορυχεία χρυσού, αργύρου, μόλυβδου και ψευδαργύρου.....	54
3.3.2.3 Ορυχεία σιδήρου, χαλκού, φωσφόρου, μαγγανίου, βολφραμίου, κασσίτερου και αιματίτη	58
3.3.3 Σχολιασμός.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ	62
4.1 Ορυχεία ουρανίου	62
4.2 Ανθρακωρυχεία	65
4.3 Άλλα ορυχεία	68
4.4 Διαγράμματα συγκέντρωσης ραδονίου	72
4.4.1 Ορυχεία ουρανίου	72
4.4.2 Ανθρακωρυχεία	74
4.4.3 Άλλα ορυχεία	76
4.5 Μέτρα και προστασία από το ραδόνιο	78
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	83
Ελληνική.....	83
Διεθνής.....	84
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ	92
A ₁ : Παγκόσμια κατανομή των αναγνωρισμένων πόρων ουρανίου, (ΙΑΕΑ, 2020)	92
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΠΙΝΑΚΕΣ.....	93
B ₁ : Αναγνωρισμένοι ανακτήσιμοι πόροι (από την 1η Ιανουαρίου 2019, τόνοι U, στρογγυλοποιημένοι στους πλησιέστερους 100 τόνους), (ΙΑΕΑ, 2020)	93
B ₂ : Αναγνωρισμένοι πόροι «in situ» (από την 1η Ιανουαρίου 2019, τόνοι U, στρογγυλοποιημένοι στοις πλησιέστερους 100 τόνους), (ΙΑΕΑ, 2020)	94
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΦΕΚ.....	95

Γ₁: ΟΔΗΓΙΑ 96/29/ΕΥΡΑΤΟΜ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 31ης Μαΐου 1996, για τον καθορισμό των βασικών κανόνων ασφάλειας για την προστασία της υγείας των εργαζομένων και του πληθυσμού από τους κινδύνους που προκύπτουν από ιονίζουσες ακτινοβολίες..... 95

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΟΡΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ 96

Δ₁: Πίνακας ορίων συγκέντρωσης ραδονίου με βάση τις δημοσιεύσεις της ICRP (International Commission on Radiological Protection), (ICRP 2019 Proceedings)..... 96

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Ραδιενεργός μεταστοιχείωση ουρανίου (U-238).....	2
Πίνακας 1.2: Μετατροπές μονάδων ραδιενέργειας και συγκέντρωσης ραδονίου.....	5
Πίνακας 3.1: Μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου	22
Πίνακας 3.2: Μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου.....	37
Πίνακας 3.3: Μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου σε ανθρακωρυχεία ανά τον κόσμο.....	44
Πίνακας 3.4: Μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου.....	49
Πίνακας 3.5: Συνολική ετήσια ενεργή δόση ανά ορυχείο.....	56
Πίνακας 4.1: Ομαδοποίηση μέγιστων συγκεντρώσεων ραδονίου στα ορυχεία ουρανίου.....	73
Πίνακας 4.2: Ομαδοποίηση ελάχιστων συγκεντρώσεων ραδονίου στα ορυχεία ουρανίου.....	74
Πίνακας 4.3: Ομαδοποίηση μέγιστων συγκεντρώσεων ραδονίου στα ανθρακωρυχεία.....	75
Πίνακας 4.4: Ομαδοποίηση ελάχιστων συγκεντρώσεων ραδονίου στα ανθρακωρυχεία.....	76
Πίνακας 4.5: Ομαδοποίηση μέγιστων συγκεντρώσεων ραδονίου στα υπόλοιπα ορυχεία.....	77
Πίνακας 4.6: Ομαδοποίηση ελάχιστων συγκεντρώσεων ραδονίου στα υπόλοιπα ορυχεία.....	78
Πίνακας 4.7: Γενική εκτίμηση της απόδοσης των μέτρων μείωσης συγκεντρώσεων ραδονίου για διάφορα είδη χώρων εργασίας	81

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Απεικόνιση του σχηματισμού και της μεταφοράς του ραδονίου εντός των διαφόρων υλικών.....	11
Σχήμα 2.1: Κατανομή πηγών ετήσιας ληφθείσας δόσης από τον άνθρωπο.....	15

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3.1: Συσχέτιση ρυθμού διαφυγής ραδονίου με την ποιότητα μεταλλεύματος(%).....	25
Εικόνα 3.2: Συσχέτιση συντελεστή εκροής ραδονίου με τον κορεσμό σε νερό.....	27
Εικόνα 3.3: Συσχέτιση ρυθμού διαφυγής ραδονίου με τον κορεσμό σε νερό.....	28
Εικόνα 3.4: Συσχέτιση συγκέντρωσης ραδονίου (Bq/m^3) με τη βροχόπτωση.....	42
Εικόνα 3.5: Συσχέτιση συγκέντρωσης ραδονίου (Bq/m^3) με τις εποχές	43
Εικόνα 3.6: Συσχέτιση συγκέντρωσης ραδονίου (Bq/m^3) με τη θερμοκρασία.....	43
Εικόνα 3.7: Συσχέτιση συγκέντρωσης ραδονίου και θερμοκρασίας με την ώρα	46
Εικόνα 3.8: Συσχέτιση συγκέντρωσης ραδονίου με την απόσταση από την είσοδο του ορυχείου.....	47
Εικόνα 3.9: Συσχέτιση συγκέντρωσης ραδονίου με τη συχνότητα κατανομής της (%).....	55
Εικόνα 3.10: Συσχέτιση συγκέντρωσης ραδονίου με το ρυθμό διαφυγής.....	57
Εικόνα 3.11: Έκθεση στο ραδόνιο (σε $\text{kBq m}^{-3} \text{ h}$) ανά εποχή και ετησίως για διάφορες θέσεις εργασίας στο ορυχείο χαλκού.....	60
Εικόνα 3.12: Έκθεση στο ραδόνιο (σε $\text{kBq m}^{-3} \text{ h}$) ανά εποχή και ετησίως για διάφορες θέσεις εργασίας στο ορυχείο σιδήρου.....	60
Εικόνα 4.1: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας μετρήσεων, υπολογισμού και γνωστοποίησης της έκθεσης των εργαζομένων	80

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 4.1: Κατανομή μέγιστων τιμών συγκέντρωσης στα ορυχεία ουρανίου.....	72
Διάγραμμα 4.2: Κατανομή ελάχιστων τιμών συγκέντρωσης στα ορυχεία ουρανίου.....	73
Διάγραμμα 4.3: Κατανομή μέγιστων τιμών συγκέντρωσης στα ανθρακωρυχεία.....	74
Διάγραμμα 4.4: Κατανομή ελάχιστων τιμών συγκέντρωσης στα ανθρακωρυχεία.....	75
Διάγραμμα 4.5: Κατανομή μέγιστων τιμών συγκέντρωσης στα υπόλοιπα ορυχεία.....	76
Διάγραμμα 4.6: Κατανομή ελάχιστων τιμών συγκέντρωσης στα υπόλοιπα ορυχεία.....	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο άνθρωπος με το σύγχρονο πλέον τρόπο ζωής του, εκτίθεται καθημερινά σε διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας. Σύμφωνα με την Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, με τον όρο «ακτινοβολία» εννοούμε τη διάδοση ενέργειας στο χώρο είτε με τη μορφή σωματιδίων (π.χ. ηλεκτρόνια), είτε με τη μορφή κυμάτων (π.χ. ραδιοκύματα). Οι πηγές της ακτινοβολίας μπορεί να είναι φυσικές ή τεχνητές. Μία φυσική πηγή ακτινοβολίας είναι τα φυσικά ραδιοϊσότοπα, τα οποία μπορούν να βρεθούν στο έδαφος, στο υπέδαφος, στον αέρα, καθώς και στο νερό. Τα κυριότερα στοιχεία που έχουν ραδιοϊσότοπα, δηλαδή να έχουν ασταθή ισότοπα που να μεταστοιχειώνονται εκπέμποντας ραδιενέργεια είναι το ουράνιο, το κάλιο και το θόριο. Το στοιχείο ράδιο είναι στερεό μέρος της ραδιενεργούς σειράς του ουρανίου. Το ράδιο με τη σειρά του, δίνει ως προϊόν διάσπασής του, το ραδόνιο που είναι αέριο εκπέμποντας ακτινοβολία α . Λαμβάνοντας επίσης υπόψη ότι η εισπνοή του είναι η δεύτερη κατά σειρά αιτία πρόκλησης καρκίνου του πνεύμονα, συμπεραίνεται ότι δικαίως χαρακτηρίζεται από πολλούς ως ένας «φυσικός ραδιενεργός ρύπος».

Από το παρελθόν κιόλας έχει δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στη μελέτη κατανομής του ραδονίου σε κλειστούς εσωτερικούς χώρους (π.χ. σπήλαια, ορυχεία, κατοικίες κλπ.), στους οποίους και συγκεντρώνεται σε μεγάλο βαθμό. Ολοένα και περισσότερες δημοσιευμένες επιστημονικές εργασίες σχετικές με το συγκεκριμένο θέμα, σχολιάζουν την ανάγκη για εξασφάλιση της υγείας και ασφαλούς προσέλευσης των εργαζομένων ή/και των επισκεπτών. Πολλές από αυτές επικεντρώνονται στην συγκέντρωση ραδονίου τόσο σε ενεργούς όσο και σε ανενεργούς μεταλλευτικούς χώρους. Σκοπός της εργασίας αυτής αποτελεί η συλλογή και σύγκριση δεδομένων σχετικά με συγκεντρώσεις ραδονίου σε ενεργούς και μη μεταλλευτικούς χώρους σύμφωνα πάντα με τις ισχύουσες νομοθεσίες, εξαρτώμενη από την χώρα στην οποία βρίσκεται το εκάστοτε ορυχείο. Στα πλαίσια αυτής της διαδικασίας είναι η παράθεση όλων των αναγκαίων μέτρων σε περίπτωση υπέρβασης των ορίων, ούτως ώστε να μειωθούν οι συγκεντρώσεις του ραδονίου και να προστατευτεί η ανθρώπινη υγεία.

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε διεθνής βιβλιογραφία από σχετικές δημοσιεύσεις που αφορούσαν το ραδόνιο, για τη συλλογή δεδομένων για υπόγειους και υπαίθριους μεταλλευτικούς χώρους. Έπειτα από αναζήτηση, συλλέχθηκαν 82 ξένες δημοσιεύσεις για ορυχεία, από διάφορες πηγές. Οι μεταλλευτικοί χώροι κατηγοριοποιήθηκαν σε:

- 1) Ορυχεία ουρανίου (26 δημοσιεύσεις)
- 2) Ορυχεία άνθρακα (21 δημοσιεύσεις)

3) Άλλα ορυχεία (35 δημοσιεύσεις)

Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα οργανώθηκαν σε τρεις ξεχωριστούς πίνακες Excel (ανάλογα με την κατηγορία του ορυχείου). Στους τρεις πίνακες παρατίθενται διάφορες πληροφορίες σχετικά με το κάθε ορυχείο και τις μετρήσεις ραδονίου που πραγματοποιήθηκαν σε αυτό (π.χ. είδος, τύπος και όνομα ορυχείου, μέθοδοι μετρήσεων). Κεντρικό σημείο αναφοράς στους πίνακες αποτελεί η παρουσίαση των συγκεντρώσεων ραδονίου στα ορυχεία. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρονται οι ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές. Έπειτα έγινε η συσχέτιση της συγκέντρωσης ραδονίου σε συνάρτηση με διάφορες παραμέτρους, οι οποίες θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα. Γενικά οι συγκεντρώσεις ραδονίου και οι ετήσιες απορροφούμενες δόσεις, καθίστανται «οδηγοί» για το χαρακτηρισμό ενός ορυχείου ως «ασφαλές» ή «μη ασφαλές» για λειτουργία αλλά και επισκεψιμότητα. Τέλος, μετά από την προαναφερθείσα διαδικασία και σε συνδυασμό με τα καθορισμένα όρια από τη νομοθεσία, διεξάχθηκαν κάποια συμπεράσματα όσον αφορά τους μεταλλευτικούς χώρους. Οι μετρήσεις και τα συμπεράσματα της διπλωματικής αυτής, θα παρουσιαστούν στα επόμενα κεφάλαια.

1.1 Γενικά για το ραδόνιο

Το ραδόνιο (radon) αποτελεί ένα χημικό στοιχείο, το οποίο ανήκει στον περιοδικό πίνακα και συγκεκριμένα στην ομάδα των ευγενών αερίων. Ανακαλύφθηκε το 1900 από τον Γερμανό φυσικό Φρήντιχ Ερστ Ντορν και πήρε το όνομα «ραδόνιο», δεδομένου ότι ήταν προϊόν της ακτινοβολίας του ραδίου. Έχει ατομικό αριθμό 86, ατομικό βάρος (222), θερμοκρασία τήξεως -71°C και θερμοκρασία βρασμού -61.8°C . Είναι ραδιενεργό, άχρωμο, άοσμο, άγευστο και συνεπώς δεν μπορεί να ανιχνευθεί από τις ανθρώπινες αισθήσεις. Αποτελεί το βαρύτερο από τα ευγενή αέρια και δεδομένου ότι είναι χημικά αδρανές, δεν επηρεάζεται από χημικές διεργασίες.

Ο σχηματισμός του ραδονίου γίνεται μέσω της ραδιενεργούς διάσπασης του ουρανίου, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα:

<u>Στοιχείο</u>	<u>Z</u>	<u>Εκπομπή</u>	<u>Ημι-ζωή</u>
Ουράνιο-238	92	α	4.51×10^9 έτη
Θόριο-234	90	β, γ	24.1 ημέρες
Προτακτίνιον-234	91	β, γ ή β	1.18 λεπτά 6.7 ώρες
Ουράνιο-234	92	α	2.48×10^5 έτη

Θόριο-230	90	α	8×10^4 έτη
Ράδιον-226	88	α,γ	1622 έτη
Ραδόνιον-222	86	α	3.825 ημέρες
Πολώνιον-218	84	α,β	3.05 λεπτά
Μόλυβδος-214	82	β,γ	26.8 λεπτά

Πίνακας 1.1: Ραδιενεργός μεταστοιχείωση ουρανίου (U-238)/ [Link 1](#)

Στη φύση υπάρχουν 40 γνωστά ισότοπα του ραδονίου, τα περισσότερα από τα οποία έχουν μικρούς χρόνους ημιζωής.

Ανάμεσά τους, το Rn-222 (ραδόνιο) και το Rn-220 (θορόνιο) που είναι και από τα πιο σημαντικά. Το Rn-222, ως το πιο άφθονο και σταθερό ισότοπο του ραδονίου, έχει χρόνο ημιζωής 3.825 ημέρες και προέρχεται άμεσα από την αποσύνθεση του ραδίου (Kang et al., 2019).

1.2 Μονάδες μέτρησης συγκέντρωσης του ραδονίου

Λόγω της σύνθετης και ραγδαίας εξέλιξης στον τομέα επιστημονικής κατανόησης του ραδονίου και των θυγατρικών του, έχει χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς μία μεγάλη ποικιλία μονάδων μέτρησής του, πολλές από τις οποίες είχαν την προοπτική εκτίμησης της έκθεσης σε αυτό, καθώς και τις επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρει στην υγεία του ανθρώπου (Mudd, 2008). Μερικές από αυτές είναι:

- **Becquerel (Bq-Μπεκερέλ):** Αντιπροσωπεύει τη συχνότητα των πυρηνικών διασπάσεων στη μονάδα του χρόνου. Το 1 Bq σηματοδοτεί μία πυρηνική διάσπαση ανά δευτερόλεπτο. Οι συγκεντρώσεις ραδονίου στην παρούσα διπλωματική εκφράζονται σε Bq/m³. Με απλά λόγια, 1 Bq/m³ σημαίνει ότι κατά μέσο όρο σε κάθε κυβικό μέτρο αέρα, συμβαίνει μία διάσπαση ενός ατόμου ραδονίου ανά δευτερόλεπτο (από Τομέ, 2018).
- **Curie (Ci-Κιουρί):** Αποτελεί παλαιότερη μονάδα μέτρησης της ραδιενέργειας και με αυτή μετράται ο ρυθμός με τον οποίο πραγματοποιείται η ραδιενεργός διάσπαση του πυρήνα σε μία ουσία. Είναι δηλαδή η ποσότητα της ραδιενέργειας που εκπέμπεται από 1gr ραδίου. Δεδομένου ότι η μονάδα Curie είναι αρκετά μεγάλη για να εκφράσει τα μεγέθη που μας απασχολούν στην προκειμένη περίπτωση, συχνά εμφανίζεται με τα υποπολλαπλάσιά της, δηλαδή το pCi και το μCi. Συνήθης είναι η έκφραση της συγκέντρωσης ραδονίου και σε pCi/l.
- **Working level (WL):** Αποτελεί έκφραση της συγκέντρωσης ραδονίου και χρησιμοποιείται σε περιβάλλοντα εξόρυξης ουρανίου. Όταν η συγκέντρωση του αερίου ραδονίου φτάσει τα

3700 Bq/m³, τότε έρχεται σε ισορροπία με τα θυγατρικά του και εκπέμπει ενέργεια ίση με 1.3×10⁵ MeV, το οποίο καλείται ως 1WL (Sahu et al., 2015).

- **Working level month (WLM):** Ορίζεται ως η αθροιστική έκθεση ενός ατόμου σε συγκέντρωση ραδονίου 1WL για έναν (εργατικό) μήνα, αποτελούμενο από 170 ώρες. Το 1 WLM είναι περίπου ίσο με τη δόση που λαμβάνει ένα άτομο μετά από ένα χρόνο κατοικίας σε ένα σπίτι με συγκέντρωση ραδονίου 227 Bq/m³ (Kang et al., 2019).

1.2.1 Μεγέθη και μονάδες δοσιμετρίας

Η έννοια της «έκθεσης» και τα μεγέθη δοσιμετρίας (δόσεις), χρησιμοποιούνται προκειμένου να γίνουν κατανοητές οι επιπτώσεις της ακτινοβολίας στον άνθρωπο και είναι τα εξής **(ΦΕΚ 194/Α'/20.11.2018)**:

- **Έκθεση :** Καλείται η πράξη της έκθεσης ή η κατάσταση έκθεσης σε ιοντίζουσα ακτινοβολία που εκπέμπεται εκτός (εξωτερική έκθεση) ή εντός του σώματος (εσωτερική έκθεση). Στο Διεθνές Σύστημα μονάδων (SI) η έκθεση μετριέται σε Coulomb/kg.
- **Δυνητική έκθεση:** Ονομάζεται η έκθεση που δεν αναμένεται με βεβαιότητα, αλλά που δύναται να προκύψει από ένα περιστατικό ή μια αλληλουχία περιστατικών πιθανολογικής φύσης, συμπεριλαμβανομένων αστοχιών εξοπλισμού και σφαλμάτων χειρισμού.
- **Απορροφούμενη δόση (absorbed dose):** Καλείται η ενέργεια που απορροφάται ανά μονάδα μάζας, όπως περιγράφεται στον παρακάτω τύπο:

$$D = \frac{\overline{de}}{dm} \quad (1)$$

όπου,

\overline{de} είναι η μέση ενέργεια που εναποτίθεται από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες στην ύλη μέσα σε ένα στοιχείο όγκου και dm είναι η μάζα της ύλης που εμπεριέχεται σε αυτό το στοιχείο όγκου. Η απορροφούμενη δόση δηλαδή, νοείται ως η μέση δόση σε ιστό ή σε όργανο. Μονάδα της απορροφούμενης δόσης ορίζεται στο διεθνές σύστημα το Gray (Gy).

- **Ισοδύναμη ή βιολογική δόση (equivalent dose):** Η απορροφούμενη δόση στον ιστό ή το όργανο T σταθμισμένη για το είδος και την ποιότητα της ακτινοβολίας R . Πρακτικά η ισοδύναμη δόση εκφράζει τις βιολογικές συνέπειες που προκύπτουν από έκθεση σε διαφορετικούς τύπους ακτινοβολίας σε ένα ανθρώπινο ιστό ή όργανο. Δίνεται από τον τύπο:

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R} \quad (2)$$

όπου,

$D_{T,R}$ είναι η απορροφούμενη μέση δόση σε ιστό ή όργανο T, λόγω της ακτινοβολίας R και w_R είναι ο συντελεστής στάθμισης ακτινοβολίας. Μονάδα της ισοδύναμης δόσης στο διεθνές σύστημα είναι το Sievert (Sv).

- **Ενεργός δόση (effective dose):** Ορίζεται ως το άθροισμα των σταθμισμένων ισοδύναμων δόσεων σε όλους τους ιστούς και όργανα του σώματος από εσωτερική και εξωτερική έκθεση. Δίνεται από τον τύπο:

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (3)$$

όπου,

$D_{T,R}$ είναι η απορροφούμενη μέση δόση σε ιστό ή όργανο T, λόγω της ακτινοβολίας R, w_R είναι ο συντελεστής στάθμισης ακτινοβολίας και w_T είναι ο συντελεστής στάθμισης για τον ιστό ή το όργανο T. Μονάδα μέτρησης είναι και σε αυτή την περίπτωση το Sievert (Sv). Η ενεργός δόση ουσιαστικά εκφράζει τον κίνδυνο από έκθεση σε ακτινοβολίες για κάθε όργανο ή ιστό, μιας και όπως είναι γνωστό, οι διάφοροι ιστοί και τα διάφορα όργανα του ανθρώπινου σώματος παρουσιάζουν διαφορετική ευαισθησία στην έκθεση σε ακτινοβολίες.

1.2.2 Μετατροπές μονάδων ραδιενέργειας και συγκέντρωσης ραδονίου

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν γίνει μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου με διαφορετικές μονάδες σε διαφορετικές περιοχές, σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Προκειμένου να μπορέσει να γίνει ορθή σύγκριση των αποτελεσμάτων συγκέντρωσης ραδονίου καθώς και της δόσης αυτού, κρίνεται απαραίτητη η μετατροπή των μονάδων του στο ίδιο σύστημα μονάδων. Οι μετατροπές και οι συντελεστές τους παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα ως εξής:

<u>Μονάδα</u>	<u>Μετατροπή</u>
Curie (Ci)	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
pCi/l	1 pCi/l= 37 Bq/m ³
WL	1 WL=3700 Bq/m ³
WLM	629.000 Bq h m ⁻³

Πίνακας 1.2: Μετατροπές μονάδων ραδιενέργειας και συγκέντρωσης ραδονίου

1.3 Ταξινόμηση μεθόδων μέτρησης του ραδονίου

Η συνεχής παρουσία του ραδονίου στο περιβάλλον σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρει στην ανθρώπινη υγεία, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών μεθόδων για τον προσδιορισμό του ραδονίου. Κάποιοι άλλοι, εξίσου σημαντικοί λόγοι μέτρησης ραδονίου είναι ο εντοπισμός πρώτων υλών (π.χ. ουράνιο, πετρέλαιο), ο καθορισμός γεωθερμικών πηγών ενέργειας, η χαρτογράφηση ρηγμάτων και η μελέτη της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Οι κυριότερες μέθοδοι μέτρησης συγκέντρωσης ραδονίου αναφέρονται στον Τομέ (2008). Η πλειονότητα των μεθόδων μέτρησης ραδονίου στηρίζεται στην αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας α και γ με τον εκάστοτε ανιχνευτή. Πιο συγκεκριμένα, οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην ανίχνευση α -σωματιδίων που εκπέμπονται από τα ραδιονουκλίδια κατά τη ραδιενεργό διάσπασή τους.

Η ταξινόμηση των μεθόδων μέτρησης ραδονίου γίνεται με βάση:

- 1) Τα αέρια που ανιχνεύονται
- 2) Τον χρόνο που απαιτείται για τη μέτρηση
- 3) Τις απαιτήσεις των ανιχνευτικών συστημάτων σε τροφοδοσία ενέργειας

1.3.1 Ταξινόμηση μεθόδων βάσει των ανιχνεύσιμων αερίων

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι **άμεσες** και **έμμεσες** μέθοδοι ανίχνευσης ραδονίου. **Άμεσες** καλούνται οι μέθοδοι οι οποίες διεκπεραιώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε, να διαχωρίζεται το ένα ραδιοϊσότοπο του ραδονίου από το άλλο με άμεση πειραματική διαδικασία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η άμεση μέτρηση της συγκέντρωσης του ^{222}Rn , δίχως την παρουσία του ^{220}Rn (θωρόνιο). Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο διαχωρισμός της μέτρησης ραδονίου από το θωρόνιο, αξιοποιείται πειραματικά ο μικρός χρόνος ημιζωής του δεύτερου ισότοπου, χρησιμοποιώντας ηθμούς διαμέσου των οποίων διέρχονται τα ισότοπα ^{222}Rn και ^{220}Rn . Οι **έμμεσες** μέθοδοι είναι αυτές που βασίζονται στην άμεση μέτρηση και την εκτίμηση των συγκεντρώσεων των θυγατρικών του ραδονίου. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ο έμμεσος προσδιορισμός των συγκεντρώσεων των μητρικών ισωτόπων ^{222}Rn και ^{220}Rn . Για παράδειγμα, για να εκτιμηθεί η συγκέντρωση του ^{220}Rn (δίχως την παρουσία του ^{222}Rn), χρησιμοποιούνται δύο ανιχνευτικά συστήματα. Το ένα επιτρέπει την ανίχνευση και των δύο ραδιοϊσοτόπων, ενώ το δεύτερο αποκλείει τη μέτρηση του ^{220}Rn . Από τη διαφορά των μετρήσεων στα δυο συστήματα προκύπτει έμμεση μέτρηση της συγκέντρωσης του ^{220}Rn (Πατήρης, 2009).

1.3.2 Ταξινόμηση βάσει του χρόνου που απαιτείται για τη μέτρηση

- ❖ **Μέθοδος στιγμιαίας δειγματοληψίας ή αρπαγής (grab sampling):** Στην τεχνική αυτή συλλέγεται μικρός όγκος αέρα, ο οποίος στη συνέχεια αναλύεται στο εργαστήριο. Η ραδιενέργεια που ανιχνεύεται αντιπροσωπεύει τη μέση συγκέντρωση των ραδιοϊσοτόπων του αέρα τη στιγμή λήψης του, η οποία αντιστοιχεί στην τιμή της συγκέντρωσης του ραδονίου κατά τη στιγμή έναρξης της μέτρησης. Η χρονική διάρκεια της δειγματοληψίας ποικίλει από μερικά δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά. Βασικά ανιχνευτικά μέσα που βασίζονται στην προαναφερθείσα μέθοδο, είναι οι κυψελίδες σπινθηρισμών (scintillation cells), καθώς και οι θάλαμοι ιοντισμού (ionisation chambers)(Mudd, 2008).
- ❖ **Μέθοδος συνεχούς καταγραφής (continuous measurements):** Πρόκειται για μία μέθοδο κατά την οποία οι επιμέρους μετρήσεις που πραγματοποιούνται, γίνονται σε μικρό χρονικό διάστημα, για κάποια λεπτά ή και ώρες. Ωστόσο το συνολικό χρονικό διάστημα καταγραφής των συγκεντρώσεων ραδονίου, μπορεί να διαρκέσει από βδομάδες έως και μήνες. Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται έχουν την ιδιότητα να καταγράφουν γρήγορα τις συγκεντρώσεις ραδιενέργειας. *Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η χρονική διακύμανση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας αποτελεί το αντικείμενο μελέτης, ή όταν πραγματοποιούνται συσχετίσεις με μεγέθη που μεταβάλλονται συνέχεια με το χρόνο (π.χ. υγρασία, θερμοκρασία, ρυθμός έκλυσης ραδονίου κ.λπ.)* (Πατήρης, 2009). Οι θάλαμοι ιοντισμού ανήκουν στα ανιχνευτικά μέσα που καταγράφουν με τη «συνεχή μέθοδο».
- ❖ **Μέθοδος χρονικά ολοκληρωμένων μετρήσεων (time-integrated measurements):** Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση της μέσης τιμής της συγκέντρωσης ραδιενέργειας σε ένα χώρο, σε χρονικές περιόδους της τάξης ημερών έως μηνών. *Οι μέθοδοι αυτές εφαρμόζονται για την εκτίμηση της μέσης ραδιενεργού έκθεσης και έτσι χρησιμοποιούνται ευρέως για υπολογισμούς δοσιμετρίας. Το ανιχνευτικό σύστημα αφήνεται για ένα χρονικό διάστημα στο χώρο μέτρησης, χωρίς να απαιτείται τροφοδοσία του. Μετά το πέρας της έκθεσης εκτιμάται με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών η μέση τιμή της συγκέντρωσης του ραδονίου ή (και) των θυγατρικών του στο χώρο* (Πατήρης, 2009). Στην κατηγορία αυτών των μεθόδων υπάγονται ανιχνευτικά μέσα όπως οι ανιχνευτές φορτισμένων επιφανειών (charged electrets), οι ανιχνευτές ενεργού άνθρακα (activated carbon), καθώς και οι ανιχνευτές πυρηνικών ιχνών (nuclear tracks detectors).

1.3.3 Ταξινόμηση βάσει των απαιτήσεων των ανιχνευτικών συστημάτων σε τροφοδοσία ενέργειας

Βάσει του κριτηρίου των απαιτήσεων του ανιχνευτικού συστήματος σε τροφοδοσία, οι μέθοδοι διακρίνονται σε (Tchorz-Trzeciakiewicz and Parkitny, 2015):

- ❖ **Ενεργές μεθόδους (active methods):** Στις μεθόδους αυτές απαιτείται η τροφοδοσία ενέργειας για τη λειτουργία των ανιχνευτικών συστημάτων. Τα χαρακτηριστικά των ενεργών μεθόδων είναι τα εξής: απαραίτητη η χρήση μπαταρίας ή ηλεκτρισμού, ο εξοπλισμός είναι αρκετά ακριβός, η καταγραφή δεδομένων γίνεται κάθε λεπτό ή κάθε ώρα, η εργαστηριακή ανάλυση (πέρα από την επεξεργασία των δεδομένων σε υπολογιστή) δεν κρίνεται απαραίτητη, μπορούν να καταγραφούν και άλλες παράμετροι εκτός από τις συγκεντρώσεις ραδονίου (π.χ. υγρασία κλπ.). Οι θάλαμοι σπινθηρισμών, οι θάλαμοι ιοντισμού καθώς και οι θάλαμοι ημιαγώγιμων υλικών, είναι μερικές από τις ανιχνευτικές μεθόδους που υπάγονται στις «ενεργές μεθόδους».
- ❖ **Παθητικές μεθόδους (passive methods):** Στις μεθόδους αυτές δεν απαιτείται η τροφοδοσία ενέργειας για τη λειτουργία των ανιχνευτικών συστημάτων. Τα χαρακτηριστικά των παθητικών μεθόδων είναι τα εξής: η χρήση μπαταρίας ή ηλεκτρισμού δεν κρίνεται απαραίτητη, είναι φθηνότερες συγκριτικά με τις ενεργές μεθόδους, τα συλλεγμένα δεδομένα προϋποθέτουν εργαστηριακή ανάλυση και τέλος καταγράφονται μόνο οι συγκεντρώσεις ραδονίου και των θυγατρικών του, χωρίς καμία άλλη παράμετρο (π.χ. κλιματολογικές). Χαρακτηριστικά παραδείγματα παθητικών μεθόδων είναι οι ανιχνευτές ενεργοποιημένου ξυλάνθρακα (charcoal detectors), οι ανιχνευτές καταγραφής ιχνών (etched track detectors) καθώς και οι ανιχνευτές ηλεκτρίσιμων υλικών (electret ion chambers) (Miles, 2004).

1.4 Πηγές, σχηματισμός και έκλυση ραδονίου

Οι πηγές που περιέχουν ράδιο (^{226}Ra - μητρικό ισότοπο του ραδονίου) και παράγουν ραδόνιο (^{222}Rn), μπορούν να διαχωριστούν από αυτές που είναι απλώς εμπλουτισμένες σε ραδόνιο ως αποτέλεσμα χημικής διάλυσής του. Το έδαφος της γης και τα υλικά που προέρχονται από αυτό ανήκουν στην πρώτη κατηγορία των πηγών, ενώ στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν ο ατμοσφαιρικός αέρας και το φυσικό αέριο. Τόσο τα επιφανειακά όσο και τα υπόγεια ύδατα, μπορούν να ενταχθούν σε μία ενδιάμεση κατηγορία (Νικολόπουλος κ.α. 2015).

Τα εδάφη και τα πετρώματα έχουν πέραν των διακένων δύο βασικά μέρη: α) το στερεό και β) το ρευστό. Το στερεό μέρος αποτελείται σε μεγαλύτερο ποσοστό από μεταλλικούς κόκκους ενός

μεγάλου εύρους διαστάσεων και σε μικρότερο ποσοστό από οργανική ύλη. Το ρευστό μέρος αποτελείται από υγρά - κύρια νερό - και αέρια. Τα υγρά και τα αέρια του ρευστού μέρους περικλείονται στα ενεργά διάκενα μεταξύ των κόκκων, τα οποία καλούνται επικοινωνούντες πόροι. Το ραδόνιο, ανήκοντας στη ραδιενεργό σειρά του ουρανίου, βρίσκεται στους κόκκους των πετρωμάτων καθώς και των εδαφών, με το τελευταίο να αποτελεί μία από τις κύριες πηγές έκλυσης ραδονίου στο ανθρώπινο περιβάλλον. Τα εδάφη και τα πετρώματα της γης παράγουν διαρκώς ^{222}Rn λόγω των πυρήνων ^{226}Ra που περιέχουν, οι οποίοι, μάλιστα, είναι δυνατόν να αντικαθίστανται συνεχώς μέσω των φυσικών ραδιενεργών διασπάσεων της αλυσίδας του ουρανίου-238. Λόγω αυτού, το ποσό του ^{222}Rn που παράγεται από τα εδάφη και τα πετρώματα της γης εξαρτάται σημαντικά από το αρχικό περιεχόμενό τους σε ^{238}U (Zouridakis et. al., 2002).

Ωστόσο λόγω της αέριας φύσης του, το ραδόνιο, εν αντιθέσει με το ουράνιο και το ράδιο τα οποία είναι στερεά, έχει την ικανότητα να διαφεύγει μέσω των πόρων ή των ρωγμών. *Η δυνατότητα σχηματισμού αέριου ραδονίου στα πετρώματα εξαρτάται από την περιεκτικότητα των κόκκων του πετρώματος σε ουράνιο, αλλά και από τον συντελεστή εκροής, το ποσοστό, δηλαδή, του ραδονίου των κόκκων ενός πετρώματος που εν τέλει εισέρχεται στους πόρους (Nazaroff et al., 1992).* Πριν από τη διαδικασία της διαφυγής του ραδονίου, προηγείται η έξοδός του από τους γεωλογικούς σχηματισμούς σε δύο φάσεις οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω.

1.4.1 Έξοδος και διαφυγή ραδονίου

Οι δύο φάσεις στις οποίες ολοκληρώνεται η έξοδος του ^{222}Rn από τους γεωλογικούς σχηματισμούς είναι οι εξής (Κασινάλης, 2008):

- **Εκροή (emanation)** ραδονίου από τους κόκκους καλείται το φαινόμενο κατά το οποίο το ραδόνιο που παράγεται από την α - διάσπαση του εγκλωβισμένου σ' αυτούς ^{226}Ra , διαφεύγει από εκεί και εισέρχεται στους πόρους.
- **Διαφυγή (exhalation)** ραδονίου καλείται το φαινόμενο κατά το οποίο ένα ποσοστό του ραδονίου που κινείται εντός των πόρων του ενεργού πορώδους, διαφεύγει τελικά προς την επιφάνεια της Γης και πριν διασπαστεί στα θυγατρικά του εισέρχεται στην ατμόσφαιρα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι από το ραδόνιο που παράγεται στους κόκκους, διαφεύγει και εισέρχεται στους πόρους του εδάφους μόνο ένα ποσοστό του. Το ποσοστό αυτό καλείται **συντελεστής εκροής (emanation coefficient)**, ή **ποσοστό εκροής (emanation fraction)**.

Σύμφωνα με την Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, η διαφυγή του ραδονίου από τους κόκκους, μέσα στους οποίους παράγεται, εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες αυτών. Πιο συγκεκριμένα:

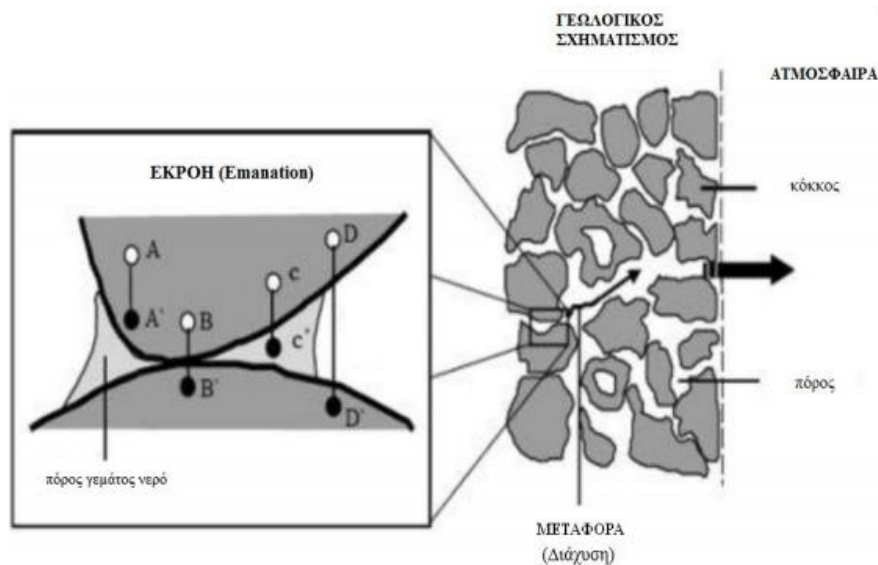
- Το μέγεθος των κόκκων
- Το πορώδες
- Τη διαπερατότητα του εδάφους
- Την υγρασία του εδάφους
- Την κρυσταλλική δομή των κόκκων

Οι βασικοί μηχανισμοί μετακίνησης (διαφυγής) του ραδονίου στο έδαφος είναι οι εξής:

- **Διάχυση (diffusion)**, η κίνηση οφείλεται στις διαφορές συγκέντρωσης που έχει το ραδόνιο μέσα στο πέτρωμα με αποτέλεσμα να κινείται προς περιοχές με χαμηλότερη συγκέντρωση (**Κασινάλης, 2008**). Όπως κάθε αέριο έτσι και το ραδόνιο έχει την τάση να εξισώνει τη συγκέντρωσή του σε όλο τον όγκο του χώρου που καταλαμβάνει. Έχει, δηλαδή, την τάση να κινείται σε κατεύθυνση αντίθετη προς στην τοπική αύξηση της συγκέντρωσής του (Πατήρης, 2009).
- **Ρεύματα αέρα (advective flow)**, εξαρτάται από τις διαφορές πιέσεων στο εσωτερικό του εδάφους με αποτέλεσμα το ραδόνιο που εμπεριέχεται στις μάζες αυτές να κινείται προς περιοχές με χαμηλή πίεση. Έτσι, λοιπόν, η έξοδος του ^{222}Rn από το έδαφος ολοκληρώνεται σε δύο φάσεις, με την απορροή και την εκροή (**Κασινάλης, 2008**). Οι διαφορές στην πίεση δημιουργούνται κυρίως από μετεωρολογικές συνθήκες ενώ στην περίπτωση κλειστών χώρων ως αποτέλεσμα μηχανικών αιτιών όπως η χρήση συστημάτων εξαερισμού ή κλιματιστικών (Πατήρης, 2009).

Κατ' αντιστοιχία όλων όσων αναφέρθηκαν ανωτέρω, η «μετανάστευση» του ραδονίου μέσα σε ένα **μετάλλευμα** και η συνεχής εκροή του μέσω της επιφάνειας του πετρώματος στην ατμόσφαιρα, εξαρτάται από τις ιδιότητες του μεταλλεύματος όπως:

1. Το περιεχόμενό του σε ράδιο (Ra)
2. Την πυκνότητα των κόκκων του
3. Το περιεχόμενό του σε νερό
4. Το πορώδες του
5. Τις ρωγμές εκροής (Sahu, et al., 2013)



Σχήμα 1.1: Απεικόνιση του σχηματισμού και της μεταφοράς του ραδονίου εντός των διαφόρων υλικών (τροποποιημένη από Knutson, 1988)

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, παρατηρούνται οι εξής εναλλακτικές δυνατότητες για τους πυρήνες του ραδονίου (Knutson, 1988; Πατήρης, 2009):

- A. Να σταματήσουν εντός των κόκκων, στους οποίους σχηματίστηκαν, δεδομένου ότι ο σχηματισμός του ραδονίου έγινε σε απαγορευτικό για την απελευθέρωσή του βάθος,
- B. Να διαπεράσουν τον κόκκο όπου σχηματίστηκαν και να εισέλθουν σε γειτονικούς κόκκους, δεδομένου ότι η κινητική του ενέργεια επαρκεί,
- C. Να σταματήσουν την κίνησή τους εντός του γειτονικού πόρου,
- D. Να διαπεράσουν τους κόκκους στους οποίους σχηματίστηκαν και τον ενδιάμεσο πόρο και να εισέλθουν σε άλλο γειτονικό κόκκο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ποσοστά εκροής που αντιστοιχούν στις διαδικασίες A, B και D θεωρούνται αμελητέα ως προς το σύνολο εκροής του ραδονίου, εν αντιθέσει με το ποσοστό της διαδικασίας C, η οποία αφορά την περίπτωση της «καθαρής» εκροής (emanation). Το σχηματιζόμενο ραδόνιο τερματίζει την κίνησή του εντός ενός πόρου και στη συνέχεια διαχέεται προς το περιβάλλον.

1.5 Επιπτώσεις του ραδονίου στην υγεία

Το ραδόνιο είναι μια από τις λίγες ουσίες που έχουν θεωρηθεί ότι είναι καρκινογόνες. Τόσο το ραδόνιο όσο και τα θυγατρικά του μπορούν να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της εισπνοής και της κατάποσης. Το μεγαλύτερο ποσοστό που θα εισπνευστεί στην συνέχεια θα

απομακρυνθεί με την εκπνοή. Ωστόσο, μία μικρή ποσότητα ραδονίου μπορεί να παραμείνει στους πνεύμονες, να υποβληθεί σε μεταστοιχείωση με ταυτόχρονη εκπομπή σωματιδίων-α, οδηγώντας έτσι σε βλάβη των πνευμόνων. Από το 1980 και μετά, έπειτα από έρευνες που διεξήχθησαν πάνω στο κομμάτι της υψηλής έκθεσης των μεταλλωρύχων στο αέριο ραδόνιο, οι οργανισμοί «World Health Organization» και «International Agency for Research on Cancer», κατέταξαν το ραδόνιο στους «καρκινογενείς παράγοντες» (Kang et al., 2019).

Οι επιπτώσεις στους ιστούς του αναπνευστικού συστήματος, οφείλονται περισσότερο στα θυγατρικά του ραδονίου παρά στο ίδιο το ραδόνιο. Αυτό συμβαίνει επειδή τα θυγατρικά του ραδονίου (π.χ. ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , και ^{214}Po), έχουν μικρότερο χρόνο ημιζωής σε σχέση με το ίδιο το ραδόνιο και είναι χημικώς ενεργά. Έτσι, είτε προσκολλημένα σε σωματίδια αεροζόλ είτε ελεύθερα, εισπνεόμενα εγκαθίστανται στους διάφορους ιστούς του αναπνευστικού συστήματος. Επειδή, όμως, οι χρόνοι ημιζωής τους είναι πολύ μικροί, είναι πιθανόν να προλάβουν να διασπαστούν στο μακρόβιο ^{210}Pb , πριν προλάβουν να εκδιωχθούν με το μηχανισμό της εκπνοής, εναποθέτοντας έτσι ενέργεια (Νικολόπουλος κ. α., 2015). Η ενέργεια αυτή μπορεί να προκαλέσει βλάβες στις ευαίσθητες κυψελίδες αυξάνοντας την πιθανότητα ανάπτυξης καρκίνου του πνεύμονα.

Πέρα από τον καρκίνο του πνεύμονα, έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες για συσχέτιση της έκθεσης στο ραδόνιο και με άλλες ασθένειες. Εκτός από τη λευχαιμία και τη χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια, η συσχέτιση των οποίων παραμένει αμφιλεγόμενη έως και σήμερα, δεν έχουν βρεθεί άλλες ασθένειες που να έχει αποδειχθεί επιστημονικά ότι οφείλονται στην έκθεση του ραδονίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ

2.1 Γενικά για τη συγκέντρωση ραδονίου

Σήμερα είναι ευρέως αποδεκτό το γεγονός ότι η έκθεση του ανθρώπου σε υψηλά επίπεδα περιβαλλοντικής ακτινοβολίας, έχει αρνητικές επιδράσεις στην υγεία του. Στην περιβαλλοντική ακτινοβολία συμπεριλαμβάνεται και αυτή του στοιχείου ραδονίου. Το ραδόνιο μπορεί να συγκεντρωθεί τόσο σε εσωτερικούς (κλειστούς), όσο και σε εξωτερικούς χώρους (ατμόσφαιρα).

2.1.1 Συγκέντρωση ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους

Όπως προαναφέρθηκε, το ραδόνιο εκλύεται από το έδαφος, τα οικοδομικά υλικά καθώς και τα υπόγεια ύδατα. Η συγκέντρωση του ραδονίου εντός ενός κλειστού χώρου εξαρτάται κυρίως από τις διαδικασίες εισόδου από το έδαφος και τα δομικά υλικά και από την διαδικασία απομάκρυνσης με τον εξαερισμό του χώρου (Πατήρης, 2009).

Οι ποσότητες του ραδονίου κυμαίνονται ευρύτατα στα **εδάφη** ανάλογα με τη σύνθεση του φλοιού και την περιεκτικότητα σε ραδιενεργά κοιτάσματα. Το ραδόνιο συναντάται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε μεταμορφωμένα πυριγενή πετρώματα, όπως ο γρανίτης, ενώ απουσιάζει από περιοχές με ιζηματογενή πετρώματα, όπως είναι τα ασβεστολιθικά (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2000). **Η μέση συγκέντρωση του Ra-226 στα εδάφη παγκοσμίως είναι 35 Bq/kg** (δηλαδή συμβαίνουν 35 διασπάσεις πυρήνων ραδίου το δευτερόλεπτο σε μάζα πετρώματος της γης ενός κιλού) (UNSCEAR, 2000). Το ραδόνιο που εκλύεται από το έδαφος έχει πολλές οδούς εισόδου σε ένα κτίριο (ΕΕΑΕ, 2005):

- Τις μικρορωγμές στα τσιμεντένια δάπεδα
- Τα κενά ή τις ρωγμές στους τοίχους
- Τα κενά στα σημεία σύνδεσης τοίχου-δαπέδου
- Τα διάκενα στα ξύλινα πατώματα
- Τα κενά στα σημεία εισόδου σωλήνων ύδρευσης και αποχέτευσης
- Τα διάκενα στις πόρτες και τα παράθυρα

Τα **δομικά υλικά** συνεισφέρουν στη συσσώρευση ραδονίου εντός των εσωτερικών χώρων. Τα υλικά κατασκευής των κτιρίων περιέχουν φυσική ραδιενέργεια, καθιστώντας τα επικίνδυνα για τους ανθρώπους, δεδομένης της συνεχούς έκθεσής τους σε αυτή. Η έκλυση του ραδονίου αυξάνεται

ακόμα και κατά τη διαταραχή και τη θραύση των πετρωμάτων κατά τη θεμελίωση ενός κτιρίου, αλλά και κατά την παραγωγή των δομικών υλικών (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2000). Το τσιμέντο για παράδειγμα, που είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό κατασκευής, περιέχει ραδιενεργά στοιχεία. Άλλα τέτοια οικοδομικά υλικά είναι διάφορα κεραμικά πλακάκια, τα κόκκινα τούβλα, η ελαφρόπετρα καθώς και οι πέτρες από ηφαιστειακή τέφρα (Βάρνης, 2016).

Άλλη μία πηγή ραδονίου είναι το **νερό** που προέρχεται από τα υδροφόρα στρώματα σε ουρανούχα πετρώματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα υπόγεια νερά παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερες συγκεντρώσεις από τα επιφανειακά. Το ποσοστό συμβολής του νερού σε ραδόνιο στον αέρα των εσωτερικών χώρων είναι πολύ μικρό σε σχέση με τη συνολική ποσότητα από τις άλλες πηγές, καθώς έρευνες έχουν δείξει ότι είναι μικρότερο του 5% (UNSCEAR, 1993).

2.1.2 Συγκέντρωση ραδονίου σε εξωτερικούς χώρους (ατμόσφαιρα)

Γενικότερα ισχύει ότι η συγκέντρωση του ραδονίου στους εξωτερικούς χώρους είναι συνήθως μικρότερη από αυτή στους εσωτερικούς (π.χ. κτίρια). Επιπλέον, δεδομένης της δυνατότητας του ραδονίου να αραιώνεται στον ατμοσφαιρικό αέρα και να διαλύεται εύκολα σε διάφορα υγρά, μπορεί να μεταφέρεται διαμέσου αυτών και να διανύει μεγάλες αποστάσεις. Η αραιώση του ραδονίου στην ατμόσφαιρα λοιπόν, επιφέρει και μικρότερες τιμές στη συγκέντρωσή του.

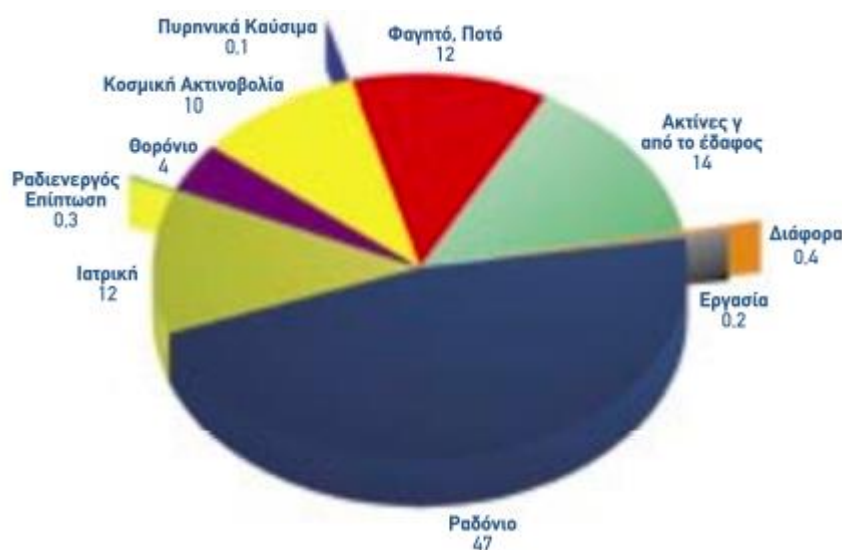
Παλαιότερα οι **μέσες συγκεντρώσεις ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα λαμβάνονταν ίσες προς μερικά Bq/m³ (4-15 Bq/m³)**. Πιο πρόσφατες μετρήσεις δείχνουν συγκεντρώσεις αρκετών δεκάδων **Bq/m³**. Αναφέρονται ωστόσο αυξημένες συγκεντρώσεις κοντά σε χώρους αποθέσεων από ορυχεία, σε περιπτώσεις *θερμοκρασιακών αναστροφών*¹ και σε εποχές εξαιρετικής ξηρασίας.

Λόγω της ελάχιστης συγκέντρωσης ραδίου στο θαλασσινό νερό και λόγω της εξαιρετικής διαλυτότητας του ραδονίου στο νερό σε χαμηλές θερμοκρασίες, **ο ατμοσφαιρικός αέρας πάνω από τους ωκεανούς παρουσιάζει πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις ραδονίου (~0.1 Bq/m³)**. Επομένως η συγκέντρωση ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα μικρών νησιών ή παράκτιων περιοχών παρουσιάζεται γενικά μειωμένη σε σχέση με εκείνη ηπειρωτικών περιοχών (Νικολόπουλος, 2000).

¹ *Θερμοκρασιακή αναστροφή* λέγεται το φαινόμενο κατά το οποίο η θερμοκρασία του αέρα αυξάνεται τοπικά με το ύψος αντί να μειώνεται, όπως κανονικά συμβαίνει ([Link 2](#)).

2.2 Συγκέντρωση ραδονίου σε εργασιακούς χώρους

Σύμφωνα με την «Επιστημονική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για τις Επιπτώσεις της Ατομικής Ακτινοβολίας» (UNSCEAR, 2000), το 47% της ετήσιας δόσης που λαμβάνει ο μέσος κάτοικος του πλανήτη οφείλεται στο ραδόνιο και στα θυγατρικά του, που είναι επίσης ραδιενεργά. Ένα μεγάλο μέρος του ραδονίου και των θυγατρικών του αυτών, οφείλεται στην εκπομπή σε διάφορους εργασιακούς χώρους.



Σχήμα 2.1: Κατανομή πηγών ετήσιας ληφθείσας δόσης από τον άνθρωπο (ΕΕΑΕ, 2005)

Η συγκέντρωση του ραδονίου σε συγκεκριμένους εργασιακούς χώρους μπορεί να φτάσει σε υψηλά επίπεδα. Οι χώροι εργασίας στους οποίους μπορεί να εμφανιστούν υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου αφορούν κυρίως σε (ΕΕΑΕ, 2005):

- Ιαματικές πηγές,
- Σπήλαια,
- Ορυχεία,
- Υπόγειους ή υπέργειους χώρους εργασίας σε καθορισμένες ζώνες,
- Εργασιακές δραστηριότητες στις οποίες γίνεται χρήση, αποθήκευση υλικών ή παραγωγή καταλοίπων, τα οποία συνήθως δε θεωρούνται ραδιενεργά, αλλά περιέχουν φυσικά ραδιονουκλίδια σε αυξημένες συγκεντρώσεις,
- Δραστηριότητες που αφορούν τη διαχείριση και το χειρισμό αεροπλάνων.

Οι χώροι εργασίας, ανάλογα με το είδος τους, παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες στη συγκέντρωση ραδονίου και τις εποχιακές μεταβολές της. Οι υπόγειοι και υπαίθριοι μεταλλευτικοί χώροι αποτελούν το περιβάλλον μέτρησης συγκέντρωσης ραδονίου που θα μας απασχολήσει στην παρούσα διπλωματική.

2.3 Επιτροπές ελέγχου ραδονίου

Δεδομένου ότι σε ορισμένες χώρες το πρόβλημα με το ραδόνιο τόσο στους εργασιακούς χώρους όσο και στις κατοικίες είναι αρκετά σοβαρό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τις τελευταίες δεκαετίες το πρόβλημα αυτό έχει λάβει μεγάλες εκτάσεις, ιδρύθηκαν επιτροπές ελέγχου της συγκέντρωσης του ραδονίου. Σκοπό των επιτροπών αυτών αποτελεί ο καθορισμός εθνικών επιπέδων αναφοράς για τις συγκεντρώσεις ραδονίου. Τα επίπεδα αυτά αφορούν μεταλλευτικούς χώρους, εδάφη, κατοικίες, τον ατμοσφαιρικό αέρα κλπ. Σε περίπτωση υπέρβασης των ορίων που έχουν θεσπιστεί από το νόμο σε συνεργασία με τις επιτροπές αυτές, κρίνεται απαραίτητη η λήψη μέτρων για τη μείωση της συγκέντρωσης ραδονίου. Ένας ακόμη βασικός στόχος των επιτροπών αυτών είναι η πρόκληση ευαισθητοποίησης γενικότερα πάνω στο κομμάτι της ακτινοβολίας και η προστασία των εργαζομένων και κατ' επέκταση και του πληθυσμού, από αυτή. Οι βασικές αυτές επιτροπές, οι οποίες θα αναφερθούν και σε άλλα σημεία της διπλωματικής, είναι οι εξής:

Σε παγκόσμιο επίπεδο

- ❖ **ICRP:** International Commission on Radiological Protection (Διεθνής Επιτροπή για την Ακτινολογική Προστασία). Είναι ένας ανεξάρτητος, διεθνής, μη κυβερνητικός οργανισμός, με αποστολή να παρέχει συστάσεις και οδηγίες για την ακτινολογική προστασία σχετικά με την ιοντίζουσα ακτινοβολία.
- ❖ **ICRU:** International Commission on Radiation Units and Measurements (Διεθνής Επιτροπή Μονάδων και Μετρήσεων Ακτινοβολίας). Είναι ένας οργανισμός τυποποίησης που ιδρύθηκε το 1925 από το Διεθνές Συνέδριο Ακτινολογίας. Καθιερώνει διεθνή επίπεδα μονάδων μέτρησης και μετρήσεων του ραδονίου.
- ❖ **UNSCEAR:** United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (Επιστημονική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για τις επιπτώσεις της Ατομικής Ακτινοβολίας). Η επιτροπή αυτή είναι εξουσιοδοτημένη από το σύστημα των Ηνωμένων Εθνών να αξιολογεί και να εκτιμά τα επίπεδα και τις συνέπειες της έκθεσης στην ιοντίζουσα ακτινοβολία.

Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο

- ❖ **EURATOM:** European Atomic Energy Community (Ευρωπαϊκή Κοινότητα Ατομικής Ενέργειας). Ο οργανισμός αυτός αποσκοπεί στο να θέσει υπό κοινό έλεγχο και διαχείριση, την παραγωγή και τη διάθεση της ατομικής ενέργειας.
- ❖ **ESR:** European Society of Radiology (Ευρωπαϊκή Εταιρεία Ακτινολογίας). Είναι αφιερωμένη στην προώθηση και το συντονισμό των επιστημονικών και επαγγελματικών δραστηριοτήτων της ακτινολογίας στην Ευρώπη. Μεταξύ των στόχων της είναι το υψηλό επίπεδο ακαδημαϊκής έρευνας στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας, η ανάπτυξη και η εφαρμογή ειρηνικών πυρηνικών εργαλείων.

Σε εθνικά επίπεδα

- ❖ **ΕΕΑΕ:** Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας. Είναι η αρμόδια αρχή για τον έλεγχο, τη ρύθμιση και την εποπτεία του τομέα πυρηνικής ενέργειας, πυρηνικής τεχνολογίας, ραδιολογικής, πυρηνικής ασφάλειας και ακτινοπροστασίας.
- ❖ **ΤΑΕΑ:** Turkish Atomic Energy Authority (Τουρκική Αρχή Ατομικής Ενέργειας). Αποτελεί τον επίσημο φορέα πυρηνικής ενέργειας της Τουρκίας.
- ❖ **ARPANSA:** Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (Αυστραλιανή Υπηρεσία Ακτινοπροστασίας και Πυρηνικής Ασφάλειας). Στόχο της υπηρεσίας αυτής αποτελεί η προστασία τόσο του αυστραλιανού λαού, όσο και του περιβάλλοντος από τις επιβλαβείς επιπτώσεις της ακτινοβολίας μέσω της κατανόησης των κινδύνων, της βέλτιστης πρακτικής, της έρευνας, της πολιτικής, των υπηρεσιών, των συνεργασιών και της συνεργασίας με την κοινότητα.
- ❖ **US NRC:** United States Nuclear Regulatory Commission (Πυρηνική κανονιστική επιτροπή των Ηνωμένων Πολιτειών), η οποία αδειοδοτεί και ρυθμίζει τη μη στρατιωτική χρήση ραδιενεργών υλικών, για την παροχή εύλογης διασφάλισης επαρκούς προστασίας της δημόσιας υγείας και ασφάλειας και για την προώθηση της κοινής άμυνας και ασφάλειας και για την προστασία του περιβάλλοντος.

2.4 Κανονιστικό πλαίσιο για το ραδόνιο

Από το 2019 έχει τεθεί σε ισχύ ένα νέο κανονιστικό πλαίσιο ακτινοπροστασίας, έπειτα από ριζική αναθεώρηση και κατάργηση του προηγούμενου πλαισίου. Το ρυθμιστικό αυτό πλαίσιο αφορά ένα

ευρύ φάσμα εργαζομένων και επαγγελματιών σε χώρους όπως αυτούς της υγείας, της βιομηχανίας κλπ. Μέσα σε αυτό το κανονιστικό πλαίσιο εμπεριέχονται τα εξής (ΕΕΑΕ, 2020):

1. Τα προεδρικά διατάγματα (π.δ)
2. Οι Υπουργικές αποφάσεις (κ.υ.α)
3. Αποφάσεις ΕΕΑΕ
4. Κατευθυντήριες οδηγίες

Η κοινοτική **Οδηγία 2013/59/Ευρατόμ**, διαμόρφωσε σύμφωνα με τα ισχύοντα ευρωπαϊκά Βασικά Πρότυπα Ασφάλειας τους σημερινούς Κανονισμούς Ακτινοπροστασίας. Πρόσφατα η ελληνική νομοθεσία μάλιστα, προσαρμόστηκε (μέσω ενός π.δ) στην οδηγία αυτή για τον καθορισμό βασικών προτύπων ασφάλειας για την προστασία από τους κινδύνους που προκύπτουν από τις ιοντίζουσες ακτινοβολίες.

Επιπρόσθετα, έχει θεσπιστεί το εθνικό σχέδιο δράσης για την αντιμετώπιση των μακροπρόθεσμων κινδύνων από την έκθεση στο ραδόνιο (ΕΣΧΕΔΡΑ, κ.υ.α. 43374/2020, ΦΕΚ 1881/Β'/18-5-2020). Σύμφωνα με το **ΕΣΧΕΔΡΑ** για τις περιοχές εντός χώρων εργασίας, όπου οι συγκεντρώσεις του ραδονίου υπερβαίνουν το εθνικό επίπεδο αναφοράς (300 Bq/m^3) λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα από τους οργανισμούς για τη μείωση της συγκέντρωσης ραδονίου (ΕΕΑΕ, 2020). Γενικότερα το ΕΣΧΕΔΡΑ είναι ένα τεχνικό κείμενο το οποίο με τη μορφή οδικού χάρτη (τεχνικά βήματα, χρονοδιαγράμματα, κόστη κλπ.), περιγράφει σε εθνικό επίπεδο τις πρακτικές πτυχές των προβλέψεων για την αντιμετώπιση, στο βαθμό που είναι δυνατό, των επιπτώσεων του ραδονίου.

2.5 Ραδόνιο και μεταλλευτικοί χώροι

Τα ορυχεία αποτελούν ένα ιδιαίτερο αντικείμενο έρευνας, μετά τους οικιστικούς χώρους οι οποίοι για τους προφανείς λόγους έχουν το αμέριστο ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας, δεδομένου ότι οι συγκεντρώσεις σε αυτά (μαζί με τα σπήλαια), έχουν βρεθεί μία κλίμακα πιο πάνω από τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στις κατοικίες (από Τομέ, 2018).

Γενικά οι μεταλλευτικοί χώροι, με ιδιαίτερη έμφαση στους υπόγειους, αποτελούν μία από τις πιο σημαντικές αιτίες έκθεσης στην ακτινοβολία που συντελεί σε μεγάλο βαθμό στον κίνδυνο κατά την εργασία. Αυτό συμβαίνει επειδή το αέριο ραδόνιο καθώς και οι σκόνες που παράγονται από τα μεταλλεύματα, περιέχουν στοιχεία της σειράς διάσπασης του ουρανίου και θορίου, τα οποία «μεταφέρονται» στους αντίστοιχους χώρους μέσω του νερού ή της κυκλοφορίας του αέρα κατά τη διάρκεια των μεταλλευτικών διεργασιών (Veiga, et al., 2004).

Για τους παραπάνω λόγους λοιπόν, ο πειραματικός προσδιορισμός της συγκέντρωσης της ραδιενέργειας του ραδονίου ή (και) των θυγατρικών του προϊόντων, αποτελεί όλο και πιο συχνά το βασικό σκοπό μεγάλου ποσοστού των εργασιών που αφορούν το πεδίο έρευνας του ραδονίου. Η χρήση διάφορων ανιχνευτικών συστημάτων τα οποία είναι διαθέσιμα για τους μεταλλευτικούς χώρους, προσφέρουν τη δυνατότητα επιλογής σύμφωνα με τις ανάγκες και τις ιδιαίτερες συνθήκες μέτρησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ

Η επιβάρυνση από το ραδόνιο στον ατμοσφαιρικό αέρα και στα ύδατα, όπως προαναφέρθηκε, είναι κατά κανόνα μικρή, πράγμα που σημαίνει ότι η διαβίωση στην ύπαιθρο δε συνιστά, για τις περισσότερες τουλάχιστον περιπτώσεις, σημαντικό ραδιοβιολογικό κίνδυνο. Το ραδόνιο όμως συγκεντρώνεται στους εσωτερικούς χώρους όπως τα μεταλλεία και έτσι η εργασία και γενικότερα η παρουσία σε αυτούς συνιστά πρόσθετο κίνδυνο. Ο κίνδυνος αυτός γίνεται ακόμη μεγαλύτερος από το γεγονός ότι η διαφορετική ποιότητα του αέρα των εσωτερικών χώρων μπορεί να επηρεάσει την κατανομή των θυγατρικών παραγώγων του ραδονίου (Νικολόπουλος, 2000). Για το λόγο αυτό πραγματοποιούνται στα ορυχεία, μετρήσεις ραδονίου με σκοπό την προστασία, πρόληψη και διασφάλιση της δημόσιας υγείας.

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν και στη συνέχεια οργανώθηκαν, στους τρεις πίνακες του Excel, από τη βιβλιογραφική έρευνα που διενεργήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής. Τα αποτελέσματα αφορούν κυρίως τις μετρήσεις της συγκέντρωσης ραδονίου που πραγματοποιήθηκαν στις τρεις διαφορετικές κατηγορίες ορυχείων.

Εκτός των ανωτέρω όσον αφορά την εκτίμηση της ενεργούς δόσης που ενδέχεται να λαμβάνουν οι εργαζόμενοι, αυτή προσεγγίζεται λαμβάνοντας ως κύρια δεδομένα τις μετρήσεις της εκάστοτε ραδιολογικής υπηρεσίας, τον χρόνο παραμονής των εργαζομένων για την εκτέλεση της εργασίας τους και τον παράγοντα ισορροπίας του ραδονίου και των θυγατρικών του.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων συγκεντρώσεων ραδονίου και των υπολογισμών της ενεργού δόσης περιλαμβάνουν τη μέση τιμή, την αβεβαιότητα και το επίπεδο εμπιστοσύνης, δίνοντας περισσότερη έμφαση στις μέσες τιμές. Στην περίπτωση χώρων εργασίας όπου υπάρχουν και άλλες πηγές ακτινοβολίας εκτός από το ραδόνιο, διερευνάται η αναγκαιότητα εκτίμησης της έκθεσης των εργαζομένων από τις εν λόγω πηγές. Επιπροσθέτως, σε περιπτώσεις ύπαρξης και άλλων ραδιενεργών στοιχείων πέραν του ραδονίου, πραγματοποιούνται μετρήσεις συγκέντρωσης του εκάστοτε ραδιενεργού στοιχείου.

Η συχνότητα επανάληψης των μετρήσεων καθορίζεται από τις συνθήκες χρήσης και τις ιδιαιτερότητες στις μεταβολές της συγκέντρωσης ραδονίου του εκάστοτε χώρου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των μεταλλείων που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική, οι ραδιολογικές υπηρεσίες λάμβαναν υπόψη την εποχιακή μεταβολή της συγκέντρωσης ραδονίου, λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς, αλλά και τον ελλειπή φυσικό εξαερισμό κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Στη συνέχεια του 3^{ου} κεφαλαίου, ακολουθεί η ανάλυση για τις τρεις κατηγορίες ορυχείων.

3.1 Ορυχεία ουρανίου

Τα μεταλλεύματα ουρανίου εξορύσσονται είτε με υπαίθριες είτε με υπόγειες μεθόδους, ανάλογα με το μέγεθος, το βάθος, τη μακρύτερη οριζόντια διάσταση και άλλα χαρακτηριστικά του εκάστοτε μεταλλεύματος. Κατά τη διάρκεια εξόρυξης και επεξεργασίας του μεταλλεύματος, οι μεταλλωρύχοι εκτίθενται σε ακτινοβολία λόγω του ουρανίου. Είναι ευρέως γνωστό ότι οι ραδιολογικοί κίνδυνοι που υπόκεινται κατά την υπόγεια εξόρυξη, είναι πολύ πιο σοβαροί και δύσκολα διαχειρίσιμοι απ' ό,τι στην υπαίθρια, λόγω των προβλημάτων εξαερισμού. Στα ορυχεία ουρανίου, οι ραδιολογικοί κίνδυνοι των μεταλλωρύχων προκαλούνται κυρίως λόγω της εισπνοής του ραδονίου (^{222}Rn) και των θυγατρικών του, τα οποία μπορούν να συμβάλουν στην συνολική δόση, σε ποσοστό που υπερβαίνει το 50%. Επιδημιολογικές έρευνες έχουν αναφερθεί στο γεγονός ότι η παρατεταμένη έκθεση των εργατών των ορυχείων ουρανίου, στο ραδόνιο και τα θυγατρικά του, μπορεί να οδηγήσει σε καρκίνο του πνεύμονα (Panigrahi et al., 2015).

Η συγκέντρωση του ραδονίου στην ατμόσφαιρα, κατά την υπόγεια εξόρυξη ουρανίου, εξαρτάται κυρίως από τις εκπομπές του ραδονίου από το μετάλλευμα, τα απορρίμματα που παράγονται κατά την επιχωμάτωση και από το νερό. Η διαφυγή του ραδονίου από το μετάλλευμα ουρανίου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως το περιεχόμενο του ραδίου (^{226}Ra), το πορώδες, τη βαρομετρική πίεση και το περιεχόμενο υγρασίας του μεταλλεύματος. Γενικά οι σωροί μεταλλευμάτων, λόγω της αυξημένης έκτασης που καταλαμβάνουν, αποτελούν τις βασικές πηγές διαφυγής ραδονίου. Επιπλέον, στο παρελθόν έχουν γίνει αναφορές στο γεγονός ότι η διαφυγή ουρανίου από τα απορρίμματα της επιχωμάτωσης (backfill tailings), είναι ποσοτικά πολύ μεγαλύτερη απ' ό,τι από το ίδιο το μετάλλευμα, δεδομένου του μεγαλύτερου πορώδους των πρώτων και λόγω της εκτενούς επιφάνειας που καταλαμβάνουν (Mishra et al., 2014).

Γενικά, η εκροή του ραδονίου και το προφίλ συγκέντρωσης ραδονίου στην ατμόσφαιρα ενός ορυχείου λόγω διαφυγής αερίου από το μετάλλευμα, υπόγειων νερών που κινούνται μέσω ρωγμών, προϊόντων επιχωμάτωσης και σωρών του μεταλλεύματος, εξαρτώνται κυρίως από το ρυθμό εκροής ραδονίου από τους κόκκους και δευτερευόντως από τη μικροδομή του υλικού. Επιπροσθέτως εξαρτώνται από παραμέτρους που επηρεάζουν φυσικές διεργασίες όπως αυτές της διάχυσης, απορρόφησης και των ρευμάτων αέρα (βλ. υποενότητα 1.4.1).

Τα επίπεδα της ακτινοβολίας- γ και η έκθεση λόγω του ^{222}Rn , των θυγατρικών του με μικρό χρόνο ημιζωής και της ακτινοβολίας- α με μεγάλο χρόνο ημιζωής, τα οποία συνδέονται με τη σκόνη που προέρχεται από το μετάλλευμα, καθιστούν (όπως προαναφέρεται) τις βασικές πηγές ραδιολογικών κινδύνων στα ορυχεία ουρανίου. Ωστόσο, σε ορυχεία ουρανίου με χαμηλή ποιότητα εμπλουτισμού

(<0.1% U_3O_8), οι κίνδυνοι έκθεσης και ακτινοβολίας είναι αμελητέοι. Για το λόγο αυτό, ένα μέρος της εργασιακής έκθεσης αποδίδεται στη δυνητική ακτινοβολία-α και τα θυγατρικά του ραδονίου (^{218}Po , ^{214}Bi , ^{214}Pb και ^{214}Po), τα οποία σε πολλές περιπτώσεις δημοσιεύσεων μετρούνται με σκοπό τη γνώση της συγκέντρωσής τους στα ορυχεία ουρανίου.

Οι κίνδυνοι λόγω ακτινοβολίας γενικότερα, αλλά και ειδικότερα στα ορυχεία ουρανίου, κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες. Οι «εξωτερικοί κίνδυνοι» εμφανίζονται κυρίως λόγω της έκθεσης των εργαζόμενων στην ακτινοβολία-γ η οποία εκπέμπεται από τα μεταλλεύματα ουρανίου, ενώ οι «εσωτερικοί κίνδυνοι», λόγω της εισπνοής του ραδονίου (^{222}Rn) και των θυγατρικών του (με μικρό χρόνο ημιζωής) από τη σειρά του ^{238}U (Panigrahi, et al., 2018).

Όσον αφορά στα μεταλλεύματα του ουρανίου, αυτά περιέχουν φυσικό ουράνιο αποτελούμενο από ^{238}U σε ποσοστό 99.275%, από ^{235}U σε ποσοστό 0.715% και ^{234}U σε ποσοστό 0.005%. Από πλευράς ραδιολογικής προστασίας, το ^{238}U και τα θυγατρικά του αποτελούν προβληματισμό για την βιομηχανία εξόρυξης ουρανίου, λόγω της αφθονίας του ^{238}U στο φυσικό ουράνιο και λόγω της ακτινοβολίας που εκπέμπουν. Όλο το παραπάνω φάσμα των θυγατρικών του ουρανίου που προαναφέρθηκε μπορεί να βρεθεί στο μετάλλευμα ουρανίου, ανάλογα με την ηλικία των αποθεμάτων, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τους παράγοντες ισορροπίας του ραδονίου και θυγατρικών του (Sahu, et al., 2013).

3.1.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που συλλέχθηκαν από 26 διεθνείς δημοσιεύσεις. Οι συγκεντρώσεις ραδονίου που ακολουθούν στην προκειμένη περίπτωση, αφορούν πέρα από 30 ορυχεία ουρανίου, μία περίπτωση αποθέσεων ουρανίου και μία περίπτωση μιας μάντρας απόθεσης αποβλήτων (backfill tailing yard) από ένα ορυχείο ουρανίου.

ΧΩΡΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΟΡΥΧΕΙΩΝ	ΧΑΜΗΛΟΤΕΡΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bq/m ³)	ΥΨΗΛΟΤΕΡΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bq/m ³)	ΜΕΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bq/m ³)
Κίνα	1	22,000	59,000	37,000
Πολωνία	1	3,000	1,072,000	343,750
Πολωνία	1	113	21,854	3,891.1

Ινδία	2	280	3,420	1,828
Ινδία	1	60	850	344
Καναδάς	1	46,472	163,281	103,587
Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής	-	25,900	55,500	-
Ινδία	1	360	1,964	963.43
Ιαπωνία	1	13.4	775	107.1
Ινδία	1	50.87	757.66	322.88
Ινδία	1	1,658.4	399,200	104,005
Ινδία	1	360	804	534.8
Κίνα	1	53.01	57.71	55.37
Πολωνία	1	1,054	1,081	1,067.5
Ινδία	1	-	-	30 και 23
Πολωνία	1	1,300	8,100	4,500
Πακιστάν	- ²	434	964	699
Αυστραλία	1	100	7,900	- ³
Ινδία	1	1.74	25.6	10.13
Ινδία	1	11,687.1	38,061.4	30,436.7
Ιαπωνία	- ⁴	5	66,300	243.45
Αυστραλία	1	37	188	95.33
Κίνα	2	6.8	1,180	122.05
Κολοράντο και Μεξικό	6	3,108	85,100	24,260.13
Αυστραλία	1	8	2,640	350
Αγγλία	1	41,667	3,932,920	1,700,780

Πίνακας 3.1: Μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου

² Η περίπτωση αυτή αφορά τις αποθέσεις ουρανίου (βλ. σελ. 22).

³ Στα σημεία που υπάρχει το σύμβολο «-», δεν αναγράφονται τιμές στις αντίστοιχες δημοσιεύσεις.

⁴ Η περίπτωση αυτή αφορά την μάντρα απόθεσης αποβλήτων από ένα ορυχείο ουρανίου (βλ. σελ. 22).

3.1.2 Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων

Η ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων σε τρεις υποκατηγορίες, που ακολουθεί, γίνεται με σκοπό τη διευκόλυνση διεξαγωγής συμπερασμάτων όσον αφορά στο θέμα της παρούσας διπλωματικής. Βασικό στόχο αποτελεί και η αναγνώριση των πιθανών πηγών διαφυγής ραδονίου, καθώς και ο έλεγχος των επιπέδων ραδονίου προκειμένου να προστατευτούν οι εργαζόμενοι των ορυχείων, από τους κινδύνους έκθεσης στην ακτινοβολία. Η εκτενής βιβλιογραφική έρευνα πάνω στο θέμα της διαφυγής ραδονίου στα υπόγεια ορυχεία ουρανίου από διάφορες πηγές όπως:

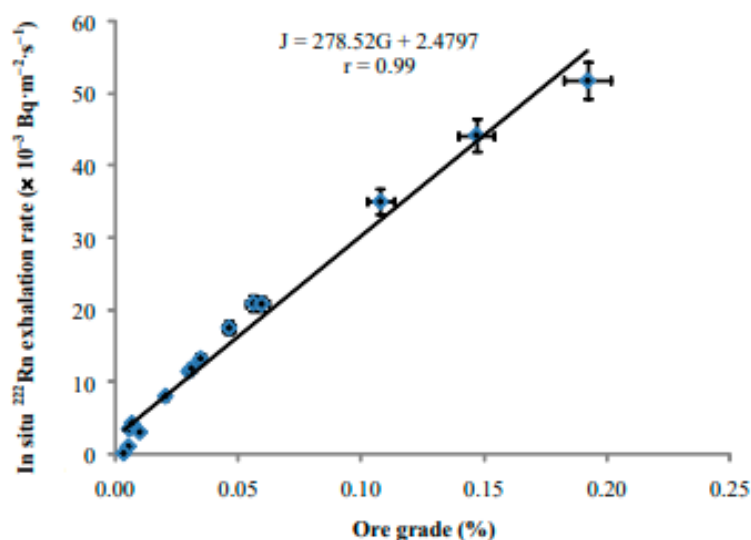
- 1) το μέταλλευμα ουρανίου (uranium ore),
- 2) τα απορρίμματα επιχωμάτωσης (backfill tailings) και
- 3) τα υπόγεια νερά του ορυχείου (mine water),

αποτελεί τη βάση για την παρουσίαση και συζήτηση των αποτελεσμάτων.

Η επιρροή διαφόρων σημαντικών παραγόντων όπως η ποιότητα του μεταλλεύματος (ore grade), το πορώδες, το μέγεθος των κόκκων και το περιεχόμενο ποσό υγρασίας, κατά τη διαφυγή του ραδονίου, θα εξεταστούν και θα συζητηθούν στη συνέχεια. Γενικότερα η γνώση πάνω στο θέμα των πηγών ραδονίου και του ποσοτικού προσδιορισμού τού από διάφορες πηγές, κρίνονται αρκετά χρήσιμα στην οργάνωση και στο σχεδιασμό των συστημάτων εξαερισμού στους υπόγειους μεταλλευτικούς χώρους. Παρακάτω θα αναλυθούν οι πιο αντιπροσωπευτικές πηγές ραδονίου και οι μέθοδοι για τη μέτρηση και τον υπολογισμό του ραδονίου, από την έκλυσή του από τις προαναφερθείσες πηγές.

3.1.2.1 Μετάλλευμα ουρανίου (τοιχία ορυχείου και θραυσμένο μέταλλευμα)

Ένας από τους βασικούς τρόπους «εισόδου» του ραδονίου στην ατμόσφαιρα των ορυχείων είναι μέσω διάχυσης από το περιβάλλον πέτρωμα, που περιλαμβάνει και το μέταλλευμα, και μεταγενέστερα μέσω διαφυγής από τα τοιχία του ορυχείου (*mine walls*). Αρκετές φορές ο ρυθμός διαφυγής του ραδονίου εκφράζεται ως συνάρτηση της ποιότητας του μεταλλεύματος, όπως παρουσιάζεται και στην παρακάτω εικόνα. Επιπροσθέτως, ο ρυθμός διαφυγής του ραδονίου έχει συσχετιστεί και με τους διαφορετικούς τύπους λιθολογίας του μεταλλεύματος ουρανίου. Συγκεκριμένα, ο ρυθμός διαφυγής επηρεάζεται λιγότερο από την ποιότητα του μεταλλεύματος στην περίπτωση ενός πορώδους πετρώματος, απ' ό,τι στην περίπτωση ενός μη πορώδους.



Εικόνα 3.1: Συσχέτιση ρυθμού διαφυγής ραδονίου με την ποιότητα μεταλλεύματος(%), (Sahu et al., 2013)

Σύμφωνα με τον Thompkins (1974), ο ρυθμός διαφυγής ραδονίου έχει μικρή συσχέτιση με την ποιότητα του μεταλλεύματος, όταν δεν «συμμετέχουν» και άλλες παράμετροι. Ωστόσο δεν ισχύει το ίδιο όταν στη συνάρτηση αυτή λαμβάνεται υπόψη και το πορώδες του πετρώματος. Έτσι λοιπόν, εκτός από την περίπτωση στην οποία η ποιότητα μεταλλεύματος είναι πολύ καλή (σ.σ υψηλό ποσοστό U_3O_8), **το πορώδες και οι μικρο-ρωγμές είναι οι κύριοι παράγοντες** που επηρεάζουν ως επί το πλείστον το ρυθμό διαφυγής ραδονίου από την επιφάνεια του πετρώματος προς το μεταλλευτικό χώρο.

Κατά την διαδικασία εξαγωγής του επιθυμητού μεταλλεύματος ή άλλου ορυκτού από έναν υπόγειο μεταλλευτικό χώρο με τη μέθοδο «διακοπής» ή «storing», αφήνεται πίσω ένας ανοιχτός χώρος γνωστός και ως «store». Στο σημείο αυτό αποτίθεται το *θραυσμένο μετάλλευμα (broken ore)*. Έτσι λοιπόν, πέρα από τη διαφυγή ραδονίου από τα τοιχεία του ορυχείου (συμπεριλαμβανομένου τόσο του μεταλλεύματος όσο και του στείρου⁵), πραγματοποιείται διαφυγή και από την πηγή αυτή. Το μετάλλευμα, το οποίο κατακερματίζεται κατά τη διαδικασίας της εξόρυξης, «διαθέτει» μία πηγή που οδηγεί σε μεγαλύτερη διαφυγή ραδονίου, λόγω αυξημένης ακάλυπτης επιφάνειας. Για παράδειγμα, οι ρυθμοί διαφυγής ραδονίου σε δείγματα θραυσμένων μεταλλευμάτων και στείρων από το ορυχείο ουρανίου στο Beaverlodge του Καναδά, βρέθηκε να ποικίλλουν μεταξύ $4.81 \times 10^{-3} - 0.22 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ και $0.2 - 5 \times 10^{-3} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ αντίστοιχα (Cheng & Porritt, 1981).

⁵ Στείρο (waste rock): Το υλικό που εξορύσσεται μαζί με το μετάλλευμα, αλλά δεν περιέχει ορυκτά με οικονομικό ενδιαφέρον ([Link 3](#)).

3.1.2.2 Απορρίμματα επιχωμάτωσης

Κατά τη διαδικασία εξαγωγής του ουρανίου από τα μεταλλεύματα, τα παραγόμενα θρυμματισμένα υπολείμμάτα του, γνωστά και ως «κατεργασμένα απορρίμματα» (mill tailings), χρησιμοποιούνται ως υλικά επιχωμάτωσης στα υπόγεια ορυχεία ουρανίου. Σύμφωνα με την IAEA (International Atomic Energy Agency, 2004), η εξόρυξη και ο θρυμματισμός των μεταλλευμάτων ουρανίου έχουν οδηγήσει στην παραγωγή ενός δις τόνων «κατεργασμένων απορριμμάτων».

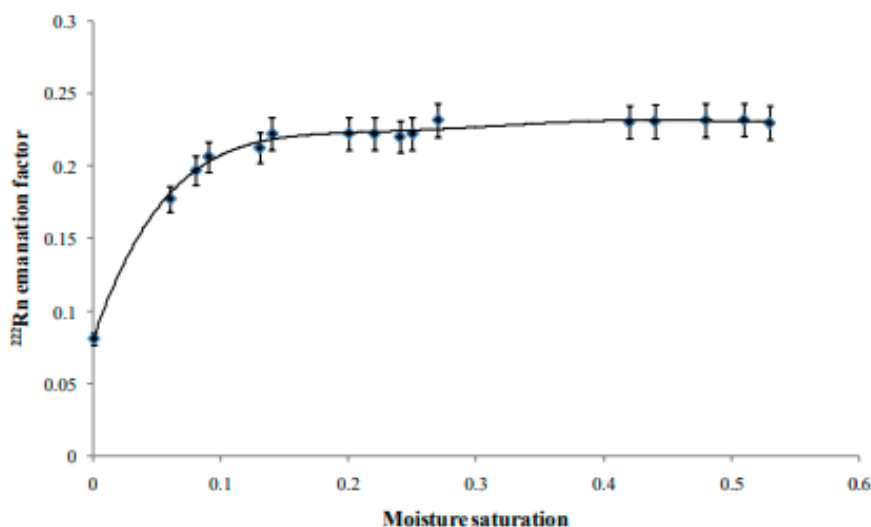
Γενικά, η εξαγωγή ουρανίου από τα μεταλλεύματα περιλαμβάνει τη διαδικασία έκπλυσης με θειικό οξύ (H_2SO_4). Δεδομένου ότι η περιεκτικότητα των μεταλλευμάτων σε ουράνιο είναι χαμηλή, μεγάλες ποσότητες «κατεργασμένων απορριμμάτων» απεκκρίνονται με τη μορφή πολτού κατά την επεξεργασία του μεταλλεύματος ουρανίου στους μύλους. Τα πολτοποιημένα απορρίμματα, διαχωρίζονται σε λεπτότερα και πιο χονδροειδή κλάσματα. Το πιο χοντρό κλάσμα αποστέλλεται πίσω στα υπόγεια ορυχεία ουρανίου για επιχωμάτωση των ανοιχτών χώρων ("store"), ενώ το λεπτότερο κλάσμα απορρίπτεται σε μία γεωλογικά σταθερή δομή με κατάλληλο ανάχωμα και εμπόδια που ονομάζεται «λίμνη απορριμμάτων» (tailings pond). Συνήθως, η αποτελεσματικότητα εξαγωγής ουρανίου από τους εμπορικούς μύλους κυμαίνεται από 65 έως 95%.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η διαλυτοποίηση του ^{226}Ra στα μεταλλεύματα με θειικό οξύ είναι μικρή, τα απορρίμματα περιέχουν σημαντική ποσότητα ραδίου. Έπειτα από έρευνα της IAEA το 1992, η οποία ανέφερε ότι τα απορρίμματα περιέχουν 99% του ραδίου το οποίο είναι παρόν στο αρχικό μέταλλευμα, οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι αυτά μπορούν να αποτελέσουν μία πιθανή πηγή ραδονίου στην ατμόσφαιρα των μεταλλευτικών χώρων.

Οι ρυθμοί διαφυγής ραδονίου στα απορρίμματα επιχωμάτωσης, έχουν καταγραφεί από διάφορους επιστήμονες και έχουν παρουσιαστεί σε πληθώρα δημοσιεύσεων. Σε μεταλλευτικούς χώρους στην Ινδία, στον Καναδά, αλλά και στην Αυστραλία, οι τιμές βρέθηκαν να κυμαίνονται από 1.01-203.5 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Οι μεγάλες αυτές διαφοροποιήσεις στις τιμές οφείλονται στις διακυμάνσεις του περιεχόμενου ^{226}Ra στο επεξεργασμένο μέταλλευμα ουρανίου, στο μέγεθος των σωματιδίων και στην υγρασία των απορριμμάτων επιχωμάτωσης.

Λόγω του μικρότερου μεγέθους σωματιδίων (μερικές δεκάδες μικρά) των απορριμμάτων επιχωμάτωσης και ως εκ τούτου της μεγαλύτερης ειδικής επιφάνειάς τους, το ράδιο τείνει να είναι περισσότερο κοντά στην επιφάνεια των κόκκων, οδηγώντας σε μεγαλύτερη διαφυγή ραδονίου. Σύμφωνα με την IAEA (1976), τα απορρίμματα με μέγεθος κλάσματος μικρότερο από 40 μm , απελευθέρωναν 10-15 φορές περισσότερο ραδόνιο σε σχέση με τα πιο χονδροειδή κλάσματα.

Όσο αφορά στο κομμάτι της υγρασίας, πολλοί ερευνητές έχουν αναφέρει ότι ο *συντελεστής εκροής* (*emanation coefficient*) εξαρτάται από το περιεχόμενο των απορριμμάτων σε υγρασία. Μάλιστα έχει βρεθεί ότι ο συντελεστής εκροής των απορριμμάτων αρχικά αυξάνεται με τον κορεσμό σε νερό προτού φτάσει σε μία σταθερή κατάσταση. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, τα ξηρά απορρίμματα αντιστοιχούν σε χαμηλότερους συντελεστές εκροής σε σχέση με αυτά που έχουν περισσότερη υγρασία.

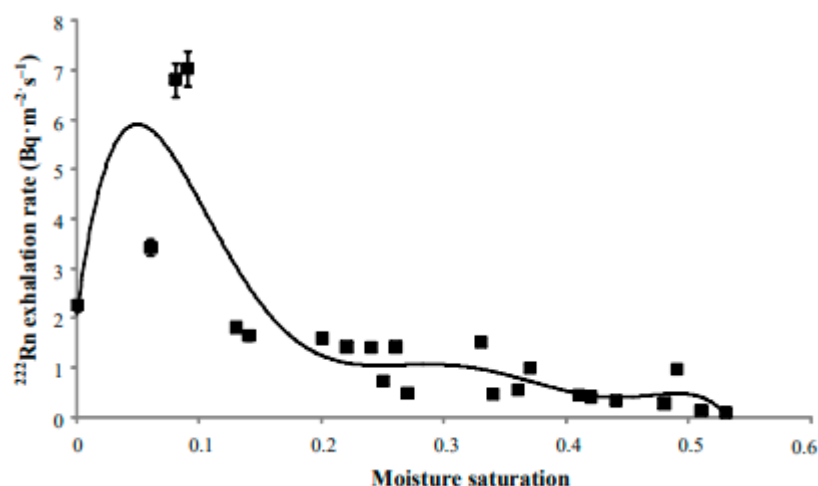


Εικόνα 3.2: Συσχέτιση συντελεστή εκροής ραδονίου με τον κορεσμό σε νερό, (Sahu et al., 2014)

Σύμφωνα με τον Mudd (2008), ο ρυθμός διαφυγής ραδονίου από τα ξηρά απορρίμματα επιχωμάτωσης σε ένα ορυχείο ουρανίου στην Αυστραλία ήταν $7.82 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, ενώ στα απορρίμματα με υψηλά ποσοστά υγρασίας, ήταν $14.17 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. **Η παρουσία υγρασίας λοιπόν αυξάνει τις πιθανότητες εκπομπής ατόμων ραδονίου.**

Πιο συγκεκριμένα, η επανα-απορρόφηση των ανακρουσμένων ατόμων ραδονίου πραγματοποιείται στην επιφάνεια των πόρων και των ρωγμών, κάτω από πολύ ξηρές συνθήκες, γεγονός που οδηγεί στη μειωμένη διάχυση ραδονίου. Όταν όμως αυξάνεται η υγρασία, οι πόροι και οι ρωγμές των απορριμμάτων γεμίζουν με νερό, οδηγώντας έτσι στον τερματισμό της ανάκρουσης των ατόμων ραδονίου στους πόρους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια αρχική αύξηση και στη συνέχεια (κατά τον κορεσμό πλέον σε νερό) μία σταθεροποίηση του συντελεστή εκροής (Sahu et al., 2015). **Ο συντελεστής εκροής σε κορεσμένα σε νερό απορρίμματα μπορεί να φτάσει 2-6 φορές μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τα ξηρά απορρίμματα.**

Όσον αφορά στο ρυθμό διαφυγής ραδονίου, ακολουθεί μία διαφορετική «πορεία» με την αύξηση της υγρασίας, σε σχέση με αυτή που ακολουθεί ο συντελεστής εκροής. Αρχικά, με την αύξηση της υγρασίας στα απορρίμματα υπάρχει αύξηση του ρυθμού διαφυγής, έως ένα συγκεκριμένο σημείο κορεσμού. Από το σημείο αυτό και έπειτα ακολουθείται μία καθοδική πορεία του ρυθμού. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, αν και ο υψηλότερος ρυθμός διαφυγής βρίσκεται στα υγρά απορρίμματα, ο χαμηλότερος βρίσκεται στα κορεσμένα σε νερό απορρίμματα.



Εικόνα 3.3: Συσχέτιση ρυθμού διαφυγής ραδονίου με τον κορεσμό σε νερό, (Sahu et al., 2014)

Αυτό μπορεί να εξηγηθεί με βάση την επίδραση της επανα-απορρόφησης των ατόμων ραδονίου στις επιφάνειες των πόρων του πετρώματος, κάτω από πολύ ξηρές συνθήκες και χαμηλό συντελεστή διάχυσης στα απορρίμματα που είναι πλήρως κορεσμένα σε νερό, οδηγώντας έτσι σε χαμηλότερο ρυθμό διαφυγής ραδονίου.

3.1.2.3 Υπόγεια νερά του ορυχείου

Κάτω από το κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, η διαλυτότητα του ραδονίου στο νερό είναι χαμηλή. Ωστόσο, υπό την τεράστια πίεση της υπερφόρτωσης, η διαλυτότητα του ραδονίου αυξάνεται σημαντικά. Όταν αυτό το νερό εισέρχεται στο ορυχείο μέσω οπών και ρωγμών, το διαλυμένο ραδόνιο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα του ορυχείου καθώς η πίεση σε αυτό μειώνεται ξαφνικά. Σύμφωνα με τις μετρήσεις (σε διαφορετικές πηγές) του διαλυμένου ραδονίου σε δύο υπόγεια ορυχεία ουρανίου στην Ινδία, η συγκέντρωση του ραδονίου το οποίο διαλύεται στο νερό μπορεί να προσεγγίσει ένα επίπεδο πολύ υψηλότερο από αυτό της συγκέντρωσης στα κενά αέρα. Δεδομένου ότι η ροή του νερού από τους πόρους του υλικού προς το ορυχείο είναι πιο γρήγορη

από τη διαδικασία διάχυσης που εμφανίζεται σε ξηρό υλικό, η «καθαρή» μεταφορά ραδονίου σε ένα υγρό ορυχείο θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερη από αυτή του ξηρού ορυχείου, όπου ο μόνος μηχανισμός μεταφοράς ραδονίου είναι η αέρια διάχυση.

Εφόσον ο όγκος κατανομής συγκέντρωσης ραδονίου στο νερό προς τον αέρα είναι περίπου 0.3 σε κανονικές συνθήκες ατμόσφαιρας ορυχείου, το πλούσιο σε ραδόνιο νερό που ρέει, μεταφέρει το ραδόνιο στην ατμόσφαιρα του ορυχείου έως ότου η συγκέντρωση ραδονίου στον αέρα είναι περίπου 3 φορές περισσότερη από αυτή στη συγκέντρωση νερού.

Έχει αναφερθεί σύμφωνα με τους Bossard et al., 1974, Bossard, 1982, ότι η συγκέντρωση του διαλυμένου ραδονίου στο νερό ποικίλει από 19.13×10^3 έως 3×10^6 Bq·m⁻³, μέσα στα ορυχεία ουρανίου. Επιπλέον σύμφωνα με τους Andrews και Wood (1972), το νερό που διαχέεται μέσω του μεταλλεύματος ουρανίου, απελευθερώνει ραδόνιο με εύρος συγκέντρωσης από 3.7×10^5 έως 3.7×10^6 Bq·m⁻³ στα ορυχεία ουρανίου. Τέλος σύμφωνα με τον Khan (1979), περίπου το 75% του συνολικού διαλυμένου ραδονίου στο νερό απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα του ορυχείου.

Επιπροσθέτως έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις με σκοπό τη συσχέτιση της διαφυγής του ραδονίου με την απόσταση, κατά τη ροή νερού κατά μήκος των στοών ορυχείου. Με βάση αυτές τις μετρήσεις, παρατηρήθηκε ότι σημαντικές ποσότητες ραδονίου μεταφέρονταν μέσω του νερού, ακόμα και κατά τη ροή του νερού σε απόσταση πάνω από 20 μέτρα. Συνεπώς, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι **το υπόγειο νερό ορυχείου όχι μόνο μεταφέρει το ραδόνιο από τα πετρώματα στο ορυχείο, αλλά το μεταφέρει επίσης για μία σημαντική απόσταση στις στοές του ορυχείου.** Η μη ομοιομορφία στην διαφυγή του ραδονίου σε σχέση με την απόσταση που διανύθηκε μπορεί να αποδοθεί στη διακύμανση του βαθμού αναταραχής που προκαλείται από εμπόδια στην πορεία της ροής. Όταν το πλούσιο σε ραδόνιο, νερό, ρέει σε ομαλά και χωρίς διαταραχές, κανάλια, η διαφυγή είναι χαμηλότερη από ό,τι όταν πέφτει από ένα ύψος και ρέει σε ανώμαλα κανάλια. Διαταραχές που προκαλούνται από την κίνηση των εργαζομένων στα ορυχεία και τον εξοπλισμό εξόρυξης, μπορούν επίσης να συμβάλουν στη διαδικασία εξάντλησης του ραδονίου.

Η συγκέντρωση του ραδονίου στον αέρα είναι υψηλότερη κοντά στις πηγές του νερού και μειώνεται, με μία αύξηση στην απόσταση από την πηγή νερού λόγω αραιώσης που προκαλείται από τους μεγάλους όγκους αέρα. Τέλος παρατηρήθηκε ότι η συγκέντρωση ραδονίου στον αέρα, η οποία απελευθερώνεται από τα υπόγεια νερά, είναι πιο έντονη στις περιοχές με ανεπαρκή εξαερισμό.

3.1.3 Μέθοδοι μέτρησης ρυθμού διαφυγής ραδονίου (σε μεταλλεύματα ουρανίου και απορρίμματα επιχωμάτωσης)

Κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες μέθοδοι από αρκετούς ερευνητές για τη μέτρηση του ρυθμού διαφυγής ραδονίου, από μεταλλεύματα ουρανίου και απορρίμματα επιχωμάτωσης. Ενδεικτικά θα αναφερθούν οι εξής 4:

1. Μέθοδος μέτρησης ραδονίου σε δύο τοποθεσίες
2. Μέθοδος δοχείου άνθρακα (charcoal canister method)
3. Μέθοδος ροής (flow method)
4. Μέθοδος συσσώρευσης (Accumulation method)

3.1.3.1 Μέθοδος μέτρησης ραδονίου σε δύο τοποθεσίες

Οι Thompkins και Rajhans (1967) περιέγραψαν μια μέθοδο για την εκτίμηση του ρυθμού διαφυγής ραδονίου σε υπόγεια ορυχεία ουρανίου. Σε αυτή τη μέθοδο, μη μολυσμένος αέρας τροφοδοτείται με διαφορετικές ταχύτητες, μέσω αύξησης της ομοιόμορφης διατομής και μήκους 30 έως 50 μέτρων. Τα δείγματα φιλτραρισμένου αέρα συλλέγονται σε φιάλες «Lucas» σε δύο θέσεις που διαχωρίζονται από μια γνωστή απόσταση σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα. Ο ρυθμός διαφυγής ραδονίου J ($\text{Bq}/\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$J = \frac{(C2 - C1)Q}{PL} \quad (4)$$

όπου $C1$ είναι η αρχική συγκέντρωση ραδονίου σε μία θέση ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$), $C2$ είναι η τελική συγκέντρωση ραδονίου σε άλλη θέση ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$), Q είναι ο ρυθμός ροής αέρα ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), P είναι η περίμετρος της βαθμίδας (m) και L είναι το μήκος της βαθμίδας (m).

Ωστόσο, αυτή η μέθοδος δεν είναι κατάλληλη όταν οι βαθμίδες είναι αλληλοσυνδεόμενες και ενδέχεται να υπάρχουν μεγάλες αβεβαιότητες στα αποτελέσματα, λόγω διαφόρων συνθηκών εξόρυξης, μόλυνσης του αέρα εισαγωγής και διαρροής αέρα.

3.1.3.2 Μέθοδος δοχείου άνθρακα (charcoal canister method)

Οι Lawrence et al., (2009) χρησιμοποίησαν δοχεία άνθρακα για τη μέτρηση του ρυθμού διαφυγής ραδονίου. Αυτά τα δοχεία γεμίζουν με 25 g ενεργού άνθρακα και στη συνέχεια θερμαίνονται σε φούρνο για 24 ώρες πριν από την εκρόφιση οποιουδήποτε προηγουμένως προσροφημένου ^{222}Rn . Μετά την αφαίρεση από το φούρνο, τα δοχεία σφραγίζονται και μεταφέρονται στη θέση

δειγματοληψίας όπου είναι μη σφραγισμένα, αναποδογυρισμένα και πιέζονται σταθερά στη γη σε βάθος περίπου 1 cm για να εξασφαλιστεί μια καλή στεγανοποίηση μεταξύ της άκρης του δοχείου και του εδάφους. Τα δοχεία σφραγίζονται και πάλι, μετά τη συλλογή δείγματος, για 4 έως 5 ημέρες και έπειτα στέλνονται στο εργαστήριο. Η δραστηριότητα του ^{222}Rn που προσροφάται στον άνθρακα προσδιορίζεται μετρώντας τα σωματίδια γάμμα που εκπέμπονται από τα ^{214}Pb και ^{214}Bi χρησιμοποιώντας ένα φασματομέτρο γάμμα με έναν κρύσταλλο NaI (TI). Ο ρυθμός διαφυγής ραδονίου καθορίζεται από την παρακάτω σχέση (Bollhofer et al., 2006):

$$J = \frac{R t_c \lambda^2 \exp(\lambda t_d)}{\varepsilon \alpha [1 - \exp(-\lambda t_e)][1 - \exp(-\lambda t_c)]} \quad (5)$$

όπου J είναι ο ρυθμός διαφυγής ραδονίου ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), R είναι ο καθαρός ρυθμός μέτρησης μετά την αφαίρεση του υποβάθρου κατά τη διάρκεια της περιόδου μέτρησης " t_c " (counts s^{-1}), t_c είναι η περίοδος μέτρησης (s), λ είναι η σταθερά αποσύνθεσης του ραδονίου (s^{-1}), t_d είναι η περίοδος καθυστέρησης από το τέλος της έκθεσης στην αρχή των διαστημάτων μέτρησης (s), ε είναι η αποδοτικότητα μέτρησης του συστήματος ($\text{counts s}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1}$), α είναι η περιοχή του δοχείου (m^2) και t_e είναι η περίοδος έκθεσης του άνθρακα στο δοχείο (s). Ένα χαμηλότερο όριο ανίχνευσης $1,11 \times 10^{-3} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ για μια περίοδο έκθεσης τεσσάρων ημερών με χρήση δοχείου άνθρακα, έχει αναφερθεί από τον Countess (1977).

Αν και αυτή η μέθοδος είναι απλή και φθηνή, τα δοχεία άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για τη μέτρηση του ρυθμού διαφυγής ραδονίου σε πολύ περιορισμένη περιοχή και για περιορισμένο χρονικό διάστημα. Μπορεί επίσης να δώσει υψηλή αβεβαιότητα στα αποτελέσματα υπό διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης, θερμοκρασίας και υγρασίας. Επιπλέον, κάποια ποσότητα απορροφημένου ραδονίου θα χαθεί κατά την περίοδο μεταξύ του χρόνου έκθεσης και του χρόνου μέτρησης λόγω της αποσύνθεσης πριν από τη μέτρηση της φασματοσκοπίας ακτινών γ.

3.1.3.3 Μέθοδος ροής (flow method)

Μερικοί ερευνητές μέτρησαν τη μέση διαφυγή ραδονίου σε μια μεγάλη περιοχή απορριμμάτων με κυκλοφορία αέρα κάτω από έναν συλλέκτη, μέσω ενός στρώματος άνθρακα (Freeman, 1981). Το Pacific Northwest Laboratory (PNL) ανέπτυξε ένα σύστημα μέτρησης διαφυγής ραδονίου με ανακυκλοφορία, ισορροπία πίεσης και ροής διαμέσου, που χρησιμοποιεί μία σκηνή αλουμινίου $76 \times 122 \times 5 \text{ cm}$ (9300 cm^2 επιφάνεια) για κάλυψη της περιοχής προς μέτρηση. Το σύστημα χρησιμοποιεί αντλία κενού διαφράγματος για την άντληση αέρα μέσω στήλης αφυγραντήρα, για την απομάκρυνση

υδρατμών και μέσω φίλτρου, για την απομάκρυνση σωματιδίων. Ο αέρας στη συνέχεια διέρχεται μέσω παγίδας ενεργού άνθρακα για την αφαίρεση ραδονίου. Η παγίδα άνθρακα αποτελείται από έναν ελικοειδή σωλήνα διαμέτρου 4,8 cm γεμάτο με 400 g ενεργοποιημένου άνθρακα μεγέθους 8-12 mesh. Αυτή η παγίδα μπορεί να απορροφήσει το 99,9% του ραδονίου στον αέρα που κυκλοφορεί μέσω της παγίδας με ρυθμό 2 λίτρων ανά λεπτό σε θερμοκρασία 44 ° C (Hartley et al., 1980). Μετά από περίπου τέσσερις ώρες δειγματοληψίας, η συγκέντρωση δραστηριότητας του ^{222}Rn προσδιορίζεται μετρώντας τα σωματίδια γάμμα που εκπέμπονται από τα ^{214}Pb και ^{214}Bi χρησιμοποιώντας ένα εγγενές φασματομέτρο ακτίνων γάμμα γερμανίου και η διαφυγή του ραδονίου προσδιορίζεται στη συνέχεια από την τιμή συγκέντρωσης ραδονίου.

Μπορεί να αναφερθεί εδώ ότι το σύστημα ροής μετρά τη διαφυγή ραδονίου σε μικρότερο χρονικό διάστημα από το δοχείο άνθρακα. Έτσι, μία μόνο μέτρηση που χρησιμοποιεί το σύστημα ροής πιθανότατα δεν θα παρέχει ακριβή εκτίμηση της μέσης διαφυγής ραδονίου σε σύγκριση με μία μόνο μέτρηση που χρησιμοποιεί το δοχείο άνθρακα. Με άλλα λόγια, η μέθοδος δοχείου άνθρακα είναι πιο αποτελεσματική από τη μέθοδο ροής όσον αφορά το κόστος και την προσπάθεια μέτρησης της μέσης διαφυγής ραδονίου σε μια μεγάλη περιοχή.

3.1.3.4 Μέθοδος συσσώρευσης (Accumulation method)

Στη μέθοδο συσσώρευσης, η ποσοτική εκτίμηση του ρυθμού διαφυγής ραδονίου από τα υλικά γίνεται μετρώντας την εξέλιξη της συγκέντρωσης δραστηριότητας ραδονίου στον θάλαμο συσσώρευσης. Οι Thompkins και Cheng (1969) χρησιμοποίησαν τη μέθοδο συσσώρευσης για την επιτόπου μέτρηση του ρυθμού διαφυγής ραδονίου από το τοιχίο μεταλλεύματος, σε ένα υπόγειο ορυχείο ουρανίου. Σε αυτήν τη μέθοδο, ετοίμασαν διαφορετικά σημεία δειγματοληψίας κόβοντας μια επίπεδη επιφάνεια βάθους 1 m × 1 m × 12 cm στο τοιχίο του μεταλλεύματος. Ένα χαλύβδινο πλαίσιο τοποθετήθηκε στην επίπεδη επιφάνεια του τοιχίου και στερεώθηκε σε αυτήν τη θέση. Το πλαίσιο συνδέθηκε με το χαλύβδινο θάλαμο, στον οποίο παρέχονται πολλές βαλβίδες. Ο θάλαμος χρησίμευσε στη συσσώρευση ραδονίου που διαφεύγει από το μέταλλευμα. Ο θάλαμος ξεπλύθηκε αρχικά με πεπιεσμένο αέρα για την απομάκρυνση του αερίου ραδονίου και στη συνέχεια οι βαλβίδες έκλεισαν. Συλλέχθηκαν δείγματα αέρα από τον θάλαμο σε διαστήματα αρκετών ωρών (έως το πολύ 50 ωρών) για τον προσδιορισμό του ρυθμού διαφυγής ραδονίου. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος είναι πολύ περίπλοκη, δαπανηρή και χρονοβόρα κατά την οργάνωση της πειραματικής εγκατάστασης.

Οι Jha et al. (2001) μέτρησαν τη διαφυγή ραδονίου από κατεργασμένα απορρίμματα ουρανίου. Χρησιμοποίησαν ένα μικρό κυλινδρικό ατσάλινο θάλαμο χωρητικότητας 2 L για τη συσσώρευση

ραδονίου που διαφεύγει, για περίπου 30-60 λεπτά. Το ανοιχτό άκρο του θαλάμου τοποθετήθηκε σφιχτά πάνω από την επιφάνεια διαφυγής ραδονίου και το κλειστό άκρο εφοδιάστηκε με στροβιλισμό. Ωστόσο, η Μαγγα (2004) ανέφερε την έκταση της υποτίμησης της τιμής διαφυγής ραδονίου σε αυτή τη μέθοδο. Η υποεκτίμηση της διαφυγής ραδονίου μπορεί να οφείλεται στο μικρό μέγεθος του συσσωρευτή με αποτέλεσμα το φαινόμενο της διάχυσης κατά στην παρεμβολή μεταξύ των απορριμμάτων και του συσσωρευτή. Επομένως, απαιτεί διορθώσεις για την ακριβή εκτίμηση της διαφυγής ραδονίου.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν τις απλές, γρήγορες και λιγότερο δαπανηρές τεχνικές που δίνουν χαμηλές αβεβαιότητες στις μετρήσεις του ρυθμού διαφυγής ραδονίου από το μετάλλευμα και τα απορρίμματα επιχωμάτωσης. Οι συγγραφείς είχαν μετρήσει τον ρυθμό διαφυγής ραδονίου από το μετάλλευμα στο ορυχείο, κάνοντας τρύπες που δρούσαν ως θάλαμοι συσσώρευσης στους οποίους το ραδόνιο που διέφευγε από το μετάλλευμα, συσσωρευόταν για 1 ημέρα. Το δείγμα αέρα στη συνέχεια σχεδιάστηκε με το κελί σπινθηρισμού για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης ραδονίου (Sahu et al., 2013). Στην περίπτωση των απορριμμάτων επιχωμάτωσης, ο ρυθμός διαφυγής ραδονίου μετρήθηκε χρησιμοποιώντας έναν κυλινδρικό θάλαμο συσσώρευσης, διαμέτρου 17 cm και ύψους 30 cm, ο οποίος ενταφιάστηκε εν μέρει στα απορρίμματα (Sahu et al., 2014). Το ραδόνιο που διέφυγε από τα απορρίμματα, αφέθηκε να συσσωρευτεί στο θάλαμο για λιγότερο από 1 ώρα προκειμένου να αποφευχθεί το φαινόμενο διάχυσης και διαρροής αέρα. Ο ρυθμός διαφυγής ραδονίου υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$J = \frac{\lambda(V_s + V_e)(C_t - C_0 e^{-\lambda t})}{A(1 - e^{-\lambda t})} \quad (6)$$

όπου C_0 είναι η αρχική συγκέντρωση ραδονίου για $t=0$ ($Bq \cdot m^{-3}$), C_t είναι η συγκέντρωση ραδονίου μετά το χρόνο « t » ($Bq \cdot m^{-3}$), t είναι ο χρόνος συσσώρευσης ραδονίου (s), V_s είναι ο όγκος του κελιού σπινθηρισμού (m^3), V_e είναι ο πραγματικός όγκος του θαλάμου συσσώρευσης (m^3) και λ είναι η σταθερά αποσύνθεσης του ραδονίου (s^{-1}).

3.1.4 Μέθοδοι μέτρησης ρυθμού διαφυγής ραδονίου (σε υπόγεια νερά)

Η συγκέντρωση του διαλυμένου ραδονίου στο νερό των ορυχείων μετράται χρησιμοποιώντας την τεχνική «emanometry» (Raghavayya et al., 1990). Σε αυτή τη μέθοδο, το δείγμα νερού συλλέγεται σε αεροστεγείς πλαστικές φιάλες με ελάχιστη αναταραχή. Το δείγμα νερού στη συνέχεια μεταφέρεται στις φυσαλίδες ραδονίου με την τεχνική μεταφοράς κενού. Το ραδόνιο συλλέγεται στις κυψελίδες

«Lucas» διοχετεύοντας αέρα μέσω του νερού. Το ραδόνιο στην κυψελίδα εκτιμάται με συμβατικές τεχνικές μέτρησης.

Η συμβολή του υπόγειου νερού στη συγκέντρωση ραδονίου στον αέρα των ορυχείων μπορεί να υπολογιστεί συγκρίνοντας τη συγκέντρωση ραδονίου του νερού με φορά αντίθετη (upstream water), με εκείνη που έχει ίδια φορά (downstream water) με τη ροή, μιας συγκεκριμένης θέσης που δίνεται από τη σχέση (Misaqi, 1975):

$$E = q(C_{up} - C_{down}) \quad (7)$$

όπου E είναι το ραδόνιο που απελευθερώνεται από το νερό ($Bq \cdot min^{-1}$), q είναι η ροή του νερού ($L \cdot min^{-1}$), C_{up} είναι η συγκέντρωση ραδονίου στο νερό, με φορά αντίθετη στη ροή ($Bq \cdot L^{-1}$) και C_{down} είναι η συγκέντρωση ραδονίου στο νερό, με ίδια φορά με τη ροή ($Bq \cdot L^{-1}$).

3.1.5 Σχολιασμός

Οι γνώσεις σχετικά με τις πηγές ραδονίου και την ποσοτική εκτίμηση του ραδονίου από διάφορες πηγές έχουν μεγάλη αξία για τον έλεγχο των επιπέδων ακτινοβολίας εντός ασφαλών ορίων σε υπόγεια ορυχεία ουρανίου. Παραπάνω παρουσιάστηκε μια επισκόπηση των πηγών διαφυγής ραδονίου και των τεχνικών μέτρησης σε υπόγεια ορυχεία ουρανίου. Στα υπόγεια ορυχεία ουρανίου, η διαφυγή ραδονίου από διάφορες πηγές εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως την ποιότητα του μεταλλεύματος, το πορώδες, το μέγεθος κόκκων και την περιεκτικότητα σε υγρασία. Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας αποκάλυψε ότι ο ρυθμός διαφυγής ραδονίου σε πορώδη πετρώματα ουρανίου επηρεάζεται λιγότερο από την ποιότητα του μεταλλεύματος σε σύγκριση με τα μη πορώδη πετρώματα. Η διαφυγή του ραδονίου από τα απορρίμματα επιχωμάτων είναι ποσοτικά πιο σημαντική από ότι στο ίδιο το μέταλλευμα, λόγω υψηλότερου πορώδους και αυξημένης επιφάνειας. Συνεπώς, το πορώδες είναι κυρίαρχος παράγοντας που επηρεάζει το ρυθμό διαφυγής αερίου ραδονίου από πετρώματα σε «ανοίγματα» ορυχείων. Το τρεχούμενο νερό που έρχονται σε επαφή με ορυκτά που φέρουν ουράνιο, είναι επίσης μια πιθανή πηγή ραδονίου στην ατμόσφαιρα των ορυχείων. Η συγκέντρωση του ραδονίου στον αέρα των ορυχείων λόγω του ρέοντος νερού εξαρτάται από τον βαθμό αναταραχής στη διαδρομή της ροής του νερού και του ρυθμού ροής του αέρα.

Η μέτρηση της διαφυγής ραδονίου από διάφορες πηγές είναι απαραίτητη όταν λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα για τη μείωση των επιπέδων ακτινοβολίας σε ασφαλή όρια και την προστασία των μεταλλωρύχων από τους κινδύνους ακτινοβολίας. Αρκετοί ερευνητές έχουν μετρήσει τη διαφυγή ραδονίου σε υπόγεια ορυχεία ουρανίου χρησιμοποιώντας διαφορετικά μεγέθη συσσωρευτών. Το

μειονέκτημα της χρήσης μικρότερου συσσωρευτή είναι ότι δημιουργεί αυξανόμενα φαινόμενα διάχυσης, τα οποία με τη σειρά τους επηρεάζουν τη διαφυγή του ραδονίου. Από την άλλη πλευρά, οι συσσωρευτές μεγάλου μεγέθους δεν είναι βολικοί από την άποψη της φορητότητας, ειδικά για μελέτες πεδίου μεγαλύτερης κλίμακας εντός του ορυχείου. Ομοίως, στην περίπτωση συσσωρευτών με μεγαλύτερο ύψος, η ομοιόμορφη ανάμιξη ραδονίου ενδέχεται να μην πραγματοποιηθεί και ως εκ τούτου μπορεί να χρειαστεί ένας μικρός ανεμιστήρας για τη σωστή ανάμιξη και ομοιόμορφη κατανομή του ραδονίου. Επιπλέον, έχει αναφερθεί ότι, για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα συσσώρευσης ραδονίου στον *θάλαμο συσσώρευσης*, μπορεί να συμβεί διάχυση και ο διορθωτικός συντελεστής μπορεί να είναι πιο μεγάλος, γεγονός που οδηγεί στην εκθετική μείωση με τη μείωση του χρόνου συσσώρευσης ραδονίου στο θάλαμο. Επομένως, συνιστάται η επιλογή του βέλτιστου μεγέθους συσσωρευτή και μια κατάλληλη περίοδος συσσώρευσης ραδονίου για τη μέτρηση της διαφυγής ραδονίου σε υπόγεια ορυχεία ουρανίου, για να αποφευχθεί το φαινόμενο της διάχυσης στο συσσωρευτή.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι μιας και ο υψηλός κίνδυνος ραδονίου έχει εντοπιστεί και σε άλλα ορυχεία (εκτός των ουρανιούχων) όπως ανθρακωρυχεία, χρυσού, χαλκού και μαγγανίου, η μέτρηση της διαφυγής ραδονίου πρέπει να πραγματοποιείται σε αυτά τα ορυχεία για τον έλεγχο των επιπέδων ακτινοβολίας σε ασφαλή όρια.

3.2 Ανθρακωρυχεία

Σε πολλά ορυχεία, η παρουσία ραδιενεργών υλικών όπως το ουράνιο και το θόριο στα γύρω πετρώματα μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες συγκεντρώσεις των ισοτόπων του ραδονίου και σε αύξηση των θυγατρικών προϊόντων του ραδονίου, που παράγονται στην ατμόσφαιρα των ορυχείων. Η ατμόσφαιρα στα υπόγεια ορυχεία περιέχει, σε αέρια μορφή ή σε μορφή αερολυμάτων, όλες τις φυσικές αλυσίδες ραδιονουκλεϊδίων που προέρχονται από την αποσύνθεση του θορίου και του ουρανίου. Ως αποτέλεσμα, η συγκέντρωση ορισμένων ραδιονουκλεϊδίων, ειδικά το ραδόνιο και τα προϊόντα αποσύνθεσης του, μπορεί να επιτύχει υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης που μπορεί να είναι επικίνδυνα για την υγεία των εργαζομένων.

Η εξόρυξη άνθρακα και η καύση του σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς είναι δυνητικά η πιο σημαντική διαδικασία για τη δημιουργία τεχνολογικά αυξημένων επιπέδων φυσικής ραδιενέργειας. Το άνοιγμα μεγάλων επιφανειακών ορυχείων οδηγεί σε επιταχυνόμενη εκπομπή ραδονίου από τα βαθύτερα στρώματα του φλοιού της γης. Ομοίως, στα ανθρακωρυχεία, μπορεί να προκληθεί αυξημένη

συσσώρευση ραδονίου λόγω της εισροής του μέσω ρωγμών και καταγμάτων στη γη και ιδιαίτερα μέσω των υπόγειων συστημάτων νερού.

Γενικά, η πρόκληση εκπομπής επικίνδυνων αερίων στην ατμόσφαιρα, από τις διεργασίες εξόρυξης άνθρακα, αποτελεί συχνό φαινόμενο. Ένα μεγάλο μέρος των αερίων αυτών που εκλύονται από τους μεταλλευτικούς χώρους, είναι επικίνδυνο λόγω της τοξικότητας και ευφλεκτότητάς τους, όταν βρεθούν σε συγκεκριμένες συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα. Τα πιο εύφλεκτα αέρια είναι αυτά που παράγονται κατά τη διαδικασία «μεταμόρφωσης»⁶ των πετρωμάτων που περιέχουν άνθρακα. Όταν σχηματίζονται τα στρώματα άνθρακα, εκλύονται επιπλέον αέρια λόγω της μηχανικής καταστροφής του άνθρακα και της χαμηλής θερμοκρασίας οξείδωσής του. Ο ρυθμός εισροής των διαφόρων αερίων μέσα στην ατμόσφαιρα των μεταλλευτικών χώρων μπορεί να ποικίλει σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με το χώρο, το χρόνο, τις γεωλογικές και τεχνολογικές συνθήκες που επικρατούν.

Παρόλο που δεν υπάρχουν πολλές πληροφορίες σχετικά με την εκπομπή ραδονίου από ανθρακωρυχεία (επιφανειακά και υπόγεια ορυχεία), η επιτροπή UNCSEAR έκρινε ότι **ετησίως απελευθερώνονται 30-800 TBq ραδονίου από ορυχεία σε όλο τον πλανήτη**, με αποτέλεσμα ετήσιες συλλογικές ενεργές δόσεις από 0,5 έως 10 Sv ανά άτομο, αντίστοιχα. Στην έκθεση της UNSCEAR 2000, η Επιτροπή υπολόγισε ότι η μέση συγκέντρωση του ⁴⁰K, ²³⁸U και ²³²Th στον άνθρακα είναι 50, 20 και 20 Bq/kg, αντίστοιχα. Αυτή η εκτίμηση βασίζεται στην ανάλυση δειγμάτων άνθρακα από 15 χώρες, και ιδιαίτερα σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι η τιμή ορισμένων ραδιονουκλεϊδίων κυμαίνεται έως και δύο τάξεις μεγέθους.

3.2.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που συλλέχθηκαν από 21 διεθνείς δημοσιεύσεις. Οι συγκεντρώσεις ραδονίου που ακολουθούν στην προκειμένη περίπτωση, αφορούν πέρα από 71 ανθρακωρυχεία, μία περίπτωση αυτανάφλεξης γαιανθράκων (coal fire) και μία περίπτωση μεθανίου γαιανθράκων (coal seam gas-CSG).

⁶ Με τον όρο «μεταμόρφωση» (των πετρωμάτων), εννοούμε τη διαδικασία σχηματισμού πετρωμάτων έπειτα από ορυκτολογικές, ιστολογικές και χημικές μεταβολές που υφίστανται κάποια προϋπάρχοντα πετρώματα (Θεοδωρίκας, 2017, σ. 833).

ΧΩΡΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΟΡΥΧΕΙΩΝ	ΧΑΜΗΛΟΤΕΡΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bq/m ³)	ΥΨΗΛΟΤΕΡΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bq/m ³)	ΜΕΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bq/m ³)
Βραζιλία	1	5100	7200	6000
Πολωνία	1	94	1301	799
Πακιστάν	6	121	408	191.83
Ρωσία	10	15	288	86.68
Βοσνία - Ερζεγοβίνη	9	5	106	27.22
Αγγλία, Σκωτία	12	22.2	518	74
Πακιστάν	2	2.6	12.2	5.3
Πολωνία	1	120	64,400	-
Πακιστάν	12	48	343	146.28
Ινδία	-	-	-	215
Τουρκία	3	50	587	239
Τουρκία	1	49	223	117
Τουρκία	3	253	1470	679
Βιετνάμ	1	12	75	43
Αυστραλία	⁻⁷	1.4	15	7
Βραζιλία	-	1.22	44.70	10.40
Κίνα	⁻⁸	92.9	4,273.9	-
Βραζιλία	1	5,100	7,200	6000
Σλοβενία	6	30	655	213.5
Κίνα	1	65	189	⁻⁹
Βραζιλία	1	200	6,100	1910

Πίνακας 3.2: Μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου

⁷ Η περίπτωση αυτή αφορά το μεθάνιο γαιανθράκων (coal seam gas-CSG)

⁸ Η περίπτωση αυτή αφορά την αυτανάφλεξη γαιανθράκων (coal fires)

⁹ Στα σημεία που υπάρχει το σύμβολο «-», δεν αναγράφονται τιμές στις αντίστοιχες δημοσιεύσεις

3.2.2 Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων

Η ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων σε τρεις υποκατηγορίες, που ακολουθεί, γίνεται με σκοπό τη διευκόλυνση διεξαγωγής συμπερασμάτων όσον αφορά στο θέμα της παρούσας διπλωματικής. Οι τρεις υποκατηγορίες που θα αναλυθούν στη συνέχεια είναι οι εξής:

- 1) αυτανάφλεξη γαιανθράκων (coal fires),
- 2) μεθάνιο γαιανθράκων (coal seam gas-CSG) και
- 3) ανθρακωρυχεία (coal mines)

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε όλες τις παραπάνω δημοσιεύσεις έγιναν με σκοπό την εξασφάλιση προστασίας και υγείας στους τουρίστες και τους εργαζόμενους σε διάφορους μεταλλευτικούς χώρους, καθώς επίσης και για τη διερεύνηση της πιθανότητας το ραδόνιο να αποτελεί "ανιχνευτή" των κινήσεων του αέρα μέσα σε υπόγειες εγκαταστάσεις με ελλυτές σύστημα εξαερισμού. Επιπλέον, κρίθηκε σημαντική και η αναζήτηση συσχέτισης ή μη, μεταξύ συγκέντρωσης ραδονίου στο CSG και βροχόπτωσης, θερμοκρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης, ταχύτητας αέρα και κατεύθυνσης αέρα. Ακόμα πραγματοποιήθηκε και η συσχέτιση των διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων ραδονίου, με τις αλλαγές των εποχών (αύξηση/μείωση θερμοκρασίας), καθώς και η σύγκριση των τιμών συγκέντρωσης ραδονίου σε ορυχεία, μεταξύ παραγωγικών και μη περιοχών (ως προς την εξόρυξη μεταλλεύματος).

Παρακάτω θα αναλυθούν οι αντιπροσωπευτικές προαναφερθείσες υποκατηγορίες, οι οποίες αποτελούν τη βάση για την παρουσίαση και συζήτηση των αποτελεσμάτων στο πλαίσιο των ανθρακωρυχείων.

3.2.2.1 Αυτανάφλεξη γαιανθράκων (coal fires)

Η αυτανάφλεξη γαιανθράκων αποτελεί μία πυρκαγιά που ξεσπά αιφνίδια, όταν το ορυκτό κάρβουνο έρθει σε επαφή με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας. Γενικά είναι γνωστό ότι αποτελεί μεγάλη απειλή για πολύτιμους ενεργειακούς πόρους, το περιβάλλον, την ανθρώπινη υγεία και ασφάλεια. Καταναλώνει τεράστιους πόρους άνθρακα και εκπέμπει μεγάλες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου (CO₂ και CH₄). Τοξικά αέρια (CO, SO₂, H₂S, N₂O, NO_x κ.λπ.) και ιχνοστοιχεία (As, F, Se, Hg, κ.λπ.) που απελευθερώνονται από την αυτανάφλεξη γαιανθράκων, απειλούν την υγεία των κατοίκων διαφόρων περιοχών. Τα ασταθή υπερκείμενα πετρώματα, οι μεγάλες ρωγμές και η καθίζηση που προκαλούνται

από την αυτανάφλεξη γαιανθράκων είναι επικίνδυνες τόσο για την υποδομή όσο και για τους ανθρώπους.

Αυτανάφλεξεις γαιανθράκων συμβαίνουν σε πολλές χώρες σε όλο τον κόσμο, όπως στην Κίνα, στην Ινδία, στις ΗΠΑ, στην Αυστραλία και τη Νότια Αφρική, μεταξύ άλλων. Η Κίνα, ως ο μεγαλύτερος παραγωγός άνθρακα (3.23 Gt το 2012, China Economic Information Network, 2013) στον κόσμο, υπέφερε από τους σοβαρούς κινδύνους από τις αυτανάφλεξεις γαιανθράκων από τη δεκαετία του 1960, οδηγώντας έτσι πολλούς διεθνείς και κινέζους εμπειρογνώμονες και μελετητές, να διερευνήσουν το φαινόμενο αυτό στην Κίνα. Συνεπώς, λογικά διεξάγεται το συμπέρασμα ότι η ανίχνευση και παρακολούθησή τους είναι πολύ σημαντική για τη χαρτογράφηση της αυτανάφλεξης γαιανθράκων, τη μοντελοποίηση, την εκτίμηση των περιβαλλοντικών και ανθρωπίνων επιπτώσεων και την πυροσβεστική μηχανική (fire-fighting engineering).

Κατά την τελευταία δεκαετία, οι τεχνικές εντοπισμού και παρακολούθησης πιθανής αυτανάφλεξης γαιανθράκων, αναπτύχθηκαν γρήγορα και δημοσιεύθηκαν πολλά προηγμένα ευρήματα. Όσον αφορά το επίπεδο χωρικής λεπτομέρειας και την επιθυμητή ακρίβεια ανίχνευσης, η ανίχνευση και παρακολούθησή τους μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τέσσερις ομάδες: υπόγεια, επίγεια, αερομεταφερόμενη και τηλεσκοπική έρευνα. Στην κατηγορία της υπόγειας έρευνας ανήκει (μαζί με τα αέρια δείκτες (*index gases*)) και το αέριο ραδόνιο.

Το αέριο ραδόνιο (^{222}Rn) έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως ως δείκτης για σεισμούς και ηφαιστειακή δραστηριότητα (King, 1986; Toutain & Baubron, 1999). Το ^{222}Rn έχει τα χαρακτηριστικά ενός «αερίου παρακολούθησης» όπως ισχυρή ραδιενέργεια, ικανότητα διάχυσης ($0,12 \text{ cm}^2/\text{s}$ στον αέρα και $1,37 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ σε νερό στους 25°C) (Etiope & Martinelli, 2002; Nazaroff, 1992) και σχετικά μεγάλο χρόνο ημιζωής. Επιπλέον, αρκετές είναι οι φορές που γίνεται χρήση αερίου ραδονίου για την ανίχνευση περιοχών αυτανάφλεξης γαιανθράκων, με βασικούς λόγους τους εξής:

- a) Το μεθάνιο γαιανθράκων (coal seams) είναι πλούσιο σε ραδόνιο.
- b) Με την άνωση, το αέριο ραδόνιο στα υπερκείμενα πετρώματα μεταφέρεται προς τα πάνω χάρη στη ροή αερίων εκπομπών, ειδικά με CO_2 και CH_4 ως αέρια μεταφοράς.
- c) Ρωγμές ή ρήγματα που προκαλούνται από αυτανάφλεξη γαιανθράκων είναι καλές οδοί για τη μετακίνηση ^{222}Rn από κάτω, προς την επιφάνεια.

Μία μεγάλης κλίμακας έρευνα, πάνω στη μέτρηση αερίου ραδονίου, αναπτύχθηκε στο Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο «Taiyuan». Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι κατά τη διάρκεια της αυτανάφλεξης του άνθρακα, η συγκέντρωση αερίου ραδονίου αυξανόταν 46 φορές από 2.51 σε 115.51 picocuries ανά λίτρο (pCi/L) ή με την κατάλληλη μετατροπή, από 92.9 σε $4273.9 \text{ Bq}/\text{m}^3$, στο περιβάλλον της ανάφλεξης. Στη φάση αυτοθέρμανσης, η μετρούμενη συγκέντρωση αερίου ραδονίου

ήταν χαμηλή και ασταθής, ενώ ο ρυθμός αύξησης της συγκέντρωσης αερίου ραδονίου άρχισε να επιταχύνεται από τους 120 °C στους 140 °C και συνέχισε να αυξάνεται περαιτέρω καθώς ο άνθρακας αναφλεγόταν στους 260-280 °C.

Στην αυτανάφλεξη γαιανθράκων της περιοχής «Wuda», διεξήχθησαν επιτόπιες μετρήσεις αερίου ραδονίου με τη μέθοδο «alpha-cur». Τα αποτελέσματα που παρατηρήθηκαν, έδειξαν ότι η συγκέντρωση αερίου ραδονίου που εμφανίστηκε κατά την ανάπτυξη υπόγειας αυτανάφλεξης γαιάνθρακα, ήταν υψηλή (1.4×10^7 - 1.8×10^7 Bq) όταν αυτή ήταν ενεργή και μειώθηκε σημαντικά όταν ολοκληρώθηκε η καύση του άνθρακα.

Η μέτρηση αερίου ραδονίου είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για τον εντοπισμό αυτανάφλεξης γαιανθράκων, ειδικά για περιοχές που μόλις έχουν αναφλεγεί. Έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για τον εντοπισμό της υπόγειας αυτανάφλεξης γαιάνθρακα στην Κίνα, π.χ. στο ορυχείο άνθρακα «Gushuyuan» στην επαρχία «Shanxi», στο ανθρακωρυχείο «Baijigou», στο σύγκλινο «Wuda» στην Εσωτερική Μογγολία, και στην αυτανάφλεξη γαιάνθρακα «Didao» στο «Heilongjiang».

3.2.2.2 Μεθάνιο γαιανθράκων (Coal Seam Gas-CSG)

Με τον όρο "Coal Seam Gas" εννοούμε μία μορφή φυσικού αερίου, το μεθάνιο που εκλύεται από τους γαιάνθρακες. Είναι ένα άχρωμο και άοσμο αέριο. Η συγκέντρωσή του σε υπόγειους χώρους δημιουργεί μεγάλα προβλήματα. Ως εκ τούτου, σε πολλές θέσεις στην Αυστραλία, συγκεντρώνονται πληροφορίες για να περιορίσουν τυχόν δυνητικές αρνητικές μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της συγκέντρωσης του μεθανίου. Έτσι, για το λόγο αυτό σε μία θέση στη Νέα Νότια Ουαλία της Αυστραλίας πραγματοποιήθηκε μονοετής μέτρηση ραδονίου (^{222}Rn), μεθανίου (CH_4), διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ και $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$. Επίσης έγινε η υπόθεση ότι το ^{222}Rn μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ιχνηλάτης της ανταλλαγής CH_4 και CO_2 εδάφους-ατμόσφαιρας και ότι οι σταθερές τιμές ισοτόπων του ατμοσφαιρικού CH_4 και CO_2 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της πηγής των αερίων του θερμοκηπίου.

Σύμφωνα με τη μελέτη αυτή που πραγματοποιήθηκε στην Αυστραλία, διαπιστώθηκε σημαντική αντίστροφη γραμμική σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων ^{222}Rn και της βροχόπτωσης¹⁰ ($r^{211}=0,43$, p

¹⁰ Μονάδα μέτρησης του ύψους βροχής είναι το χιλιοστό ύψους βροχής (mm). Στην πράξη βροχή ύψους 1 mm ισοδυναμεί με 1 L νερού σε κάθε στρέμμα γης (Φαλέγκας, 2014).

¹¹ Η τιμή r^2 (ή συντελεστής προσδιορισμού) εκφράζει την απόκλιση που μπορεί να υπάρχει στο υπό μελέτη μοντέλο (Agrawal, 2018).

¹²<0,01) και της θερμοκρασίας ($r^2 = 0,13$, $p < 0,01$), ενώ η ατμοσφαιρική πίεση, η ταχύτητα του ανέμου και η κατεύθυνση του ανέμου επηρέασαν τις συγκεντρώσεις σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με τις εποχιακές κλίμακες. Το ²²²Rn είχε σημαντική, αλλά ασθενή θετική συσχέτιση με τις συγκεντρώσεις τόσο του εποχικού CO₂ ($r^2 = 0,15$, $p < 0,01$) όσο και του CH₄ ($r^2 = 0,11$, $p < 0,01$). Η μη σύνδεση μεταξύ ²²²Rn και CO₂ και CH₄ πιθανότατα οφείλεται σε βιογενείς πηγές και καταβόθρες (sinks) CO₂ και CH₄.

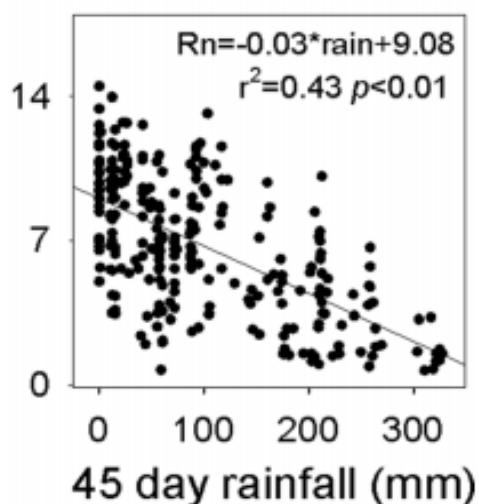
Λόγω έλλειψης επαρκών στοιχείων και δεδομένων που αφορούν προηγούμενες εργασίες πάνω στο CSG, αναπτύχθηκε η ανάγκη για διαμόρφωση κατάλληλων ατμοσφαιρικών ιχνηθετών που θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της πηγής και της ποσότητας των εκπομπών από το CSG. Ένας πολύτιμος ιχνηλάτης των διεργασιών αερίου εδάφους είναι το ραδόνιο (²²²Rn). Η διάχυση (diffusion) του ²²²Rn μέσω των εδαφών στην ατμόσφαιρα οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στα φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους, συμπεριλαμβανομένης της διαπερατότητάς του και της περιεκτικότητάς του σε υγρασία και μετεωρολογικών συνθηκών, όπως ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία (Parachristodoulou et al. 2007; Schery and Wasiolek 1998). Αυτές οι συνθήκες μπορούν να αλλάξουν τόσο σε βραχυπρόθεσμες όσο και σε μακροπρόθεσμες κλίμακες (Griffiths et al. 2010). Το ραδόνιο έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των CO₂ και CH₄ που προέρχονται από ορυκτά καύσιμα στην Ευρώπη και για να διερευνήσει τις διάχυτες εκπομπές από ένα αυστραλιανό πεδίο CSG. Για τον χαρακτηρισμό των εποχιακών μοτίβων σε ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις ²²²Rn, απαιτούνται υψηλής ανάλυσης, μακροπρόθεσμες παρατηρήσεις.

Οι βραχυπρόθεσμες παρατηρήσεις στην ατμόσφαιρα ενός καθιερωμένου αυστραλιανού πεδίου CSG αποκάλυψαν μια σημαντική συσχέτιση μεταξύ των συγκεντρώσεων ²²²Rn και του αριθμού των κοντινών φρεατίων CSG που υποτίθεται ότι σχετίζονται με την αυξημένη ανταλλαγή εδάφους καθώς τα υποστρώματα αλλάζουν κατά τη διάτρηση και την εξερεύνηση του CSG (Tait et al., 2013). Ωστόσο, η έλλειψη βασικών παρατηρήσεων σε αυτή τη μελέτη εμποδίζει την άμεση εξαγωγή συμπερασμάτων αιτίου-αποτελέσματος. Οι συγκεντρώσεις του ²²²Rn μπορεί να ποικίλλουν σε χρονικές κλίμακες που κυμαίνονται από ώρες έως εποχές, απαιτώντας τη χρήση μακροπρόθεσμων παρατηρήσεων για τον προσδιορισμό της φυσικής μεταβλητότητας στην ατμόσφαιρα.

Οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις του ²²²Rn για μία παρατεταμένη περίοδο παρατηρήθηκαν προς το τέλος του καλοκαιριού (1.4 ± 0.5 Bq m⁻³ για 13 ημέρες). Αυτό αντιστοιχεί σε ημερήσιες βροχοπτώσεις μεταξύ 0,3 και 34,0 mm, με βροχή τις 26 από τις 27 ημέρες μεταξύ 13 Φεβρουαρίου και 11 Μαρτίου 2014. Συνολικά, η μέση ημερήσια βροχόπτωση το καλοκαίρι (4.2 ± 9.3 mm ημέρα⁻¹) ήταν πάνω από

¹² Η τιμή p (ή τιμή σημαντικότητας) είναι η πιθανότητα της απόκτησης ενός αποτελέσματος ίσου ή "πιο ακραίου" από ό,τι ήταν στην πραγματικότητα παρατηρήσιμο.

δέκα φορές υψηλότερη από την μέση ημερήσια βροχόπτωση το χειμώνα ($0.4 \pm 2.2 \text{ mm ημέρα}^{-1}$). Παρατηρήθηκε σημαντική αρνητική γραμμική σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων ^{222}Rn και της συνολικής βροχόπτωσης τις 45 ημέρες πριν από κάθε μέτρηση ($r^2 = 0.43$, $p < 0.01$) (Εικόνα 3.4). Το φαινόμενο αυτό είχε παρατηρηθεί ξανά στην περιοχή Alligator River της βόρειας Αυστραλίας (Martin et al., 2004), όπου οι συγκεντρώσεις ραδονίου διέφεραν ανάλογα με την εποχή, και συγκεκριμένα ήταν μία τάξη μεγέθους χαμηλότερες (5 Bq m^{-3}) από τις συγκεντρώσεις στους ξηρότερους μήνες (45 Bq m^{-3}). Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αποδοθεί στην **αυξημένη υγρασία του εδάφους, η οποία**



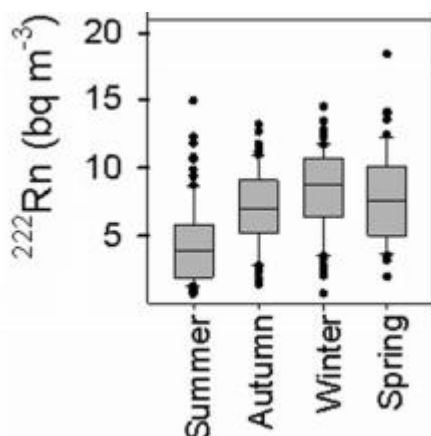
Εικόνα 3.4: Συσχέτιση συγκέντρωσης ραδονίου (Bq/m^3) με τη βροχόπτωση (Tait et al., 2015).

γεμίζει τους άδειους πόρους και αυξάνει την υδροστατική πίεση, μειώνοντας έτσι τη διάχυση των εδαφικών αερίων όπως το ^{222}Rn . Στην Εικόνα 3.4 φαίνεται η αρνητική συσχέτιση της συγκέντρωσης ραδονίου με τη βροχόπτωση.

Τα εδάφη στην περιοχή που μελετάται έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο και ως εκ τούτου έχουν χαμηλή διαπερατότητα όταν είναι βρεγμένα, αλλά κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων υπόκεινται σε ρωγμές που θα μπορούσαν να αυξήσουν τη διάχυση και την προσρόφηση του αερίου εδάφους στην ατμόσφαιρα.

Όσον αφορά στη θερμοκρασία, οι περισσότερες μελέτες αναφέρουν ότι οι συγκεντρώσεις ^{222}Rn αυξάνονται με τη θερμοκρασία. Ωστόσο, σε αυτή τη μελέτη του μεθανίου γαιανθράκων, η μέση

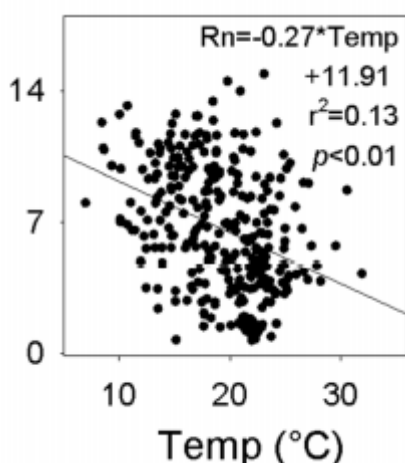
ημερήσια συγκέντρωση ^{222}Rn ήταν υψηλότερη το χειμώνα ($8.3 \pm 3.0 \text{ Bq m}^{-3}$) και χαμηλότερη το καλοκαίρι ($4.5 \pm 3.1 \text{ Bq m}^{-3}$).



Εικόνα 3.5: Συσχέτιση συγκέντρωσης ραδονίου (Bq/m^3) με τις εποχές, (Tait et al., 2015)

Αυτό αντιστοιχούσε σε μέσες θερμοκρασίες του καλοκαιριού ($23.1 \pm 2.3 \text{ }^\circ\text{C}$) που ήταν υψηλότερες από την άνοιξη ($21.8 \pm 2.7 \text{ }^\circ\text{C}$), το φθινόπωρο ($16.6 \pm 3.5 \text{ }^\circ\text{C}$) και τις θερμοκρασίες χειμώνα ($15.6 \pm 3.0 \text{ }^\circ\text{C}$).

Συνολικά, υπήρχε μια σημαντική αρνητική γραμμική σχέση μεταξύ συγκέντρωσης ραδονίου και θερμοκρασίας. Οι Fujiyoshi et al. (2006) ανέφεραν ότι **οι συγκεντρώσεις του εδάφους σε ^{222}Rn αυξήθηκαν από ~ 1000 σε ~ 4000 Bq m^{-3} όταν οι θερμοκρασίες αυξήθηκαν από 13 σε 17 $^\circ\text{C}$ στο Σαπόρο της Ιαπωνίας.** Αυτή η απόκριση της δραστηριότητας ^{222}Rn στη θερμοκρασία πιθανότατα οφείλεται σε υψηλότερους ρυθμούς εκροής ^{222}Rn από τα εδάφη. Η εκροή ραδονίου είναι το κλάσμα του ραδονίου που παράγεται από το ^{226}Ra και μπορεί να εισέλθει στους πόρους των ιζημάτων και σε υψηλότερες θερμοκρασίες, μπορεί να αυξηθεί (Iskandar et al., 2004). Ως εκ τούτου, οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις ^{222}Rn το καλοκαίρι κατά τη διάρκεια αυτής της μελέτης είναι πιθανώς ενδεικτικές της μεγαλύτερης επιρροής της υγρασίας του εδάφους στην απελευθέρωση ^{222}Rn από εδάφη.



Εικόνα 3.6: Συσχέτιση συγκέντρωσης ραδονίου (Bq/m^3) με τη θερμοκρασία (Tait et al., 2015).

Τέλος όσον αφορά στην ατμοσφαιρική πίεση, την ταχύτητα του ανέμου και την κατεύθυνση του ανέμου, βρέθηκε ότι η συσχέτισή τους με τις συγκεντρώσεις ραδονίου είναι μικρότερη έως ανεπαίσθητη.

3.2.2.3 Ανθρακωρυχεία (coal mines)

Οι μέσες συγκεντρώσεις ραδονίου σε ορισμένα ανθρακωρυχεία του κόσμου έχουν συνοψιστεί και δίδονται στον Πίνακα 3.3. Το εύρος της συγκέντρωσης ραδονίου και η συνολική μέση τιμή του καθορίστηκε για τρία ορυχεία της Τουρκίας και δόθηκε στην τελευταία σειρά του Πίνακα 3.3. Από τον πίνακα συμπεραίνεται ότι το ανθρακωρυχείο της Βραζιλίας έχει την υψηλότερη μέση τιμή συγκέντρωσης ραδονίου μεταξύ όλων των ανθρακωρυχείων. Τα ανθρακωρυχεία της Βραζιλίας και Πολωνίας ήταν τα μόνα που είχαν μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου πάνω από το εύρος επιπέδου δράσης 500-1500 Bq m⁻³. Ωστόσο, στα ανθρακωρυχεία της Πολωνίας μόνο το 10% των μετρήσεων ήταν πάνω από 1500 Bq m⁻³. Η μέση συγκέντρωση ραδονίου για τα ορυχεία λιγνίτη της Τουρκίας, είναι συγκρίσιμη με εκείνη του Πακιστάν. Η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης ραδονίου σε αυτή τη μελέτη για τα ορυχεία της Τουρκίας είναι επίσης συγκρίσιμη με τη μέγιστη συγκέντρωση για τα ορυχεία στο Ηνωμένο Βασίλειο και το Ιράν. Η μέση συγκέντρωση ραδονίου που λήφθηκε από ασφαλτούχα ανθρακωρυχεία στην Τουρκία είναι σχεδόν τρεις φορές υψηλότερη από εκείνη των λιγνιτωρυχείων της τελευταίας σειράς του πίνακα.

Country	Source	Number of coal mines	Radon concentration (Bq m ⁻³)
UK	(14)	12	74 (22–518)
	(15)	5	— (27–613)
India	(18)	2	145 (46–354)
Iran	(16)	10	320 (146–520)
Poland	(12)	71	740 (0–7000)
Pakistan	(13)	6	192 (121–408)
Brazil	(11)	1	1650 (170–6100)
Turkey	(19)	5	— (31–185)
	(17)	3	679 (656–705)
	Present study	3	239 (50–587)

Πίνακας 3.3: Μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου σε ανθρακωρυχεία ανά τον κόσμο, (Çile et al., 2010)

Η τελευταία σειρά του Πίνακα 3.3 αφορά μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε τρία ορυχεία άνθρακα των Τουρκικών Επιχειρήσεων Άνθρακα (TKI), που είναι ο κύριος κρατικός φορέας παραγωγής, επεξεργασίας και εμπορίας λιγνίτη. Ο λόγος επιλογής αυτών των τριών ορυχείων για την ανάλυση του ραδονίου, ήταν η κλίμακα αυτών των ορυχείων όσον αφορά στην παραγωγή άνθρακα

και στον αριθμό εργαζομένων. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι οι συγκεντρώσεις ραδονίου σε όλα τα σημεία μέτρησης ήταν κάτω από το επίπεδο δράσης των 1000 Bq m^{-3} για χώρους εργασίας που ορίζονται από την Τουρκική Αρχή Ατομικής Ενέργειας και τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας. Αυτή η τιμή βρίσκεται στη μέση της περιοχής των $500\text{--}1500 \text{ Bq m}^{-3}$ που συνιστά η Διεθνής Επιτροπή Προστασίας της Ακτινοβολίας (ICRP-65).

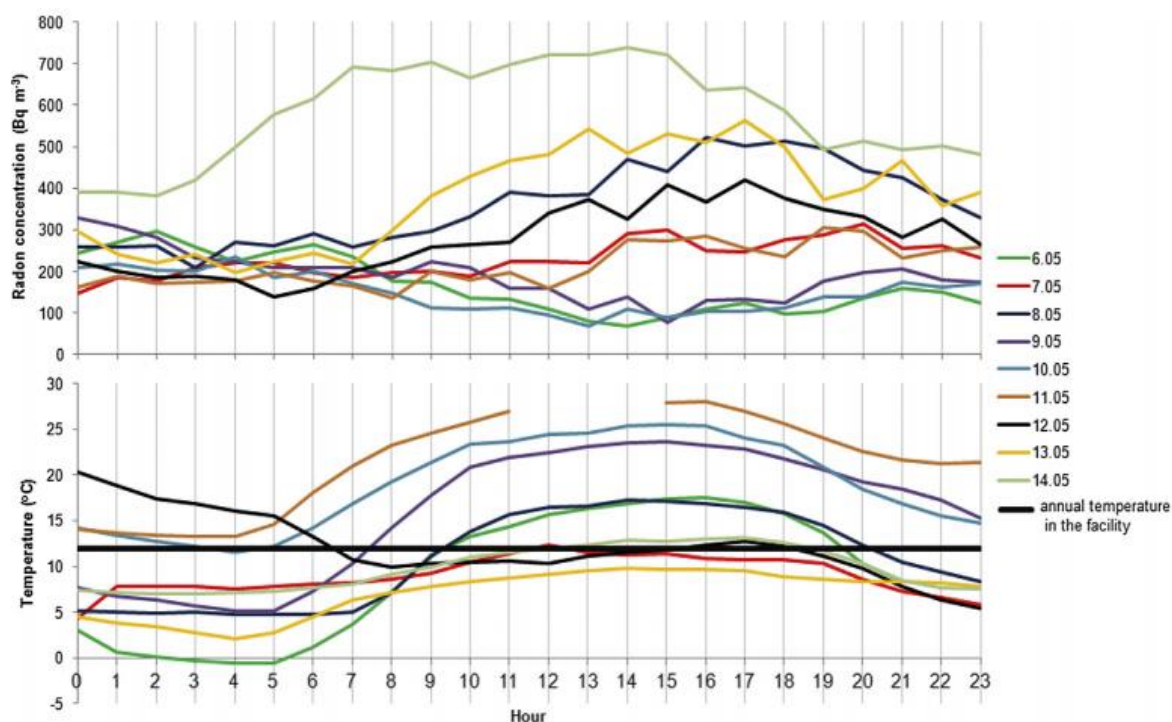
Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι πραγματοποιήθηκε έρευνα χρήσης του ραδονίου ως ιχνηλάτη των ημερήσιων, εποχιακών και χωρικών κινήσεων του αέρα στην Υπόγεια Τουριστική Διαδρομή «Ανθρακωρυχείο» (ΝΔ Πολωνία). Οι έρευνες σχετικά με τις συγκεντρώσεις ραδονίου στην υπόγεια τουριστική διαδρομή πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας παθητικές και ενεργές τεχνικές μέτρησης. Η μέση συγκέντρωση ραδονίου που σημειώθηκε σε αυτήν την εγκατάσταση ήταν 799 Bq m^{-3} και είναι συνεπής με τις συγκεντρώσεις ραδονίου που σημειώθηκαν στα ανθρακωρυχεία της Πολωνίας.

Οι εποχιακές διακυμάνσεις, που παρατηρήθηκαν σε αυτή την υπόγεια τουριστική διαδρομή, ήταν οι εξής: **οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδονίου σημειώθηκαν κατά τα καλοκαίρια, οι χαμηλότερες κατά τους χειμώνες**, κατά το φθινόπωρο και την άνοιξη ενδιάμεσες αλλά υψηλότερες την άνοιξη από ό,τι το φθινόπωρο. Ο κύριος εξωτερικός παράγοντας που επηρέασε τις εποχιακές αλλαγές των συγκεντρώσεων ραδονίου ήταν η εποχιακή μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας. Δεν βρέθηκε συσχέτιση μεταξύ των εποχιακών μεταβολών των συγκεντρώσεων ραδονίου και των εποχιακών μέσων ατμοσφαιρικών πιέσεων. Οι σημαντικές διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων ραδονίου μεταξύ εποχών επιβεβαιώνουν ότι το αυτόματο σύστημα εξαερισμού δεν ήταν διαθέσιμο εντός αυτής της εγκατάστασης και υποδεικνύει επίσης ότι οι ανταλλαγές αέρα μπορούν να συνδεθούν με εποχιακή μεταβλητότητα του καιρού στην Πολωνία ή με τον αριθμό των τουριστών που επισκέφτηκαν αυτό το μέρος.

Η θερμοκρασία μέσα στην υπόγεια τουριστική διαδρομή είναι περίπου 12°C κατά τη διάρκεια ολόκληρου του έτους. Όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι υψηλότερη από ό,τι μέσα στην υπόγεια τουριστική διαδρομή, ο ψυχρός και επομένως βαρύτερος αέρας, εμπλουτισμένος με ραδόνιο που βγαίνει από τα γύρω πετρώματα, παραμένει μέσα στην εγκατάσταση. Τέτοιες καταστάσεις συμβαίνουν τα καλοκαίρια. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, θερμότερος (σε σχέση με την ατμόσφαιρα) αέρας μέσα στην υπόγεια τουριστική διαδρομή ρέει έξω (προς την ατμόσφαιρα) λαμβάνοντας ραδόνιο μαζί του, με αποτέλεσμα τη μείωση των συγκεντρώσεων ραδονίου μέσα στον τόπο. Η θερμοκρασία κατά την άνοιξη και το φθινόπωρο είναι χαμηλότερη από το καλοκαίρι και υψηλότερη από ό,τι το χειμώνα, αλλά συνήθως οι ανοίξεις είναι θερμότερες από τα φθινόπωρα,

προκαλώντας υψηλότερη συγκέντρωση ραδονίου μέσα στην υπόγεια τουριστική διαδρομή σε πηγές από ό,τι τα φθινόπωρα.

Όσον αφορά στις ημερήσιες διακυμάνσεις, κατά τις περισσότερες ημέρες, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδονίου καταγράφηκαν από 8-9 π.μ. έως 7-8 μ.μ. και χαμηλότερα τις νύχτες. Παρόμοιες αλλαγές των ημερήσιων παραλλαγών ραδονίου παρατηρήθηκαν από την Fijałkowska-Lichwa (2014) στην υπόγεια εκπαιδευτική τουριστική διαδρομή στο Παλιό Ορυχείο Ουρανίου στο Κλέτνο. Αυτό το μοτίβο αλλαγών στη συγκέντρωση ραδονίου δεν ακολουθείται στις 6, 9 και 10 Μαΐου. Εκείνες τις μέρες, η συγκέντρωση ραδονίου από τις 8 π.μ. έως τις 6 μ.μ. ήταν χαμηλότερη. Ο κύριος παράγοντας που ευθυνόταν για τις ωριαίες μεταβολές των συγκεντρώσεων ραδονίου ήταν η καθημερινή μεταβολή των εξωτερικών θερμοκρασιών. Δεν βρέθηκαν συσχετίσεις μεταξύ συγκέντρωσης ραδονίου και άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων όπως ατμοσφαιρική πίεση, ταχύτητα ανέμου ή βροχόπτωση. Επιπλέον, παρατηρήθηκε η επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα στις συγκεντρώσεις ραδονίου. Ως ανθρώπινος παράγοντας, θεωρείται η ανοιχτή πόρτα εισόδου κατά τη διάρκεια εργασιών αποκατάστασης που πραγματοποιούνται εντός του υπόγειου χώρου. Παρακάτω ακολουθεί η Εικόνα 3.7 με την πιο αναλυτική απεικόνιση των μεταβολών αυτών.

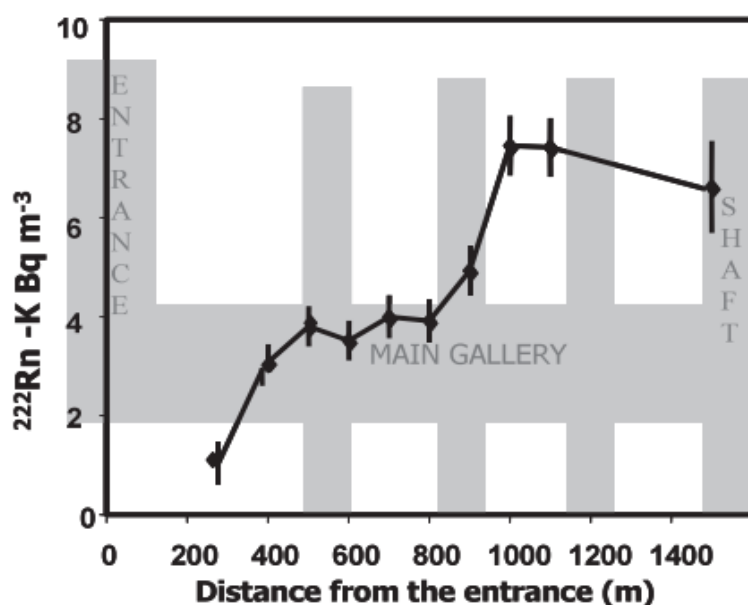


Εικόνα 3.7: Συσχέτιση συγκέντρωσης ραδονίου και θερμοκρασίας με την ώρα, (Tchorz-Trzeciakiewicz and Parkitny, 2015)

Τέλος, οι χωρικές διακυμάνσεις υπήρξαν αντικείμενο έρευνας έπειτα από παρατήρηση αύξησης της συγκέντρωσης ραδονίου με την απομάκρυνση από την είσοδο του ορυχείου και σε μέρη όπου δεν έρχονταν σε άμεση επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Μετά από 21 ανιχνευτές που τοποθετήθηκαν

σε 21 αντίστοιχα σημεία μέσα στο ορυχείο της Πολωνίας, αποκτήθηκαν περισσότερες πληροφορίες. Καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου μέτρησης, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδονίου σημειώθηκαν στο σημείο που ήταν κοντά στο «winze»¹³, όπου ο αέρας εμπλουτισμένος με ραδόνιο, μετακινούνταν από τα χαμηλότερα επίπεδα του κλειστού ορυχείου, στο ανώτερα. Οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις ραδονίου παρατηρήθηκαν στα σημεία που ήταν κοντά στο φρεάτιο.

Το ίδιο φαινόμενο παρουσιάστηκε και σε μία άλλη έρευνα που πραγματοποιήθηκε στη Βραζιλία. Στην παρακάτω Εικόνα 3.8, απεικονίζονται οι συγκεντρώσεις ραδονίου ενός υπόγειου ανθρακωρυχείου στη Βραζιλία σε συνάρτηση με την απόσταση από την είσοδο του ορυχείου. Παρατηρείται ότι υπάρχει αύξηση της συγκέντρωσης ραδονίου από τα 1000 Bq m⁻³ στα 7000 Bq m⁻³ με την απομάκρυνση από την είσοδο (entrance), με μία μικρή μείωση της συγκέντρωσης στο σημείο του φρεατίου (shaft), το οποίο με βάση τα παραπάνω ήταν αναμενόμενο, λόγω του αερισμού του σημείου εκείνου.



Εικόνα 3.8: Συσχέτιση συγκέντρωσης ραδονίου με την απόσταση από την είσοδο του ορυχείου, (Veiga et al., 2004)

3.2.3 Σχολιασμός

Λόγω της περιορισμένης χημικής αντιδραστικότητάς του, με τη μόνη πηγή ραδονίου να προέρχεται από εδάφη και την ευκολία και την αποτελεσματικότητα της μέτρησής του, το ²²²Rn μπορεί να είναι ένας ιδανικός ιχνηλάτης για τον προσδιορισμό των αλλαγών στις ροές των αερίων εδάφους. Το ²²²Rn έδειξε να αλλάζει ευδιάκριτα ημερήσια και εποχιακά, γεγονός που σχετίζεται με τη θερμοκρασία, τις

¹³ Winze: μια μικρή σύνδεση μεταξύ διαφορετικών επιπέδων σε ένα ορυχείο

βροχοπτώσεις και τις ημερήσιες αλλαγές στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι το ραδόνιο, το CH_4 και το CO_2 , μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμήσουν μελλοντικές αλλαγές στην ατμοσφαιρική χημεία που σχετίζονται με το μεθάνιο γαιανθράκων ή άλλες εξελίξεις στην περιοχή.

Γενικά όσον αφορά στις συγκεντρώσεις ραδονίου σε ανθρακωρυχεία ανά τον κόσμο, όλα σχεδόν τα ορυχεία (εκτός της Βραζιλίας και της Πολωνίας), κρίθηκαν «ασφαλή» τόσο για τους εργαζόμενους όσο και για τους επισκέπτες, με συγκεντρώσεις εντός επιτρεπτών ορίων. Οι υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου, αποδόθηκαν στο γεγονός ότι ο άνθρακας που εξορύσσεται από κάποια ορυχεία, περιέχει σε πολύ υψηλά ποσοστά, θυγατρικά του ουρανίου. Έναν ακόμα λόγο αποτελεί και ο ανεπαρκής ή ελλιπής εξαερισμός. Τέλος τα αποτελέσματα έκριναν το ραδόνιο "άριστο ανιχνευτή" για τις κινήσεις αέρα και την αύξηση/μείωση της θερμοκρασίας να "σχετίζεται άμεσα" με τις διακυμάνσεις συγκεντρώσεων ραδονίου.

3.3 Άλλα ορυχεία

Εκτός από τα ορυχεία ουρανίου και τα ανθρακωρυχεία, έχουν πραγματοποιηθεί εκτενείς έρευνες και μελέτες και σε άλλα ορυχεία, τα οποία θα συζητηθούν στο κεφάλαιο αυτό. Η κατηγορία αυτών των ορυχείων περιλαμβάνει τα ορυχεία χρυσού, άλατος, αιματίτη, κασσίτερου, μόλυβδου, χαλκού, σιδήρου, ψευδαργύρου, φωσφόρου, μαγγανίου, βολφραμίου και αργύρου.

Αρχικά ξεκινώντας με τα αλατωρυχεία που αποτελούν μία μεγάλη υποκατηγορία, λόγω του χαμηλού φάσματος ραδιενέργειάς τους και άλλων γεωλογικών ιδιοτεροτήτων, προσφέρουν μια μοναδική δυνατότητα χρήσης για σπηλαιοθεραπεία. Η γνώση των επιπέδων συγκέντρωσης ραδονίου σε τέτοια υπόγεια περιβάλλοντα είναι απαραίτητη για θεραπευτικούς σκοπούς διαφορετικών αναπνευστικών και ρευματικών παθήσεων. Προκειμένου να αναπτυχθεί η σπηλαιοθεραπεία στη Ρουμανία, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τα επίπεδα συγκέντρωσης ραδονίου σε ορισμένα ορυχεία αλατιού στη Ρουμανία, τα αποτελέσματα των οποίων θα παρουσιαστούν παρακάτω. Γενικά, η Ρουμανία είναι μία από τις πλουσιότερες χώρες της Ευρώπης με φυσικά αποθέματα αλάτων, οι οποίες σχηματίζουν τεράστιους θόλους αλατιού, οι οποίοι φαίνεται να προέρχονται από υψηλή πίεση, που ωθεί το αλάτι στα πετρώματα από μεγάλα βάθη. Τέτοιοι θόλοι, που συναντώνται κυρίως στην περιοχή των Καρπαθίων λειτουργούν από την αρχαιότητα και τώρα φιλοξενούν πλήθος ενεργών καθώς και εκτός λειτουργίας μεταλλείων αλατιού, με τα τελευταία να αντιπροσωπεύουν την ιδανική τοποθεσία για εγκαταστάσεις θεραπείας.

Τα ορυχεία χρυσού, αργύρου, μόλυβδου και ψευδαργύρου αποτελούν μία εξίσου ενδιαφέρουσα κατηγορία. Αρκετά σημαντικό ρόλο παίζει η αξιολόγηση των κινδύνων της υγείας των εργαζομένων για τους υπόγειους μεταλλωρύχους των ορυχείων αυτών, από φυσική ακτινοβολία και το εάν είναι απαραίτητο να ληφθούν μέτρα για τη βελτίωση των συνθηκών εργασίας. Δεδομένου ότι μια τέτοια παρόμοια περιεκτική μελέτη δεν είχε γίνει στο παρελθόν, υλοποιήθηκε από ερευνητές στο Κόσοβο. Επίσης αντλήθηκαν συμπεράσματα από αυτή τη μελέτη που χρησιμεύουν ως αναφορά και «βάση» για τη διαχείριση των υπό μελέτη ορυχείων. Οι μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου και των θυγατρικών του έγιναν με σκοπό τον ακριβή υπολογισμό της δόσης που λαμβάνουν τα εισερχόμενα άτομα στα ορυχεία, καθώς επίσης και για την προστασία των τουριστών που τα επισκέπτονται.

Τέλος μέσα από τα ορυχεία σιδήρου, χαλκού, φωσφόρου, μαγγανίου, βολφραμίου, κασσίτερου και αιματίτη, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων και δόσεων ραδονίου για τη διερεύνηση των πιθανών συνεπειών στην υγεία λόγω έκθεσης στο ραδόνιο, για την ευρύτερη κοινότητα που σχετίζεται με την εξόρυξη και την επεξεργασία των μεταλλευμάτων αυτών. Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν και σε προσωπικό επίπεδο για κάθε εργαζόμενο ξεχωριστά, λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο που αφιερώθηκε σε κάθε θέση εργασίας.

3.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που συλλέχθηκαν από 35 διεθνείς δημοσιεύσεις. Οι συγκεντρώσεις ραδονίου που ακολουθούν στην προκειμένη περίπτωση, αφορούν πέρα από 7 ορυχεία άλατος, 12 ορυχεία χρυσού, 14 ορυχεία χαλκού, 5 ορυχεία σιδήρου, 7 ορυχεία μόλυβδου, 4 ορυχεία μαγγανίου, 5 ορυχεία ψευδαργύρου, 3 ορυχεία αργύρου, 1 ορυχείο αιματίτη, 2 ορυχεία βολφραμίου, 1 ορυχείο κασσίτερου και 2 ορυχεία φωσφόρου.

ΧΩΡΑ	ΠΛΗΘΟΣ ΟΡΥΧΕΙΩΝ	ΕΙΔΟΣ ΟΡΥΧΕΙΟΥ	ΧΑΜΗΛΟΤΕΡΗ Η ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bq/m ³)	ΥΨΗΛΟΤΕΡΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bq/m ³)	ΜΕΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ (Bq/m ³)
Ρουμανία	3	Αλατωρυχεία	¹⁴ 6.9	12	9.45
Αυστραλία	1	Βολφραμίου	60	390	140
Ρουμανία	1	Αλατωρυχείο	5	27	20
			Bushdown: 112,000	Bushdown: 7,100,000	Bushdown: 1,329,500

¹⁴ Οι μετρήσεις αυτές αφορούν το ορυχείο Turda (χωρίς εξαερισμό)

Αγγλία	2	Αιματίτη και κασσίτερου	Eylesbarrow: 25,793	Eylesbarrow: 570,000	Eylesbarrow: 278,721
Αγγλία	3	Μόλυβδου και χαλκού	¹⁵ 805	1695	1230
Αγγλία	1	Χαλκού και σιδήρου	8,709.8	10,027	9,526.3
Κόσοβο	1	Μόλυβδου και ψευδαργύρου	¹⁶ 54	691	286
Ουγγαρία	1	Μαγγανίου	360	1700	824
Αργεντινή	1	Χρυσωρυχείο	1800	6000	4800
Ουγγαρία	1	Μαγγανίου	¹⁷ 110	625	220
Δυτική Αφρική	7	Χρυσωρυχεία	14	270	98
Ιορδανία	8	Χαλκού	¹⁸ 540	737	629
Ρουμανία	1	Αλατωρυχείο	¹⁹ 58.2	116.4	96.5
Ουγγαρία	1	Μαγγανίου	575	997	817
Αίγυπτος	1	Χρυσωρυχείο	30	64,130	27,180
Κόσοβο	4	Χρυσού, αργύρου, μόλυβδου και ψευδαργύρου	60	748	370.85
Φιλανδία	1	Χαλκού και ψευδαργύρου	²⁰ –	–	21.9
Κίνα	2	Σιδήρου και χαλκού	Copper: 452 Iron: 183	Copper: 1930 Iron: 826	Copper: - Iron: -
Πακιστάν	1	Αλατωρυχείο	10	36	26
Νότια Αφρική	–	Απορρίμματα χρυσωρυχείου	32	1069	147
Ουγγαρία	1	Μαγγανίου	155	240	–
Ιράν	1	Χαλκού	13,400	23,000	18,275
Γιουγκοσλαβία	4	Μόλυβδου και ψευδαργύρου	20	3000	150-750
Αργεντινή	2	Βολφραμίου και χρυσού	Los Cóncores: 430 La Carolina: 1800	Los Cóncores: 1480 La Carolina: 6000	Los Cóncores: 600 La Carolina: 4800

¹⁵ Οι μετρήσεις αυτές αφορούν το ορυχείο Smallcleugh

¹⁶ Οι μετρήσεις αυτές αφορούν το έτος 2015

¹⁷ Οι μετρήσεις αυτές αφορούν τη Φάση 1

¹⁸ Οι μετρήσεις αυτές αφορούν το ορυχείο Wadi Dana

¹⁹ Οι μετρήσεις αυτές αφορούν την τοποθεσία Salt Lake (χωρίς εξαερισμό)

²⁰ Στα σημεία που υπάρχει το σύμβολο «-», δεν αναγράφονται τιμές στις αντίστοιχες δημοσιεύσεις

Κίνα	1	Σιδήρου	22.1	52.6	34.2
Αίγυπτος	1	Φωσφορίτη	1.37	2539.27	190.65
Συρία	1	Φωσφορίτη	230	1149	577
Αυστρία	6	Χαλκού, σιδήρου, άλατος και αργύρου	Salt: - Iron: 100 Silver: 500 Copper: -	Salt: - Iron: 5500 Silver: 8900 Copper: -	Salt: 1300 Iron: 3000 Silver: 4200 Copper: 4900

Πίνακας 3.4: Μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου

3.3.2 Ομαδοποίηση αποτελεσμάτων

Η ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων σε τρεις υποκατηγορίες, που ακολουθεί, γίνεται με σκοπό τη διευκόλυνση εξαγωγής συμπερασμάτων όσον αφορά στο θέμα της παρούσας διπλωματικής. Οι τρεις υποκατηγορίες που θα αναλυθούν στη συνέχεια είναι οι εξής:

- 1) ορυχεία άλατος
- 2) ορυχεία χρυσού, αργύρου, μόλυβδου και ψευδαργύρου
- 3) ορυχεία σιδήρου, χαλκού, φωσφόρου, μαγγανίου, βολφραμίου, κασσίτερου και αιματίτη

Στις παρακάτω υπό-ενότητες θα εξεταστούν και θα συζητηθούν τόσο οι συγκεντρώσεις ραδονίου στους διάφορους μεταλλευτικούς χώρους, όσο και οι δόσεις ραδονίου που δέχονται οι εργαζόμενοι καθώς και οι επισκέπτες των ορυχείων, για κάθε υπό-κατηγορία ορυχείων. Οι δόσεις (απορροφούμενη, ισοδύναμη και ενεργή) υπολογίζονταν στην εκάστοτε περίπτωση ορυχείου, έπειτα από τη θέσπιση πιο αυστηρών ορίων από οργανισμούς όπως τη CRP (Commission on Radiological Protection). Γενικά η μελέτη των δόσεων αποτελεί πολύ κομβικό κομμάτι δεδομένου ότι ακόμα και με σχετικά χαμηλά επίπεδα συγκέντρωσης ραδονίου στα ορυχεία, είναι σημαντικό οι εργαζόμενοι να τηρούν ορισμένες προφυλάξεις ασφαλείας κατά τη διάρκεια της εργασίας τους. Αυτό είναι σημαντικό επειδή δεν υπάρχει γνωστή συγκέντρωση κατώτατου ορίου κάτω από την οποία η έκθεση σε ραδόνιο δεν παρουσιάζει κίνδυνο. Ακόμη και οι χαμηλές συγκεντρώσεις ραδονίου μπορούν να οδηγήσουν σε μικρή αύξηση του κινδύνου καρκίνου του πνεύμονα.

3.3.2.1 Αλατωρυχεία

Λόγω της υψηλής ποιότητας του μικροκλίματος και του χαμηλού επιπέδου φυσικής ραδιενέργειας τους, τα ορυχεία και τα σπήλαια αλατιού είναι ευρέως αναγνωρισμένα για θεραπευτική χρήση σε

ορισμένες χώρες της Κεντρικής και Ανατολικής Ευρώπης (Αυστρία, Αζερμπαϊτζάν, Βουλγαρία, Γερμανία, Ουγγαρία, Πολωνία, Ρωσία, Ελβετία, Ουκρανία, Ρουμανία) στη θεραπεία ορισμένων αναπνευστικών, αλλεργικών και ρευματικών παθήσεων. Προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα ζωής, η Ρουμανία πρέπει ανέπτυξε αυτή τη μεγάλη δυναμική της σπηλαιοθεραπείας και της θεραπείας με ραδόνιο. Οι εναποθέσεις αλατιού, που συναντώνται κυρίως στην περιοχή των Καρπαθίων, λειτουργούν από την αρχαιότητα έως τώρα και τώρα φιλοξενούν πλήθος ενεργών καθώς και ανενεργών αλατορυχείων, με τα τελευταία να αντιπροσωπεύουν την ιδανική τοποθεσία για εγκαταστάσεις θεραπείας. Η σύγχρονη εξόρυξη άλατος συνδυάζει την εκμετάλλευση αλατιού με παράδοση δημιουργώντας τουριστικές διαδρομές, μουσεία και σανατόρια σε παλιά ανοίγματα εξόρυξης. Οι επιλεγμένοι τόποι δοκιμών «Turda», «Căcița» και «Ocna Dej» ανήκουν στα παλαιότερα και μεγαλύτερα ορυχεία αλατιού που βρέθηκαν στην επικράτεια της Ρουμανίας. Τα τρία αυτά ορυχεία βρίσκονται στο βόρειο κομμάτι της Ρουμανίας.

Το ορυχείο αλατιού «Turda», που ανήκει στη λεκάνη της Τρανσυλβανίας, είχε την πρώτη πιστοποίηση εξόρυξης αλατιού από το 1271. Το απόθεμα αλατιού από το «Turda» βρίσκεται στα βορειοανατολικά της πόλης, που βρίσκεται σε επιφάνεια 45 km², βάθος 1.200 m, περιεκτικότητα σε αλάτι περίπου 99% NaCl και με το απόθεμα να εκτιμάται σε περίπου 39 δισεκατομμύρια τόνους. Το ορυχείο αλατιού «Căcița» απέχει 18χλμ. από το Gura Humorului στην περιοχή Bucovina. Το ορυχείο αλατιού σκαμμένο χειροκίνητα, άνοιξε το 1791. Υπάρχουν 8.200 γκαλερί που σκάφτηκαν χειροκίνητα, ενισχυμένα με ξύλο και βρίσκονται σήμερα σε τέλεια κατάσταση. Τέλος, το ορυχείο αλατιού «Ocna Dej» βρίσκεται στο κέντρο της λεκάνης Transylvanian, κοντά στην πόλη Dej και 60 χλμ. από την αστική περιοχή Cluj-Napoca. Η πρώτη δήλωση σχετικά με την εκμετάλλευση του αλατιού «Ocna Dej» που χρονολογείται από τους ρωμαϊκούς χρόνους, μπορεί να παρατηρηθεί σήμερα με τη μορφή ανασκαφής που παραμένει φραγμένη.

Οι τρεις περιοχές ελέγχου που ερευνήθηκαν βρίσκονται σε λόφους χαμηλού υψομέτρου, 200-700 m, σε ηπειρωτικό κλίμα, με τις κύριες κλιματολογικές παραμέτρους λιγότερο έντονες από αυτές στα χωράφια και τις ορεινές περιοχές, με ένα ήπιο κλίμα. Ως συνέπεια των δραστηριοτήτων εξόρυξης αλατιού έχουν δημιουργηθεί τεράστιες κοιλότητες, οι οποίες από άποψη γεωμετρίας παρουσιάζουν τουριστικό αξιοθέατο. Λόγω της αποτελεσματικότητας της θεραπείας με αλατούχο διάλυμα, κυρίως σε αναπνευστικές ασθένειες, η σπηλαιοθεραπεία στη Ρουμανία βρίσκεται επί του παρόντος υπό συνεχή ανάπτυξη. Οι μέσες περιβαλλοντικές συνθήκες σε όλα τα επιλεγμένα ορυχεία αλατιού είναι παρόμοιες με τις τυπικές συνθήκες που επικρατούν στα ορυχεία αλατιού ανά τον κόσμο, που χρησιμοποιούνται για τη σπηλαιοθεραπεία. Σε μεγαλύτερα βάθη η πίεση του αέρα είναι επίσης σημαντικά υψηλότερη από του εδάφους που έχει αποδειχθεί ότι ωφελεί τους πάσχοντες από αναπνευστικές ασθένειες. Άλλοι παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των γεωλογικών και

υδρολογικών χαρακτηριστικών, και της σεισμικότητας, ποικίλλουν από περιοχή σε περιοχή και σε κάθε ορυχείο αλατιού. Αυτές οι εγκαταστάσεις ιατρικής θεραπείας χρησιμοποιούνται ειδικά για πνευμονικές και ρευματικές ασθένειες και για επαγγελματίες αθλητές.

Όσον αφορά στις μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου στα τρία ορυχεία, αυτές πραγματοποιήθηκαν από το 2009 έως το 2011 με και χωρίς ενεργό εξαερισμό. Στο ορυχείο άλατος «**Turda**», οι συγκεντρώσεις ραδονίου είχαν χρονικές και χωρικές διακυμάνσεις, ενώ οι χαμηλότερες μέσες συγκεντρώσεις ραδονίου καταγράφηκαν με εύρος από 6.9 ± 0.39 έως 12.0 ± 0.75 Bq / m³. Ο μέσος ρυθμός δόσης της ακτινοβολίας σε διαφορετικές θέσεις βάθους (h= 35–120 m) στις κοιλάτες άλατος του ορυχείου «Turda», είναι πολύ χαμηλός με τιμή $2 \text{ nSv} / \text{h} \pm 6\%$, ενώ στο σημείο πρόσβασης μέσα στο ορυχείο, είναι πάνω από δέκα φορές υψηλότερη, με τιμή $137 \pm 5.34 \text{ nSv} / \text{h}$. Αυτές οι χαμηλές τιμές μέσης συγκέντρωσης ραδονίου δείχνουν ότι στο εσωτερικό του ορυχείου αυτού, υπάρχει ένας μικρός ρυθμός παραγωγής ραδονίου από τα τοιχία του ορυχείου άλατος και τις κατάλληλες κλιματολογικές συνθήκες (θερμοκρασία, πίεση, υγρασία και κυκλοφορία ροής αέρα) με καθαρή ατμόσφαιρα, που συνιστώνται ιδιαίτερα για τη χρήση της σπηλαιοθεραπείας.

Οι μέσες συγκεντρώσεις ραδονίου εμφανίζουν σημαντικές χρονικές και χωρικές διακυμάνσεις και στο ορυχείο άλατος «**Cacica**», από 58.2 ± 3.73 έως 116.4 ± 4.17 Bq/m³ με μέση συγκέντρωση ραδονίου 96.5 ± 4.76 Bq/m³. Στο εξωτερικό περιβάλλον, στο σημείο πρόσβασης στο ορυχείο αλατιού, το ραδόνιο αραιώνεται στην ατμόσφαιρα και η μέση συγκέντρωσή του μειώνεται στα 20.5 ± 1.30 Bq/m³. Σε γενικές γραμμές με ή χωρίς εξαερισμό, τα επίπεδα ραδονίου στο ορυχείο αλατιού «Cacica» είναι υψηλότερα από τα επίπεδα ατμόσφαιρας ραδονίου που ανέφερε η UNSCEAR (2006) για τη Ρουμανία. Ο ρυθμός δόσης βρέθηκε να είναι $16 \pm 0.03 \text{ nSv/h}$, ενώ του εξωτερικού περιβάλλοντος του ορυχείου αλατιού, ο ρυθμός δόσης ήταν $127 \pm 0.07 \text{ nSv/h}$. Τα αποτελέσματά μας δείχνουν ότι οι μέσες συγκεντρώσεις ραδονίου στο ορυχείο «Cacica» έχουν περίπου σταθερές τιμές σε όλες τις περιοχές που μελετήθηκαν, ενώ μικρές παραλλαγές αποδίδονται στις φυσικές διεργασίες εκροής-διαφυγής και τις συνθήκες μικροκλίματος στις κοιλάτες των ορυχείων άλατος.

Οι μέσες συγκεντρώσεις ραδονίου εμφανίζουν μικρές χρονικές διακυμάνσεις στο ορυχείο «**Ocna Dej**» από 12.6 ± 0.79 έως 24.1 ± 3.95 Bq/m³ με μέση τιμή 18.4 ± 2.37 Bq/m³ χωρίς εξαερισμό, και 9.8 ± 1.13 έως 18.2 ± 1.84 Bq/m³ με εξαερισμό. Στο εξωτερικό περιβάλλον, στο σημείο πρόσβασης στο ορυχείο αλατιού, η μέση συγκέντρωση ραδονίου αυξάνεται σε 31.7 ± 2.76 Bq/m³. Έτσι, χρησιμοποιώντας τα συστήματα εξαερισμού σε κοιλάτες ορυχείων αλατιού, οι μέσες εσωτερικές συγκεντρώσεις ραδονίου μπορούν να μειωθούν. Στην περίπτωση του ορυχείου αλατιού «Ocna Dej», όπου έχουν καταγραφεί επίσης χαμηλές τιμές εσωτερικής μέσης συγκέντρωσης ραδονίου, όπως στο ορυχείο αλατιού Turda, ο ισοδύναμος ρυθμός δόσης είναι $3.14 \pm 0.27 \text{ nSv/h}$ ενώ ο εξωτερικός ρυθμός

φτάνει έως 78.28 ± 2.82 nSv/h. Οι τιμές των μέσων συγκεντρώσεων ραδονίου που βρέθηκαν στο ορυχείο «Ocna Dej» είναι πολύ χαμηλότερες από το καθορισμένο όριο των 148 Bq/m^3 από τους αρμόδιους για τη δημόσια προστασία οργανισμούς, οι οποίοι θεωρούν επικίνδυνες τιμές που υπερβαίνουν αυτό το όριο λόγω του κινδύνου καρκίνου του πνεύμονα. Τέτοιες χαμηλές συγκεντρώσεις ραδονίου εσωτερικού χώρου στο αλατωρυχείο, μπορεί να έχουν ευεργετικά αποτελέσματα στην ανθρώπινη υγεία.

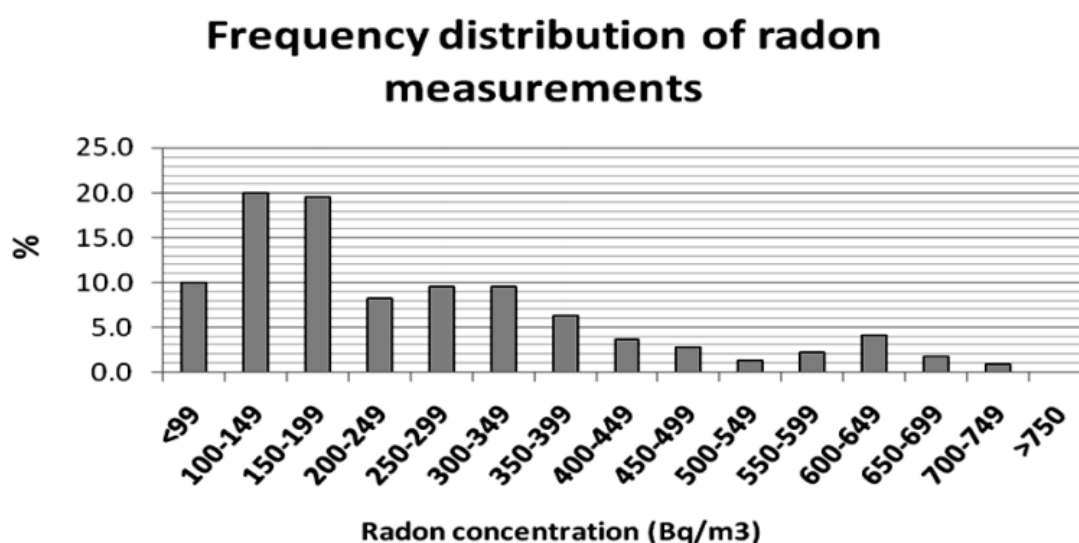
Μέσω σύγκρισης εντός ή εκτός του αλατωρυχείου Turda, με ή χωρίς εξαερισμό, οι τιμές των μέσων συγκεντρώσεων ραδονίου είναι χαμηλότερες από αυτές που μετρήθηκαν στα δύο άλλα ορυχεία αλατιού που διερευνήθηκαν στη Ρουμανία (Ocna Dej: $12.6 \pm 0.79 \text{ Bq/m}^3$ ή Cacica: $96.5 \pm 4.76 \text{ Bq/m}^3$ ή σε αυτά που αναφέρονται από την επιστημονική βιβλιογραφία). Από τις μέσες συγκεντρώσεις ραδονίου που βρέθηκαν, ήταν δυνατόν να γίνει μια πρώτη εκτίμηση της ενεργούς δόσης, λόγω εισπνοής ραδονίου από τους επισκέπτες των ορυχείων άλατος. Για να ποσοτικοποιηθεί η δόση, κρίθηκε απαραίτητο να εκτιμηθεί ο χρόνος που αφιερώνεται στα ορυχεία από τις διάφορες ομάδες κινδύνου. Τέλος, παρόλο που φαίνεται ότι η συγκέντρωση ραδονίου στα αλατωρυχεία μειώνεται με την αύξηση του βάθους και της απόστασης από την είσοδο των ορυχείων, δεν φάνηκε να υπάρχει μια απλή μαθηματική σχέση που να συνδέει τις μεταβλητές αυτές.

3.3.2.2 Ορυχεία χρυσού, αργύρου, μόλυβδου και ψευδαργύρου

Σε αυτήν την υπό-κατηγορία παρατίθενται τα αποτελέσματα μέτρησης της συγκέντρωσης ραδονίου τεσσάρων υπόγειων ορυχείων: «Stanterg», «Artana», «Hajvali» και «Badonc», τα οποία βρίσκονται στο Κοσσυφοπέδιο. Τα ορυχεία βρίσκονται στον ίδιο γεωλογικό σχηματισμό και από αυτά εξορύσσονται μεταλλεύματα πλούσια με μόλυβδο, ψευδάργυρο, ασήμι και χρυσό. Προσδιορίστηκε η έκθεση στην ακτινοβολία που προκλήθηκε από τα θυγατρικά του ραδονίου καθώς και το ίδιο το ραδόνιο, και επίσης μετρήσεις της δόσης γάμμα πραγματοποιήθηκαν την ίδια στιγμή. Η συγκέντρωση αερίου ραδονίου για τα υπόγεια ορυχεία υπό μελέτη κυμαινόταν από την ελάχιστη τιμή των 60 Bq/m^3 , έως τη μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή των 748 Bq/m^3 . Η μέση συγκέντρωση ραδονίου για τα ορυχεία «Stanterg», «Artana», «Hajvali» και «Badonc» ήταν 301.6, 191.4, 463.2 και 527.2 Bq/m^3 , αντίστοιχα. Ο μέσος όρος των συνολικών ετήσιων ενεργών δόσεων από τη συγκέντρωση ραδονίου και των θυγατρικών του, για μεταλλωρύχους στις υπό μελέτη περιοχές, είναι 2.67 mSv και μόνο από την έκθεση σε ακτίνες γάμμα είναι 0.26 mSv. Η πλειονότητα των μετρήσεων ραδονίου πραγματοποιήθηκε κάτω από συνθήκες εξόρυξης, δηλαδή υπόγεια, με υψηλές θερμοκρασίες, με σκόνη, υψηλή υγρασία και σκοτάδι. Τέλος οι μετρήσεις έγιναν στους χώρους εργασίας, οι οποίες στις

περισσότερες περιπτώσεις ήταν στο τέλος των καναλιών, κοντά στο εξορυχθέν μέταλλευμα. Στις τοποθεσίες που δεν είχαν εκμεταλλευτεί ως προς το μέταλλεμά τους, λόγω ασφάλειας, δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της συγκέντρωσης ραδονίου και του ρυθμού δόσης των ορυχείων, η υψηλότερη τιμή συγκέντρωσης ραδονίου που βρέθηκε ήταν στο «Badonc» με τιμή 526 Bq m^{-3} και η δεύτερη ήταν στο «Hajvali» με τιμή 463 Bq m^{-3} . Το ποσοστό κατανομής συχνότητας για τη συγκέντρωση ραδονίου παρουσιάζεται στην παρακάτω Εικόνα 3.9, με μόνο το έντεκα τοις εκατό όλων των μετρημένων τιμών να είναι υψηλότερο από 500 Bq m^{-3} .



Εικόνα 3.9: Συσχέτιση συγκέντρωσης ραδονίου με τη συχνότητα κατανομής της (%), (G. Hodolli, S. Bekteshi, S. Kadiri, B. Xhafa, K. Dollani, 2015)

Οι μετρήσεις έδειξαν ότι η συγκέντρωση ραδονίου σε όλα τα σημεία μέτρησης ήταν κάτω από το επίπεδο δράσης των 1000 Bq m^{-3} για χώρους εργασίας που καθορίζονται από τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας. Αυτή η τιμή βρίσκεται στα μέσα της περιοχής $500\text{-}1500 \text{ Bq m}^{-3}$ που συνιστά η Διεθνής Επιτροπή Προστασίας της Ακτινοβολίας (ICRP - 65). Η ετήσια ενεργή δόση υπολογίστηκε σύμφωνα με την έκθεση του UNSCEAR 2000. Η συνολική ετήσια ενεργή δόση του ραδονίου και των θυγατρικών του για κάθε ένα από τα προαναφερθέντα ορυχεία, παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα 3.5. Τα γεωλογικά στρώματα των τεσσάρων ορυχείων υπό μελέτη ήταν περίπου τα ίδια, αλλά η υψηλότερη έκθεση από το ραδόνιο και τα θυγατρικά του υπήρχε στα υπόγεια ορυχεία «Hajvali» και «Badonc» σε σχέση με τα άλλα, επειδή σε αυτά τα ορυχεία τα συστήματα εξαερισμού δεν λειτουργούσαν. Έτσι προκλήθηκε αύξηση της συγκέντρωσης ραδονίου και των θυγατρικών του.

ΟΝΟΜΑ ΟΡΥΧΕΙΟΥ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΤΗΣΙΑ ΕΝΕΡΓΗ ΔΟΣΗ (mSv)
Stanterg	2.461
Artana	1.619
Hajvali	3.602
Badovc	4.054
Μέση τιμή	2.934

Πίνακας 3.5: Συνολική ετήσια ενεργή δόση ανά ορυχείο (G. Hodolli, S. Bekteshi, S. Kadiri, B. Xhafa, K. Dollani, 2015)

Από τα ληφθέντα αποτελέσματα εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι ετήσιες ενεργές δόσεις είναι χαμηλές λόγω των φυσικών και τεχνητών συστημάτων αερισμού. Τέλος, αποδεικνύεται ότι η συγκέντρωση ραδονίου και των θυγατρικών του στα ορυχεία που εξετάστηκαν, ήταν γενικά ασφαλή όσον αφορά τον κίνδυνο για την υγεία.

Μία ακόμα εξίσου σημαντική έρευνα διεξάχθηκε στα χρυσωρυχεία «Hamash» στην Αίγυπτο. Οι μέσες τιμές των συγκεντρώσεων ραδονίου, οι ρυθμοί διαφυγής, οι ετήσιες ενεργές δόσεις και τα επίπεδα εργασίας (WL) ήταν $27.18 \pm 0.13 \text{ kBq m}^{-3}$, $3.27 \pm 0.03 \text{ Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, $686.27 \pm 5.15 \text{ mSv y}^{-1}$ και 2.94 ± 0.02 αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συγκεντρώσεις ραδονίου σε όλα τα δείγματα ήταν υψηλότερες από το συνιστώμενο παγκόσμιο όριο που δίνουν οι Ε και ΙΑΕΑ.

Είκοσι δείγματα συλλέχθηκαν από τις περιοχές ορυχείων χρυσού «Hamash». Χρησιμοποιήθηκε η τεχνική «κλειστού δοχείου» (closed can) για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων ραδονίου C_{Rn} , των ρυθμών εκπνοής (E_A), των ετήσιων ενεργών δόσεων (H_E) και των «επιπέδων εργασίας» (WL), χρησιμοποιώντας ανιχνευτές CR-39. Οι συγκεντρώσεις ραδονίου C_{Rn} υπολογίστηκαν σε kBq m^{-3} από τον τύπο:

$$C_{Rn} = \frac{\rho}{\eta T} \quad (8)$$

όπου ρ η πυκνότητα τροχιάς (track cm^{-2}), η είναι ο συντελεστής βαθμονόμησης του ανιχνευτή CR-39 και ο T είναι ο χρόνος έκθεσης σε ημέρες. Ο ρυθμός διαφυγής E_A υπολογίστηκε από τον τύπο:

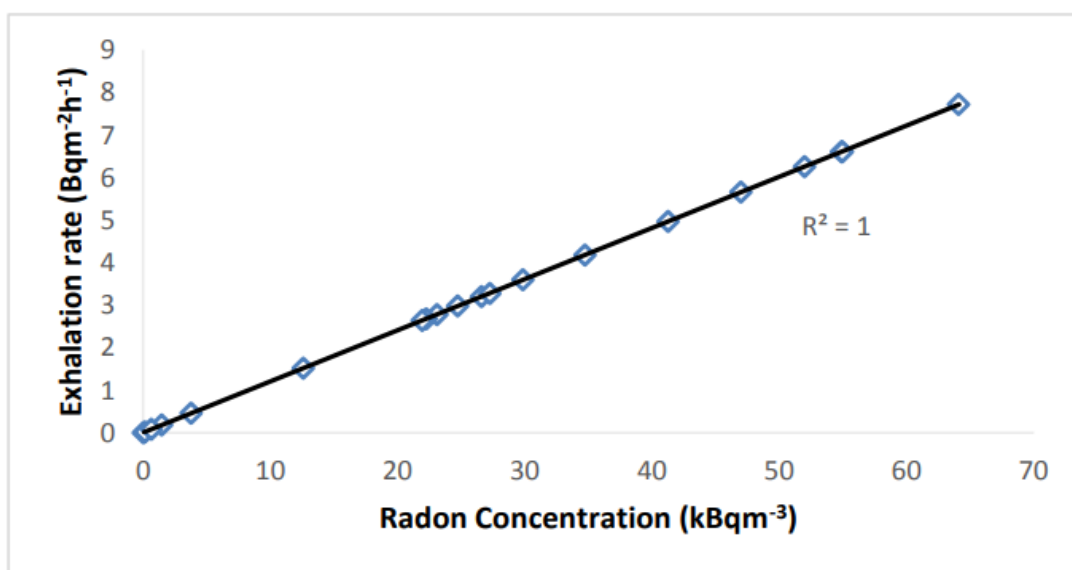
$$E_A = \frac{CV\lambda}{A \left[T + \frac{1}{\lambda} (e^{-\lambda T} - 1) \right]} \quad (9)$$

όπου λ η σταθερά διάσπασης ραδονίου (h^{-1}), C η συγκέντρωση ραδονίου ($\text{Bq m}^{-3} \text{ h}$), V ο όγκος του δοχείου (m^3), A η περιοχή διατομής (m^2) και T ο χρόνος ακτινοβολίας. Τέλος η ετήσια ενεργός δόση H_E υπολογίστηκε σε mSv y^{-1} από τον τύπο:

$$H_E = C_{Rn} F H D T \quad (10)$$

όπου $F = 0.4$ ο συντελεστής ισορροπίας μεταξύ ραδονίου και των θυγατρικών του, H είναι ο συντελεστής εσωτερικής πληρότητας (0.8), D είναι ο συντελεστής μετατροπής δόσης ($9 \times 10^{-6} \text{ mSv h}^{-1} \text{ Bq m}^{-3}$) και T είναι ο χρόνος έκθεσης ίσος με 7000 h y^{-1} .

Οι υψηλές τιμές C_{Rn} που βρέθηκαν σε πολλές από τις τοποθεσίες του ορυχείου, οφείλονταν στην αύξηση του ^{238}U . Αξίζει επίσης να σημειωθεί η σχέση μεταξύ συγκέντρωσης ραδονίου C_{Rn} (kBq m^{-3}) και ρυθμού διαφυγής E_A ($\text{Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), όπως φαίνεται και στην παρακάτω Εικόνα 3.10.



Εικόνα 3.10: Συσχέτιση συγκέντρωσης ραδονίου με το ρυθμό διαφυγής, (Saleh et. al, 2019)

Υπάρχει μια καλή συσχέτιση μεταξύ C_{Rn} και E_A . Η σχέση είναι γραμμική επειδή ο υπολογισμός E_A εξαρτάται από το C_{Rn} . Το E_A είναι σημαντικό, για να γίνει κατανοητή η σχετική συνεισφορά του υλικού στο συνολικό C_{Rn} που βρίσκεται στα δείγματα και είναι χρήσιμο και για να γνωρίζουμε τον κίνδυνο που μπορεί να επιφέρει το ραδόνιο στην υγεία.

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι συγκεντρώσεις ραδονίου όλων των δειγμάτων ήταν υψηλότερες από το επιτρεπόμενο συνιστώμενο παγκόσμιο όριο. Ήταν γενικά υψηλότερα από το επίπεδο αναφοράς ($0.50\text{-}1.50 \text{ kBq m}^{-3}$) που συνιστάται στους χώρους εργασίας. Για τους παραπάνω λόγους, προτάθηκαν ισχυρά μέτρα ασφάλειας για την προστασία των εργαζομένων στο ορυχείο χρυσού «Hamash» και τις γύρω περιοχές.

3.3.2.3 Ορυχεία σιδήρου, χαλκού, φωσφόρου, μαγγανίου, βολφραμίου, κασσίτερου και αιματίτη

Μία μελέτη σχετικά με τα επίπεδα αερίου ραδονίου στην ατμόσφαιρα σε εγκαταλελειμμένα ορυχεία που εκμεταλλεύτηκαν κυρίως για χαλκό, σίδηρο και κασσίτερο, πραγματοποιήθηκε στη Νοτιοδυτική Αγγλία του Ηνωμένου Βασιλείου και σε σύγκριση με τα επίπεδα σε ένα παλιό ορυχείο μόλυβδου στη βόρεια Αγγλία του Ηνωμένου Βασιλείου. Είχαν πραγματοποιηθεί μετρήσεις ραδονίου, από το 1992 στα νοτιοδυτικά, στον αέρα χρησιμοποιώντας μια ποικιλία τεχνικών μέτρησης. Ακόμα και εκτός αυτών των ορυχείων, στις εισόδους των στοών, καταγράφηκαν πολύ υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικού ραδονίου, για παράδειγμα, $200.000 \text{ Bq m}^{-3}$. Η περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα του νερού που έρρεε από αυτά τα ορυχεία σε συνδυασμό με την περιεκτικότητα σε διαλυμένο ραδόνιο, είχε επίσης μετρηθεί και εκτιμηθεί ως προς τις πιθανές επιπτώσεις στην υγεία. Ένας συνδυασμός ρύπανσης από βαρέα μέταλλα και ακτινοβολίας μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην υγεία και αρκετές έρευνες συνιστούσαν τη διεξαγωγή περαιτέρω μελέτες σε τέτοια περιβάλλοντα.

Το ορυχείο «Kings Wood» βρίσκεται 2,5 χλμ. δυτικά του Buckfastleigh, South Devon, στη νοτιοανατολική πλευρά του Dartmoor. Αυτό το ορυχείο εκμεταλλευόταν χαλκό (Harris 1992), αλλά περιείχε επίσης αργιλώδη γαληνίτη, σφαλερίτη, κοβάλτιο, νικέλιο, φθοριούχο άλας και βαρύτες (Darnley et al. 1965; Beer and Scrivener 1982; Harris 1992). Η ορυκτή φλέβα σε αυτό το ορυχείο βρισκόταν σε σχιστόλιθο «Devonian» και πιθανότατα προήλθε από υδροθερμικές εκπομπές από τον γρανίτη σύμφωνα με τους Beer and Scrivener (1982). Τα επίπεδα αερίου ραδονίου μετρήθηκαν κατά τους μήνες Ιανουαρίου έως το Δεκεμβρίου του 1992 έως το 1994 και τον Ιούλιο του 2000 για συγκριτικούς σκοπούς, χρησιμοποιώντας μια ποικιλία μεθόδων μέτρησης. Χρησιμοποιήθηκαν κυρίως παθητικοί ανιχνευτές «alpha track etch».

Οι τιμές συγκέντρωσης ραδονίου, κυμαίνονταν από 8,709.8 έως $10,027 \text{ Bq m}^{-3}$. Η ποσότητα του διαλυμένου ραδονίου στο νερό του ορυχείου ήταν επίσης σημαντική, δεδομένου ότι μπορούσε να ενέχει πραγματικό κίνδυνο για την υγεία, εάν προσληφθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Τα επίπεδα διαλυμένου ραδονίου στο νερό, βρέθηκαν γύρω στα $10,000 \text{ Bq/L}$. Η διεξαγωγή της έρευνας είχε σκοπό να κρίνει το ορυχείο "κατάλληλο ή μη" για επισκέψεις, ωστόσο τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα υψηλά επίπεδα ραδονίου μπορούν να αποτελέσουν απειλή για την υγεία των επισκεπτών.

Μία ακόμα έρευνα πραγματοποιήθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο και συγκεκριμένα σε δύο ορυχεία στο Ντέβον. Όσον αφορά στο ορυχείο «Bushdown», η φλέβα του μεταλλεύματος έφερε κασσίτερο και χαρακτηριζόταν από άφθονο αιματίτη, και λίγο πυρίτη. Τα θειούχα ορυκτά γενικά απουσίαζαν, ενώ τα στείρα ορυκτά ήταν ο χαλαζίας και ο τουρμαλίνης. Η περιεκτικότητα σε κασσίτερο ήταν γενικά χαμηλή και η συνολική παραγωγή στην περιοχή δεν ήταν μεγάλη. Επιπλέον, το ορυχείο

«Eylesbarrow», δραστηριοποιήθηκε κατά το πρώτο μισό του 19ου αιώνα και στα πρώτα χρόνια λειτουργείας του, αποτελούσε ένα από τα πιο ευημερεύοντα μεταλλεία κασσίτερου.

Τα επίπεδα ραδονίου στα εγκαταλελειμμένα ορυχεία «Bushdown» και «Eylesbarrow», στο Ηνωμένο Βασίλειο, μετρήθηκαν και αναλύθηκαν. Είχαν σημειωθεί εξαιρετικά υψηλά επίπεδα, με τα 7.100.000 Bqm⁻³ να είναι το υψηλότερο επίπεδο που καταγράφηκε. Αυτό είναι περίπου 89 φορές υψηλότερο από το υψηλότερο δημοσιευμένο επίπεδο ραδονίου για σπήλαια και ορυχεία στο Ντέβον και την Κορνουάλη της Αγγλίας, που είναι 80.000 Bqm⁻³. Αυτά τα επίπεδα έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία τόσο για περιστασιακούς όσο και για επαγγελματίες εξερευνητές ορυχείων.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η μελέτη έδειξε σαφώς ότι υπάρχουν πολύ υψηλά επίπεδα ραδονίου σε εγκαταλελειμμένα μεταλλεία κασσίτερου στο Ντεβόν του Ηνωμένου Βασιλείου. Πράγματι, τα επίπεδα που καταγράφηκαν ήταν σημαντικά υψηλότερα από αυτά που είχαν δημοσιευτεί στη βιβλιογραφία στο Ηνωμένο Βασίλειο. Αυτή η εργασία έδειξε επίσης ότι ακόμη και έξω από τις εισόδους σε ορισμένα ορυχεία («Bushdown») υπάρχουν υψηλά επίπεδα ραδονίου. Επιπλέον ένα από τα βασικά συμπεράσματα ήταν ότι σημαντική έκθεση στο ραδόνιο μπορεί να σχετίζεται με τα ορυχεία αυτής της μελέτης. Ο κίνδυνος μπορεί να μειωθεί εάν οι εξερευνητές των ορυχείων λάβουν την προφύλαξη να περιορίσουν αυστηρά τον αριθμό και τη διάρκεια των επισκέψεων που πραγματοποιούν κάθε χρόνο σε ορυχεία με χαμηλότερα επίπεδα ραδονίου. Σε επίπεδα άνω των 100,000 Bqm⁻³ ακόμη και πολύ μικρές εκθέσεις οδηγούν σε υψηλή δόση.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί μία έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην Κίνα σε δυο ορυχεία χαλκού και σιδήρου. Για πιο ακριβείς εκτιμήσεις της επαγγελματικής έκθεσης στο ραδόνιο για τους μεταλλωρύχους, η ατομική παρακολούθηση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας βελτιωμένα παθητικά συστήματα παρακολούθησης ²²²Rn. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ατομική έκθεση στο ραδόνιο διέφερε σημαντικά ανάλογα με τους τύπους ορυχείων και την εργασία που πραγματοποιούνταν. Σε σύγκριση με την έκθεση σε ανθρακωρύχους, η έκθεση σε εργαζόμενους στα χαλκωρυχεία ήταν πολύ υψηλότερη. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ατομική παρακολούθηση του ραδονίου ήταν απαραίτητη για την ακριβή αξιολόγηση της έκθεσης ραδονίου σε μεταλλωρύχους και ότι η έκθεση σε ραδόνιο σε μεταλλωρύχους μη ουρανιούχων ορυχείων πρέπει επίσης να αξιολογείται από την άποψη της προστασίας από την ακτινοβολία. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας ήταν τόσο σε περιβαλλοντικό όσο και σε προσωπικό επίπεδο. Σκοπός της εργασίας ήταν μέσω και των δύο τύπων μετρήσεων, να συλλεχθούν πιο ακριβή αποτελέσματα όσον αφορά την έκθεση στο ραδόνιο που υφίστανται οι εργαζόμενοι των ορυχείων.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ένα ορυχείο χαλκού και ένα ορυχείο σιδήρου από το 2012 έως το 2013 σε 4 διαδοχικές περιόδους. Σε κάθε ορυχείο, τοποθετήθηκαν ομοιόμορφα 10 σετ

συστημάτων παρακολούθησης. Για προσωπική παρακολούθηση, συνολικά 120 συσκευές ανίχνευσης ραδονίου διανεμήθηκαν στους μεταλλωρύχους συμπεριλαμβανομένων των εργαζομένων στο κομμάτι της εξόρυξης, των οδηγών και των επιθεωρητών ασφάλειας.

Season	M/D worker	Driver	Safety inspector
Spring	223–760	106–329	23–75
Summer	415–1730	203–570	36–108
Autumn	206–812	121–384	25–68
Winter	171–646	79–205	17–49
Annual	1259–3420	540–1307	124–273

Εικόνα 3.11: Έκθεση στο ραδόνιο (σε kBq m⁻³ h) ανά εποχή και ετησίως για διάφορες θέσεις εργασίας στο ορυχείο χαλκού (Fan et al., 2016)

Season	M/D worker	Driver	Safety inspector
Spring	114–403	56–173	18–71
Summer	178–657	96–281	28–103
Autumn	121–420	61–169	22–78
Winter	83–214	49–152	15–53
Annual	541–1496	302–675	94–287

Εικόνα 3.12: Έκθεση στο ραδόνιο (σε kBq m⁻³ h) ανά εποχή και ετησίως για διάφορες θέσεις εργασίας στο ορυχείο σιδήρου, (Fan, Zhuo and Zhang , 2016)

Όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες, είναι σαφές ότι η έκθεση ²²²Rn στους μεταλλωρύχους διαφέρει από το ένα ορυχείο στο άλλο. Οι υψηλότερες εκθέσεις παρατηρήθηκαν στο χαλκωρυχείο και οι χαμηλότερες βρέθηκαν στο ορυχείο σιδήρου. Επιπλέον, η έκθεση ²²²Rn στους μεταλλωρύχους διέφερε ανάλογα με τον τύπο εργασίας τους, παρόλο που αφορούσε το ίδιο ορυχείο. Η υψηλότερη έκθεση παρατηρήθηκε για τους εργαζόμενους στα ορυχεία, και συγκεκριμένα στον τομέα της εξόρυξης και η χαμηλότερη για τους επιθεωρητές ασφαλείας. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στους διαφορετικούς χρόνους εργασίας στο υπόγειο ορυχείο. Εκτός αυτού, αναμενόταν ότι οι συγκεντρώσεις ²²²Rn στους χώρους εξόρυξης θα ήταν γενικά υψηλότερες από αυτές στις περιοχές των επιθεωρητών. Τέλος εμφανείς ήταν και οι εποχιακές διακυμάνσεις τόσο στις συγκεντρώσεις όσο και στην έκθεση του ραδονίου. Συγκεκριμένα οι τιμές ήταν υψηλότερες το καλοκαίρι και χαμηλότερες το χειμώνα. Το καλοκαίρι, η υψηλότερη θερμοκρασία αυξάνει τη

διαφυγή ^{222}Rn από τα πετρώματα και η χαμηλότερη πίεση του αέρα προκαλεί τη συσσώρευση του αερίου ^{222}Rn πιο εύκολα, εξηγώντας έτσι τις υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδονίου κατά τους καλοκαιρινούς μήνες στους υπόγειους μεταλλευτικούς χώρους.

3.3.3 Σχολιασμός

Αρχικά όσον αφορά στην ενότητα των αλατωρυχείων, δεδομένου ότι οι μέσες συγκεντρώσεις ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους και στα τρία ορυχεία αλατιού που διερευνήθηκαν, είναι πολύ μικρότερες συγκριτικά με άλλα μεταλλεία γρανίτη ή ουρανίου, αυτά τα περιβάλλοντα ήταν αποδεκτό να χρησιμοποιηθούν για σκοπούς σπηλαιοθεραπείας στη Ρουμανία. Η θερμοκρασία του αέρα είναι μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους μικροκλίματος στο περιβάλλον των ορυχείων αλατιού, η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη διεξαγωγή μιας έρευνας για τις συγκεντρώσεις ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους, επειδή η θερμοκρασία καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τα ποσοστά εξαερισμού σε στενούς χώρους και οι συνθήκες εξαερισμού είναι γνωστό ότι έχουν σημαντικές επιπτώσεις στις συγκεντρώσεις ραδονίου.

Προχωρώντας στα ορυχεία χρυσού, αργύρου, μόλυβδου και ψευδαργύρου, η τιμή του ορίου της ετήσιας ενεργής δόσης για τον εκάστοτε εργαζόμενο ορυχείου, πρέπει να ελέγχεται αυστηρά, και να μην υπερβαίνει το όριο της ενεργής δόσης, το οποίο καθορίζεται 20 mSv ανά έτος, με μέσο όρο για 6 συνεχόμενα έτη. Τα δεδομένα που λήφθηκαν έδειξαν ότι κανένα από τα ορυχεία της συγκεκριμένης έρευνας δεν είχε υπερβεί αυτό το όριο. Από τα ληφθέντα αποτελέσματα συνάγεται το συμπέρασμα ότι οι ετήσιες ενεργές δόσεις ήταν χαμηλές, λόγω των φυσικών και τεχνητών συστημάτων αερισμού.

Τέλος, στα ορυχεία σιδήρου, χαλκού, φωσφόρου, μαγγανίου, βολφραμίου, κασσίτερου και αιματίτη, η έκθεση στο ραδόνιο στους μεταλλωρύχους εξαρτάται από τους τύπους των ορυχείων, τους τύπους εργασίας, τις εποχές και τα άτομα. Ως εκ τούτου, για μια ακριβή αξιολόγηση της έκθεσης ραδονίου σε μεταλλωρύχους, είναι επιθυμητή μια μακροπρόθεσμη ατομική παρακολούθηση της έκθεσης ^{222}Rn χρησιμοποιώντας παθητική μέθοδο. Η ατομική παρακολούθηση ραδονίου προτάθηκε ως μια εργασία ρουτίνας από την άποψη της προστασίας από την ακτινοβολία. Για ακριβέστερες εκτιμήσεις της έκθεσης στο ραδόνιο σε μεταλλωρύχους, πρέπει να μελετηθεί περαιτέρω η αποτελεσματικότητα των μασκών ή άλλων μέτρων αναπνευστικής προστασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

4.1 Ορυχεία ουρανίου

Υπάρχουν πολλές μελέτες σχετικά με την απελευθέρωση ραδονίου από ορυχεία ουρανίου, αλλά οι διαφορές των αποτελεσμάτων των μετρήσεων της συγκέντρωσης ραδονίου είναι πολύ μεγάλες. Στο πλαίσιο της καρκινογενούς επίδρασης του ραδονίου στον ανθρώπινο οργανισμό, αλλά και της ανάγκης για έλεγχο και παρακολούθησή του, πραγματοποιήθηκαν έρευνες με κύριο στόχο των περισσότερων εργασιών, να χαρακτηριστεί το επίπεδο συγκέντρωσης ^{222}Rn που καταγράφηκε σε επιλεγμένες θέσεις εργασιών και κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Τέλος, βασικό κομμάτι για τη συγκεκριμένη διπλωματική αποτέλεσε η μελέτη των χαμηλότερων και υψηλότερων συγκεντρώσεων ραδονίου, καθώς και των μέσων.

Στην παρούσα διπλωματική έγινε επεξεργασία 26 δημοσιεύσεων διεθνούς βιβλιογραφίας πάνω στα ορυχεία ουρανίου. Πέρα από 30 ορυχεία ουρανίου, μελετήθηκε (όπως προαναφέρθηκε) μία περίπτωση αποθέσεων ουρανίου και μία περίπτωση μιας μάντρας απόθεσης αποβλήτων από ένα ορυχείο ουρανίου. Όπως φαίνεται και από τον [Πίνακα 3.1](#), οι συγκεντρώσεις στα 30 αυτά ορυχεία κυμαίνονται από μερικές δεκάδες έως μερικά εκατομμύρια Bq/m^3 . Με τη μικρότερη συγκέντρωση στα 8 Bq/m^3 και τη μεγαλύτερη στα $3,932,920 \text{ Bq/m}^3$, παρατηρείται ότι το εύρος των συγκεντρώσεων ραδονίου στα διάφορα ορυχεία ουρανίου είναι μεγάλο.

Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης συγκέντρωσης ραδονίου στο ίδιο ορυχείο, εμφανίστηκε στο ορυχείο «South Terras» της Αγγλίας, με τη χαμηλότερη συγκέντρωση στα $41,667 \text{ Bq/m}^3$ και την υψηλότερη στα $3,932,920 \text{ Bq/m}^3$. Η μέγιστη τιμή μετρήθηκε σε μια ρηχή στοά του ορυχείου, καθιστώντας το ένα από τα υψηλότερα επίπεδα που καταγράφηκαν στην Ευρώπη. Το ορυχείο αυτό, όπως είναι φυσικό, παρουσίασε και τη μεγαλύτερη μέση τιμή $1,700,780 \text{ Bq/m}^3$. Πρόκειται για έναν εγκαταλελειμμένο πλέον μεταλλευτικό χώρο με διαλυμένο ραδόνιο, που έχει επίσης μετρηθεί και εκτιμηθεί ως προς τις πιθανές επιπτώσεις στην υγεία. Ένας συνδυασμός ρύπανσης από βαρέα μέταλλα και ακτινοβολίας μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην υγεία και αυτή η έρευνα συνέστησε να διεξαχθεί περαιτέρω έρευνα σε τέτοια περιβάλλοντα.

Τις μικρότερες συγκεντρώσεις από όλα τα υπό μελέτη ορυχεία εμφάνισε το ορυχείο «Nalgonda» στην Ινδία, με μικρότερη συγκέντρωση στα 1.74 και μεγαλύτερη στα 25.6 Bq/m^3 . Επιπλέον η μέση ετήσια ενεργή δόση που βρέθηκε ότι λάμβαναν τα μέλη του κοινού από την εισπνοή ραδονίου και

των θυγατρικών του και την εξωτερική έκθεση ακτινοβολίας-γ, εκτιμήθηκε ότι ήταν $0,23 \text{ mSv } \gamma^{-1}$, το οποίο ήταν μέσα στο **ετήσιο όριο ενεργής δόσης του $1 \text{ mSv } \gamma^{-1}$ που συνιστάται από την ICRP.**

Όσον αφορά στις αποθέσεις ουρανίου στο Πακιστάν, οι συγκεντρώσεις κυμαίνονταν από 434 έως 964 Bq/m^3 , με μέση συγκέντρωση τα 699 Bq/m^3 . Βάσει των αποτελεσμάτων, τα υψηλά ποσοστά ουρανίου υποδεικνύουν ότι οι κόνδυλοι φωσφορίτη (phosphatic nodules) μπορεί να είναι μια πιθανή πηγή συγκέντρωσης ορυκτών ουρανίου στον ψαμμίτη Warcha, που βρίσκεται στο ορυχείο αυτό. Επιπλέον για την κατηγορία της μάντρας απόθεσης απορριμμάτων (backfill tailing yard) από ένα ορυχείο ουρανίου, στην Ιαπωνία με μέγιστη συγκέντρωση γύρω στα 5 και ελάχιστη στα $66,300 \text{ Bq/m}^3$. Το αντίκτυπο της εκροής ραδονίου από τις μάντρες απόθεσης απορριμμάτων (backfill tailing yards) ήταν μικρό τόσο για τις κατοικημένες περιοχές όσο και γύρω από αυτές τις περιοχές, όταν λαμβάνεται υπόψη το φυσικό υπόβαθρο του ραδονίου. Επιπλέον, με ταυτόχρονες συνεχείς μετρήσεις του ραδονίου και των θυγατρικών του σε δύο τοποθεσίες, εκτιμήθηκε ότι η ενεργή δόση που προκλήθηκε από τις αντιπροσωπευτικές μάντρες αποβλήτων ουρανίου ήταν μικρότερη από το όριο της ενεργούς δημόσιας δόσης του $1 \text{ mSv } \gamma^{-1}$, στο περιφραγμένο όριο του χώρου των απορριμμάτων.

Μία ιδιαίτερη περίπτωση ορυχείου που αξίζει να σημειωθεί είναι αυτή του ορυχείου «Ranger» στην Αυστραλία. Το μέταλλευμα ουρανίου ανακαλύφθηκε στα τέλη του 1969 και το ορυχείο ξεκίνησε να λειτουργεί το 1980. Σε αυτή τη μελέτη, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πυκνότητας διαφυγής ^{222}Rn εντός και γύρω από το ορυχείο ουρανίου «Ranger» στη βόρεια Αυστραλία για τη διερεύνηση της επίδρασης διάφορων μεταβλητών (π.χ. οι κόκκοι εδάφους, το μέγεθος των κόκκων εδάφους, το πορώδες εδάφους, η θερμοκρασία και η υγρασία, καθώς και η ατμοσφαιρική πίεση και η βροχόπτωση) σε μια τροπική περιοχή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι παράμετροι όπως η συγκέντρωση του ^{226}Ra , το μέγεθος των κόκκων του εδάφους και το πορώδες του εδάφους έχουν σημαντική επίδραση στις πυκνότητες του ^{222}Rn . Για παρόμοιες γεωμορφολογικές τοποθεσίες, η συγκέντρωση του ^{226}Ra είναι κυρίαρχος παράγοντας, αλλά το μέγεθος και το πορώδες του εδάφους επηρεάζουν επίσης την διαφυγή του ^{222}Rn . Η υγρασία του εδάφους αποτελεί το βασικό παράγοντα, ενώ εν συνεχεία έρχονται το πορώδες του εδάφους και το μέγεθος των κόκκων. Αυτό που είναι αξιοσημείωτο ωστόσο, είναι το συμπέρασμα ότι **οι επιφάνειες με βλάστηση έδειξαν υψηλότερες πυκνότητες διαφυγής από τα άγονα αντίστοιχα, ίσως επειδή η σχετική δομή της ρίζας αυξάνει το πορώδες του εδάφους και την κατακράτηση υγρασίας.**

Κατηγοριοποιώντας τα ορυχεία ουρανίου της παρούσας διπλωματικής σε ενεργά, κλειστά/εγκαταλελειμμένα και τουριστικά, δίνεται η δυνατότητα καλύτερης κατανόησης του σκοπού

και στόχου της μέτρησης ραδονίου και δόσης για την εκάστοτε κατηγορία. Τα **ενεργά ουρανιούχα** ορυχεία της συγκεκριμένης διπλωματικής ήταν τα εξής:

1. το ορυχείο «Zoujiashan» στην Κίνα
2. ένα ορυχείο ουρανίου στην Ινδία
3. το ορυχείο «Narwapahar» στην Ινδία
4. ένα ορυχείο ουρανίου στον Καναδά
5. διάφορα ορυχεία ουρανίου στις Η.Π.Α
6. το ορυχείο «Jaduguda» στην Ινδία
7. το ορυχείο «Nalgonda» στην Ινδία
8. το ορυχείο «Ranger» στην Αυστραλία
9. έξι ορυχεία ουρανίου στο Κολοράντο και το Μεξικό
10. το ορυχείο «Olympic Dam» στην Αυστραλία

Στα ενεργά ορυχεία ουρανίου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις συγκέντρωσης καθώς και δόσης ραδονίου με σκοπό την προστασία των εργαζομένων λόγω της γνωστής καρκινογενούς επίδρασης του ραδονίου στον ανθρώπινο οργανισμό. Επιπροσθέτως, άλλος ένας σκοπός ήταν η διερεύνηση των αλλαγών του ^{222}Rn και των χαρακτηριστικών τους σε επιλεγμένες χρονικές περιόδους (μία ώρα, μια ημέρα, ένα μήνα, έξι μήνες) και ο καθορισμός των ενεργών δόσεων, οι οποίες αποτέλεσαν τη βάση για την εκτίμηση του κινδύνου έκθεσης σε αυξημένη ιονίζουσα ακτινοβολία για τους εργαζομένους και τους επισκέπτες στο ορυχείο. Τέλος πολλές μετρήσεις έγιναν προκειμένου να υπάρξει βελτίωση του συστήματος εξαερισμού στα ορυχεία, καθώς επίσης και για τον έλεγχο των συγκεντρώσεων (μέγιστων, ελάχιστων και μέσων) από την άποψη του αν εμπίπτουν μέσα στα νομοθετημένα, από την εκάστοτε χώρα στην οποία βρίσκονται, όρια.

Συνεχίζοντας με τα **κλειστά/εγκαταλελειμμένα ουρανιούχα** ορυχεία τα οποία ήταν τα εξής:

1. το ορυχείο «Podgorze» στην Πολωνία
2. το ορυχείο «Ningyo-toge» στην Ιαπωνία
3. το ορυχείο «Radium Hill» στην Αυστραλία
4. το ορυχείο «South Terras» στην Αγγλία

οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν κυρίως για να κριθούν τα ορυχεία "κατάλληλα ή μη" για επισκέψεις. Επιπλέον, οι έρευνες με το ραδόνιο στις παραπάνω περιπτώσεις των κλειστών/εγκαταλελειμμένων ορυχείων έγιναν δεδομένης της σοβαρότητάς του, όσον αφορά στις επιπτώσεις που έχει, τόσο ως προς το περιβάλλον, όσο και ως προς την ευρύτερη περιοχή γύρω από τα ορυχεία. Ακόμα, σε κάποια από τα παραπάνω ορυχεία έγιναν οι μετρήσεις με στόχο την λήψη αποφάσεων για το αν το ραδόνιο χρήζει συνεχούς παρακολούθησης οπουδήποτε και αν συναντάται.

Τέλος, όσον αφορά στα **τουριστικά ουρανιούχα** ορυχεία, τα οποία ήταν τα εξής:

1. το «Old Uranium Mine» στην Πολωνία και
2. το ορυχείο «Liczyrzepa» στην Πολωνία

μελετήθηκαν οι βραχυπρόθεσμες αλλαγές συγκέντρωσης ραδονίου με σκοπό τη γνώση της «συμπεριφοράς» του, έτσι ώστε η τελευταία να μπορεί να είναι προβλέψιμη και το ραδόνιο «διαχειρίσιμο». Στόχο αποτέλεσε φυσικά και η προστασία των επισκεπτών σε αυτά τα τουριστικά ορυχεία, καθώς και η εύρεση ενός βέλτιστου χρόνου παραμονής στο κάθε ορυχείο, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η έκθεση και συνεπώς ο κίνδυνος σε αυτό. Αξίζει να σημειωθεί ότι κάποια από τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στις τουριστικές περιόδους, όπου έκλεινε ο εξαερισμός για να μην ενοχλούνται οι τουρίστες, οι τιμές ραδονίου ήταν υψηλότερες.

4.2 Ανθρακωρυχεία

Με την εξόρυξη και εκμετάλλευση άνθρακα, το ραδιενεργό αέριο ραδόνιο, που βρίσκεται σε φυσικές γεωλογικές δομές, μεταφέρεται από τα βαθιά στρώματα άνθρακα. Ως εκ τούτου, συγκεντρώνεται στο μεθάνιο των ορυχείων ή μεταφέρεται στην επιφάνεια της γης όπου μπορεί να αλλάξει σημαντικά τα επίπεδα ραδιενέργειας στους χώρους εργασίας και τις κατοικίες. Πολλές έρευνες στόχευαν στη διερεύνηση του κατά πόσον η έκθεση των εργαζομένων στο αέριο ραδόνιο και στα θυγατρικά του έχει αξιολογηθεί σε υπόγεια, μη ουρανιούχα και μη θοριούχα ορυχεία, όπως για παράδειγμα τα ανθρακωρυχεία. Άξιο αναφοράς είναι και το γεγονός ότι για τα ανθρακωρυχεία, αρκετές προηγούμενες έρευνες έχουν αναφέρει ότι οι συγκεντρώσεις του περιβαλλοντικού ^{222}Rn είναι γενικά χαμηλότερες από ότι στα άλλα μεταλλωρυχεία και εξηγήθηκε ως ο **υψηλός ρυθμός αερισμού που απαιτείται για τη μείωση του μεθανίου και άλλων αερίων για την αποφυγή εκρήξεων αερίων**.

Στην παρούσα διπλωματική έγινε επεξεργασία 21 δημοσιεύσεων διεθνούς βιβλιογραφίας πάνω στα ορυχεία άνθρακα. Πέρα από 71 ανθρακωρυχεία, μελετήθηκε (όπως προαναφέρθηκε) μία περίπτωση αυτανάφλεξης γαιανθράκων (coal fire) και μία περίπτωση μεθανίου γαιανθράκων (coal seam gas-CSG). Όπως φαίνεται και από τον [Πίνακα 3.2](#), οι συγκεντρώσεις στα 71 αυτά ορυχεία κυμαίνονται από μερικές δεκάδες έως μερικές χιλιάδες Bq/m^3 . Με τη μικρότερη συγκέντρωση στα 1.22 Bq/m^3 και τη μεγαλύτερη στα $64,400 \text{ Bq/m}^3$, παρατηρείται ότι το εύρος των συγκεντρώσεων ραδονίου στα διάφορα ορυχεία άνθρακα είναι επίσης μεγάλο, αλλά όχι τόσο μεγάλο όσο αυτό στα ορυχεία ουρανίου.

Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης συγκέντρωσης ραδονίου στο ίδιο ορυχείο, εμφανίστηκε στο ανθρακωρυχείο «Αννα» στην Πολωνία, με τη χαμηλότερη συγκέντρωση στα 120

Bq/m³ και την υψηλότερη στα 64,400 Bq/m³. Το ορυχείο αυτό από το 2004 έχει συγχωνευτεί με το ορυχείο "Rydułtowy", και υπάρχει πλέον με το όνομα "Rydułtowy-Anna". Οι λήψεις των μετρήσεων έγιναν όταν το ορυχείο ήταν εν ενεργεία αλλά και μετά τη διακοπή λειτουργίας του. Πρωταρχικό στόχο της συγκεκριμένης εργασίας αποτελούσε η συλλογή δεδομένων για τη "μετανάστευση" του ραδονίου σε μία περιοχή, κοντά στο ορυχείο "Anna", η οποία επηρεαζόταν από τις εξορυκτικές διεργασίες που πραγματοποιούνται σε αυτό. Επιπλέον ένας ακόμα σκοπός της εργασίας ήταν και η εκτίμηση των κινδύνων που σχετίζονται με την έκθεση στο ραδόνιο.

Τις μικρότερες συγκεντρώσεις από όλα τα υπό μελέτη ανθρακωρυχεία εμφάνισαν τα ορυχεία «Makarwal» στο Πακιστάν, με μικρότερη συγκέντρωση στα 2.6 και μεγαλύτερη στα 12.2 Bq/m³. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ραδονίου χρησιμοποιώντας τόσο παθητικές όσο και ενεργητικές τεχνικές. Η εργασία έγινε με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού των ορυχείων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, **οι συγκεντρώσεις ραδονίου στο εσωτερικό των ορυχείων ήταν 5-10 φορές μεγαλύτερες από τις τιμές στο εξωτερικό τους.**

Όσον αφορά στην αυτανάφλεξη γαιανθράκων (coal fires) στην Κίνα, τα αποτελέσματα της εργασίας έδειξαν ότι κατά τη διάρκεια αυτανάφλεξης του γαιάνθρακα, η **συγκέντρωση του ραδονίου αυξήθηκε κατά 46 φορές**. Τέλος οι ρωγμές που δημιουργούνται από την αυτανάφλεξη γαιανθράκων, φαίνεται να "βοηθούν" το ραδόνιο να "κινηθεί" από το υπέδαφος προς την επιφάνεια της Γης. Οι συγκεντρώσεις ραδονίου στην προκειμένη περίπτωση κυμαίνονταν από 92.9 έως 4,273.9 Bq/m³. Επιπλέον, τα πεδία μεθανίου (coal seam gas-CSG) στην Αυστραλία εμφάνισαν χαμηλότερη συγκέντρωση ίση με 1.4 και υψηλότερη ίση με 15 Bq/m³, ενώ η μέση συγκέντρωση ήταν 7 Bq/m³, δηλαδή αρκετά χαμηλή.

Μία επίσης ιδιαίτερη περίπτωση ορυχείου που αξίζει να σημειωθεί είναι αυτή του ορυχείου «Nowa Ruda» στην Πολωνία. Το ορυχείο "Nowa Ruda Coal Mine" βρίσκεται σε μία περιοχή επιρρεπή στο ραδόνιο, λόγω αυξημένης συγκέντρωσης ουρανίου στα πετρώματά της. Οι έρευνες σχετικά με τις συγκεντρώσεις ραδονίου σε αυτή την υπόγεια τουριστική διαδρομή πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας παθητικές και ενεργητικές τεχνικές μέτρησης. Όπως έχει αναφερθεί ξανά σε προηγούμενες ενότητες, οι εποχιακές, ωριαίες και χωρικές μεταβολές, μπορούν να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό τις συγκεντρώσεις ραδονίου. Σε αυτό που δόθηκε όμως ιδιαίτερη έμφαση στη συγκεκριμένη εργασία ήταν η παρατήρηση της επίδρασης του ανθρώπινου παράγοντα στις συγκεντρώσεις ραδονίου. Ως ανθρώπινος παράγοντας, θεωρείται η ανοιχτή πόρτα εισόδου κατά τη διάρκεια εργασιών αποκατάστασης που πραγματοποιούνται εντός του υπόγειου χώρου. Η ενεργή δόση που βρέθηκε να δέχεται ένας τουρίστας κατά τη διάρκεια μίας επίσκεψης ήταν χαμηλότερη από 0.001 mSv γ⁻¹ και ο κίνδυνος πρόκλησης καρκίνου ήταν χαμηλότερος από 0,00001%.

Κατηγοριοποιώντας ξανά τα ανθρακωρυχεία που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική σε ενεργά, κλειστά/εγκαταλελειμμένα και τουριστικά, δίνεται η δυνατότητα καλύτερης κατανόησης του σκοπού και στόχου της μέτρησης ραδονίου και δόσης για την εκάστοτε κατηγορία.

Τα **ενεργά ανθρακωρυχεία** ήταν τα εξής:

1. ένα ανθρακωρυχείο στη Βραζιλία
2. έξι ανθρακωρυχεία στο Πακιστάν
3. τα ορυχεία «Pervomayskaya», «Raspadskaya», «Gramoteinskaya», «Kolmogorovskaya», «Usinskaya», «Yagunovskaya», «Baidaevskaya», «Alarda», «Yesaulskaya» στη Ρωσία
4. τα ορυχεία «Cubric», «Dimnjace», «Drage», «Vrtliste κ' Glavni sloj», «Djurdjevik», «Haljinici», «Stara Jama», «Raspotocje» στη Βοσνία – Ερζεγοβίνη
5. δώδεκα ανθρακωρυχεία στην Αγγλία και τη Σκωτία
6. το ορυχείο «Makarwal» στο Πακιστάν
7. δώδεκα ανθρακωρυχεία στο Πακιστάν
8. τα ορυχεία «Tuncbilek», «Omerler», «Eynez» στην Τουρκία
9. το ορυχείο «Amasra» στην Τουρκία
10. «Kozlu», «Karadon», «Üzülmaz» στην Τουρκία
11. το ορυχείο «Nui Beo» στο Βιετνάμ
12. τα ορυχεία «Velenje – Preloge», «Trbovlje», «Zagorje», «Hrastnik», «Lasko», «Senovo» στη Σλοβενία
13. ένα ανθρακωρυχείο στην Κίνα
14. ένα ανθρακωρυχείο στη Βραζιλία

Στα ενεργά ανθρακωρυχεία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις συγκέντρωσης καθώς και δόσης του ραδονίου και των θυγατρικών του, στοχεύοντας κυρίως στον υπολογισμό της μέσης ετήσιας ενεργούς δόσης για τους εργαζόμενους. Σε κάποιες περιπτώσεις της κατηγορίας των ενεργών ανθρακωρυχείων πραγματοποιήθηκε και σύγκριση των τιμών συγκέντρωσης ραδονίου σε ορυχεία, μεταξύ παραγωγικών και μη περιοχών (ως προς την εξόρυξη μεταλλεύματος). Επιπλέον πολλές εργασίες έγιναν με σκοπό την προστασία των εργαζομένων από τους επικείμενους κινδύνους που διατρέχουν από τη συχνή έκθεσή τους στη ραδιενέργεια, καθώς και τη δημιουργία "προτύπων" προστασίας από αυτή. Τέλος, η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού των ορυχείων αποτέλεσε ένα ακόμα έναυσμα βαθύτερης επεξεργασίας του θέματος «ραδονίου» από πολλούς ερευνητές.

Συνεχίζοντας με τα **τουριστικά ανθρακωρυχεία** τα οποία ήταν τα εξής:

1. το ορυχείο «Nowa Ruda» στην Πολωνία και

2. το ορυχείο «Rydułtowy-Anna» στην Πολωνία

οι μετρήσεις των εργασιών αυτών πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την εξασφάλιση προστασίας και υγείας στους τουρίστες που επισκέπτονται τα ορυχεία «Nowa Ruda» και «Rydułtowy-Anna», καθώς επίσης και για τη διερεύνηση της πιθανότητας το ραδόνιο να αποτελεί "ανιχνευτή" των κινήσεων του αέρα μέσα σε υπόγειες εγκαταστάσεις με ελλειπές σύστημα εξαερισμού. Το ραδόνιο κρίθηκε ως "άριτος ανιχνευτής" για τις κινήσεις αέρα.

Τέλος, οι 21 δημοσιεύσεις που προαναφέρθηκαν, δεν περιλάμβαναν κανένα ανθρακωρυχείο στην κατηγορία των **κλειστών/εγκαταλελειμμένων** ορυχείων, συνεπώς δε θα αναλυθούν περεταίρω σε αυτή την ενότητα.

4.3 Άλλα ορυχεία

Τα αλατωρυχεία καθώς και τα ορυχεία χρυσού, αργύρου, μόλυβδου, ψευδαργύρου, σιδήρου, χαλκού, φωσφόρου, μαγγανίου, βολφραμίου, κασσίτερου και αιματίτη, έχουν αποτελέσει αντικείμενο έρευνας για πολλούς μελετητές. Η μεθοδολογία που υιοθετούνταν στις περισσότερες περιπτώσεις στα παραπάνω ορυχεία αποτελείται από τρεις κύριες φάσεις. Η πρώτη ήταν μια εκτεταμένη βιβλιογραφική έρευνα των επιπέδων συγκέντρωσης ραδονίου καθώς και οι εκτιμήσεις της δόσης ακτινοβολίας λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις που έγιναν μέχρι σήμερα από διάφορους ερευνητές. Στη δεύτερη φάση, οι τιμές που ελήφθησαν συγκρίθηκαν με τα όρια επαγγελματικής έκθεσης (Occupational Exposure Limits, OEL). Στην τρίτη φάση, επαληθεύτηκαν τυχόν μέτρα ελέγχου που πραγματοποιήθηκαν σε ορυχεία με υψηλή έκθεση των εργαζομένων στο ραδόνιο και στα θυγατρικά του και καθορίστηκαν τα υιοθετούμενα μέτρα ελέγχου.

Στην παρούσα διπλωματική έγινε επεξεργασία 35 δημοσιεύσεων διεθνούς βιβλιογραφίας πάνω στα διάφορα ορυχεία. Πέρα από 7 ορυχεία άλατος μελετήθηκαν 12 ορυχεία χρυσού, 14 ορυχεία χαλκού, 5 ορυχεία σιδήρου, 7 ορυχεία μόλυβδου, 4 ορυχεία μαγγανίου, 5 ορυχεία ψευδαργύρου, 3 ορυχεία αργύρου, 1 ορυχείο αιματίτη, 2 ορυχεία βολφραμίου, 1 ορυχείο κασσίτερου και 2 ορυχεία φωσφόρου. Όπως φαίνεται και από τον [Πίνακα 3.4](#), οι συγκεντρώσεις στα ορυχεία αυτά κυμαίνονται γενικά από μερικές δεκάδες έως μερικές χιλιάδες Bq/m³ (με μία εξαίρεση στο ορυχείο «Bushdown» που φτάνει γύρω στα 7.5 εκ. Bq/m³). Με τη μικρότερη συγκέντρωση στα 1.37 Bq/m³ και τη μεγαλύτερη στα 7,100,000 Bq/m³, παρατηρείται ότι το εύρος των συγκεντρώσεων ραδονίου στα διάφορα ορυχεία της κατηγορίας αυτής είναι επίσης μεγάλο, όπως και με τα ορυχεία ουρανίου και άνθρακα.

Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης συγκέντρωσης ραδονίου στο ίδιο ορυχείο, εμφανίστηκε στο ορυχείο αιματίτη και κασσίτερου «Bushdown» της Αγγλίας, με τη χαμηλότερη συγκέντρωση στα 112,000 Bq/m³ και την υψηλότερη στα 7,100,000 Bq/m³. Αυτό είναι περίπου 89 φορές μεγαλύτερο από το υψηλότερο δημοσιευμένο επίπεδο ραδονίου για σπήλαια και ορυχεία στο Devon και στην Κορνουάλη της Αγγλίας, το οποίο είναι 80.000 Bq/m³. Αυτά τα επίπεδα έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία τόσο για περιστασιακούς όσο και για επαγγελματίες εξερευνητές ορυχείων. Η μέση συγκέντρωση του συγκεκριμένου ορυχείου ήταν επίσης υψηλή και ίση με 1,329,500 Bq/m³.

Τις μικρότερες συγκεντρώσεις από όλα τα υπό μελέτη ορυχεία του Πίνακα 3.4, εμφάνισε το αλατωρυχείο «Turda» στη Ρουμανία, με μικρότερη συγκέντρωση στα 6.9 και μεγαλύτερη στα 12 Bq/m³. Σε όλα τα ορυχεία, συμπεριλαμβανομένου και του ορυχείου «Turda», παρατηρούνται μικρότερες συγκεντρώσεις ραδονίου όπου υπάρχει σύστημα εξαερισμού σε σχέση με τις τιμές που εμφανίζονται όταν δεν υπάρχει. Η εργασία αυτή ασχολήθηκε με την εύρεση συγκεντρώσεων ραδονίου και ακτινοβολίας, με σκοπό να κρίνει το ορυχείο αυτό, μαζί με τα ορυχεία «Ocna Dej» και «Cacica», "κατάλληλα ή μη" για θεραπευτική χρήση.

Το ορυχείο βολφραμίου «Los Cóndores» και το ορυχείο χρυσού «La Carolina», αποτελούν δύο ορυχεία στην Αργεντινή που αξίζει να αναφερθούν. Τα μοτίβα δραστηριότητας ραδονίου, λαμβάνοντας υπόψη τους ανέμους καπνοδόχου, χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση ροής αέρα από στοές ή μεγαλύτερες ρωγμές κατά μήκος της κύριας στοάς του ορυχείου «Los Cóndores», δείχνοντας ότι το ραδόνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας σημαντικός ιχνηλάτης των ρευμάτων αέρα από ρωγμές και μικρότερα κενά στο πέτρωμα του ορυχείου. Η δόση ακτινοβολίας και οι επιπτώσεις που μπορεί να έχουν στο περιβάλλον και τους εργαζομένους, οι υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου, μελετήθηκαν και εκτιμήθηκαν και για τα δύο ορυχεία. Σκοπός την εργασίας ήταν ο έλεγχος των ορίων που έχουν οριστεί από την CRP (Commission on Radiological Protection). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στο ορυχείο "La Carolina", η συγκέντρωση ραδονίου ξεπέρασε το όριο κατά 3 φορές (μέγιστη συγκέντρωση ραδονίου 6000 Bq/m³) και συνεπώς τόσο οι εργαζόμενοι όσο και οι επισκέπτες διατρέχουν μεγάλο κίνδυνο. Από τα αποτελέσματα του ορυχείου "Los Cóndores" (μέγιστη συγκέντρωση ραδονίου 1480 Bq/m³), οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι είναι απαραίτητη η βελτίωση του συστήματος εξαερισμού, καθώς το ήδη υπάρχον σύστημα κρίθηκε "ανεπαρκές".

Κατηγοριοποιώντας για μία τελευταία φορά τα ορυχεία άλατος, χρυσού, αργύρου, μόλυβδου, ψευδαργύρου, σιδήρου, χαλκού, φωσφόρου, μαγγανίου, βολφραμίου, κασσίτερου και αιματίτη της παρούσας διπλωματικής σε ενεργά, κλειστά/εγκαταλελειμμένα και τουριστικά, δίνεται η δυνατότητα

καλύτερης κατανόησης του σκοπού και στόχου της μέτρησης ραδονίου και δόσης για την εκάστοτε κατηγορία. Τα **ενεργά** ορυχεία της συγκεκριμένης κατηγορίας ήταν τα εξής:

1. τα ορυχεία «Khanozai» και «Muslim Bagh» στο Πακιστάν
2. το ορυχείο μολύβδου και ψευδαργύρου «Trepça» στο Κόσοβο
3. ένα ορυχείο μαγγανίου στην Ουγγαρία
4. τα ορυχεία μολύβδου και υδραργύρου «Mezica» και «Idrija» στη Σλοβενία
5. επτά χρυσωρυχεία στη Δυτική Αφρική
6. το ορυχείο χρυσού «Hamash» στην Αίγυπτο
7. τα ορυχεία χρυσού, αργύρου, μολύβδου και ψευδαργύρου «Stanterg», «Artana», «Hajvalia», «Badovc» στο Κόσοβο
8. το ορυχείο χαλκού και ψευδαργύρου «Pyhasalmi» στη Φιλανδία
9. τα αλατωρυχεία «Khewra Salt Mines» στο Πακιστάν
10. το ορυχείο μαγγανίου «Manganese Mine of Úrkút» στην Ουγγαρία
11. το ορυχείο χαλκού «Anarak» στο Ιράν
12. τα ορυχεία μολύβδου και ψευδαργύρου «Novo Brdo», «Kisnica», «Ajvalija» στη Γιουγκοσλαβία
13. το ορυχείο σιδήρου «Bayan Obo mine» στην Κίνα
14. το ορυχείο φωσφορίτη «Abu Tartur» στην Αίγυπτο
15. το ορυχείο φωσφορίτη «Khnefees» στη Συρία

Στις περισσότερες μελέτες των ενεργών ορυχείων σκοπός ήταν, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων συγκέντρωσης ραδονίου και των επιπέδων έκθεσης σε ακτινοβολία στα υπόγεια ορυχεία, τα οποία είναι σημαντικά για την εκτίμηση των ραδιογενών κινδύνων για τους εργαζόμενους. Πολλές εργασίες επίσης περιέγραφαν το επίπεδο συγκέντρωσης ραδονίου στους υπόγειους μεταλλευτικούς χώρους εργασίας για μεγάλα χρονικά διαστήματα (π.χ. 4 χρόνια). Ακόμα παρουσιάζονταν οι υπολογισμοί της ενεργούς δόσης, εφαρμόζοντας διαφορετικούς παράγοντες ισορροπίας που προτείνονταν από τη βιβλιογραφία και υπολογίζονταν με βάση τις εκάστοτε μετρήσεις, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι οι διαφορές θα μπορούσαν να είναι τριπλάσιες. Τέλος, πολλά από τα ληφθέντα δεδομένα ήταν χρήσιμα και κατά τη δημιουργία ενός άτλαντα ραδιενέργειας ραδονίου όπως π.χ. για το ορυχείο χρυσού Hamash και τη γύρω περιοχή.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα **κλειστά/εγκαταλελειμμένα** ορυχεία τα οποία ήταν τα εξής:

1. τα ορυχεία αιματίτη και κασσίτερου «Bushdown» και «Eylesbarrow» στην Αγγλία

2. τα ορυχεία μόλυβδου και χαλκού «Hudgill Burn», «Smallcleugh Mine», «Coniston Copper» στην Αγγλία
3. το ορυχείο χαλκού και σιδήρου «Kings Wood» στην Αγγλία
4. τα ορυχεία χαλκού «Faynan Orefield» στην Ιορδανία
5. το ορυχείο «Los C6ndores» στην Αργεντινή

Αυτές οι μελέτες παρουσιάζουν ότι οι “βιομηχανικοί αρχαιολόγοι” (industrial archaeologists) και οι εξερευνητές εγκαταλελειμμένων ορυχείων μπορεί να διατρέχουν κίνδυνο από την έκθεση σε ραδόνιο και προτάθηκε ένα σύστημα διαχείρισης, που επιτρέπει στους αρχαιολόγους βιομηχανικών χώρων να συνεχίσουν την εξερεύνηση ενώ ελαχιστοποιούν τον κίνδυνο υγείας από το ραδόνιο. Οποιοδήποτε εγχείρημα επίσκεψης στα εγκαταλελειμμένα αυτά ορυχεία, θα έπρεπε να συνοδεύεται με επίγνωση των επικείμενων κινδύνων που συνδέονται με αυτά.

Τέλος, όσον αφορά στα **τουριστικά** ορυχεία, ήταν τα παρακάτω:

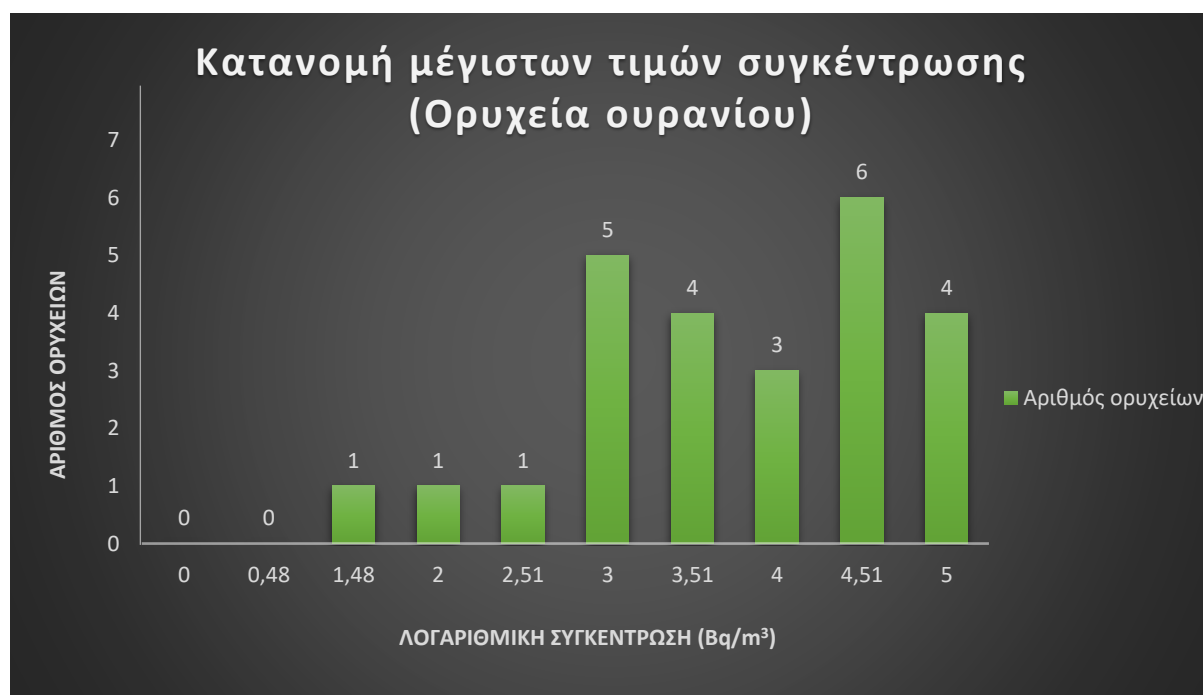
1. τα αλατωρυχεία «Turda», «Cacica», «Ocna dej» στη Ρουμανία
2. ένα ορυχείο βολφραμίου στην Αυστραλία
3. το ορυχείο χρυσού «La Carolina» στην Αργεντινή
4. έξι ορυχεία χαλκού, σιδήρου, αλατιού και αργύρου στην Αυστρία

Προσδιορίστηκαν οι ενεργές δόσεις λόγω του ^{222}Rn και των ακτινών-γ μέσα στα ορυχεία, με σκοπό να εξασφαλιστούν αμελητέες τιμές για τους τουρίστες (έπειτα από τη λήψη απαραίτητων μέτρων προστασίας σε περίπτωση υπέρβασης των ορίων τους). Λαμβάνοντας υπόψη την ενεργή δόση στους τουριστικούς οδηγούς ορυχείων, μπορούν να φτάσουν τιμές που ξεπερνούν τα 20 mSv της εσωτερικής συμβολής στις ενεργές δόσεις, ανάλογα με τον αριθμό των ωρών εργασίας εντός του ορυχείου. Πολλά από τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι **καλά αεριζόμενες περιοχές κατά μήκος των τουριστικών διαδρομών είχαν τις χαμηλότερες τιμές όλων των μετρημένων παραμέτρων και ότι οι χρονικές μεταβολές αυτών των παραμέτρων ήταν ακανόνιστες**. Τέλος, για ακόμη μία φορά όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις των τουριστικών ορυχείων, οι μετρήσεις συγκέντρωσης ραδονίου και των θυγατρικών του έγιναν με σκοπό τον ακριβή υπολογισμό της δόσης που λαμβάνουν τα εισερχόμενα άτομα στο ορυχείο, καθώς επίσης και για την προστασία των τουριστών που επισκέπτονται το εκάστοτε ιστορικό ορυχείο.

4.4 Διαγράμματα συγκέντρωσης ραδονίου

Στη συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα συγκέντρωσης ραδονίου. Τα παρακάτω ραβδογράμματα και των τριών κατηγοριών (ορυχεία ουρανίου, ανθρακωρυχεία και λοιπά ορυχεία), έγιναν με σκοπό την παρακολούθηση της κατανομής των συγκεντρώσεων ραδονίου στα διάφορα ορυχεία ανά τον κόσμο. Οι συγκεντρώσεις που παρατίθενται είναι οι μέγιστες και οι ελάχιστες κάθε κατηγορίας, αφού πρώτα έχουν ομαδοποιηθεί και μετατραπεί σε λογαριθμικές συγκεντρώσεις. Αυτό έγινε δεδομένου του μεγάλου εύρους τιμών των συγκεντρώσεων ραδονίου και προκειμένου να μπορέσουν να αποτυπωθούν όλες στο ίδιο διάγραμμα. Οι ομαδοποιήσεις σε κάθε κατηγορία ορυχείου ήταν 10, σύμφωνα με τους αντίστοιχους πίνακες (Πίνακας 4.1, Πίνακας 4.2, Πίνακας 4.3, Πίνακας 4.4, Πίνακας 4.5 και Πίνακας 4.6), και έγιναν με βάση τον Cigna (2005).

4.4.1 Ορυχεία ουρανίου



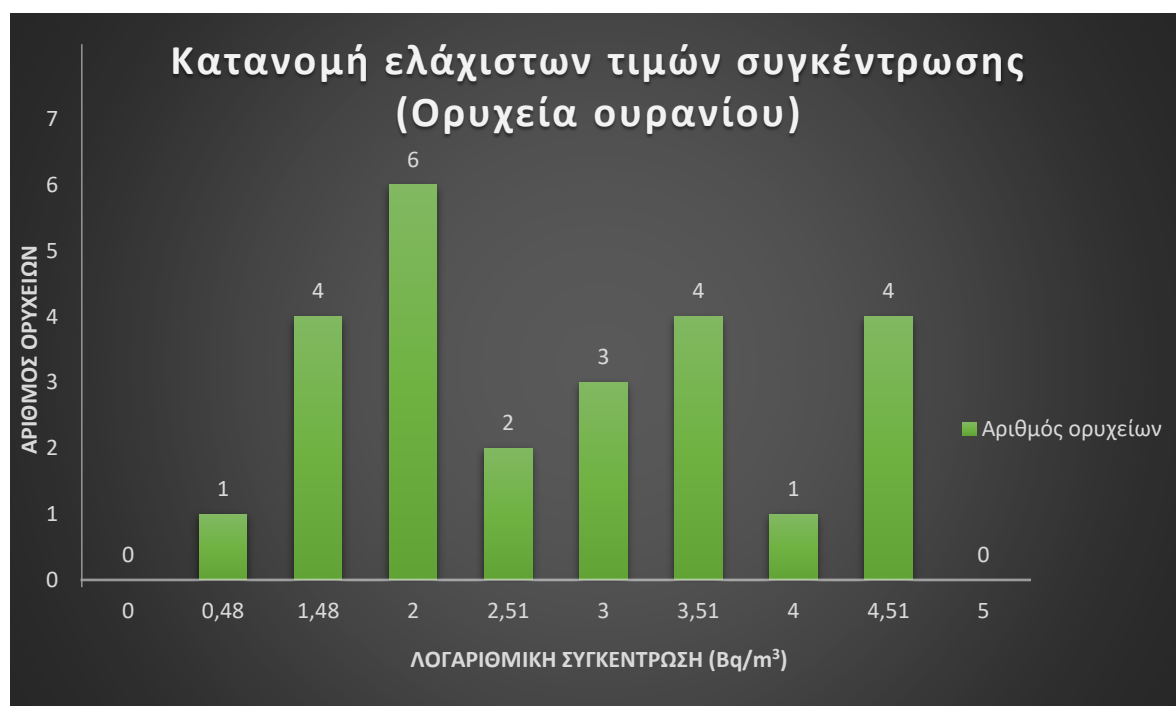
Διάγραμμα 4.1: Κατανομή μέγιστων τιμών συγκέντρωσης στα ορυχεία ουρανίου

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα και τις παρακάτω 10 ομαδοποιήσεις, παρατηρείται ότι τα περισσότερα ορυχεία ουρανίου και συγκεκριμένα τα 6 από τα 25 της συγκεκριμένης κατηγορίας, έχουν συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 10.000 έως 100.000 Bq/m³ (λογαριθμική συγκέντρωση 4,51). Οι συγκεντρώσεις αυτές είναι αρκετά υψηλές, αλλά ταυτόχρονα αναμενόμενες για τα ορυχεία ουρανίου, που όπως έχει προαναφερθεί, σε αυτά αναμένονται και οι υψηλότερες συγκεντρώσεις

λόγω της παρουσίας ουρανίου. Επιπροσθέτως, παρατηρείται και ο μικρός αριθμός ορυχείων (3 από τα 25), που έχουν συγκεντρώσεις από 0 έως 320 Bq/m³, με την πλειοψηφία των ορυχείων να βρίσκεται πάνω από τα 320 Bq/m³.

Bq/m ³	Λογαριθμική συγκέντρωση	Αριθμός ορυχείων
0 έως 1	0	0
1 έως 3	0,48	0
3 έως 30	1,48	1
30 έως 100	2	1
100 έως 320	2,51	1
320 έως 1.000	3	5
1.000 έως 3.000	3,51	4
3.000 έως 10.000	4	3
10.000 έως 100.000	4,51	6
100.000>	5	4

Πίνακας 4.1: Ομαδοποίηση μέγιστων συγκεντρώσεων ραδονίου στα ορυχεία ουρανίου



Διάγραμμα 4.2: Κατανομή ελάχιστων τιμών συγκέντρωσης στα ορυχεία ουρανίου

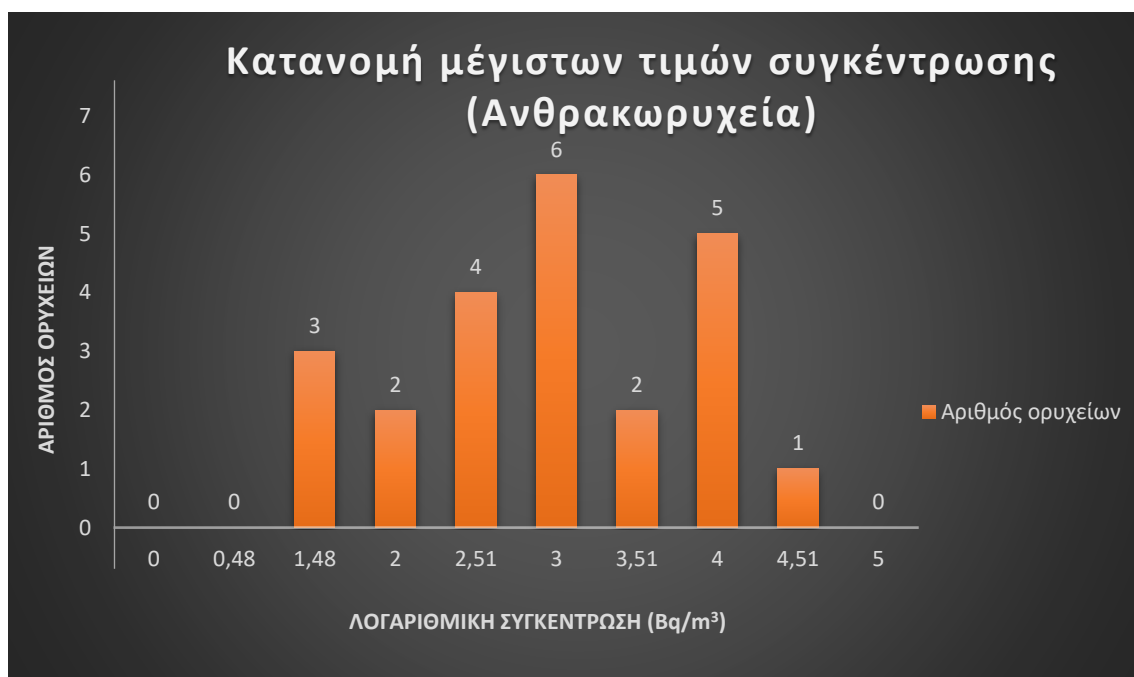
Με βάση το παραπάνω διάγραμμα και τις παρακάτω 10 ομαδοποιήσεις, παρατηρείται ότι τα περισσότερα ορυχεία, και συγκεκριμένα 6 από τα 25, έχουν τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις τους ανάμεσα στα 30 με 100 Bq/m³ (λογαριθμική συγκέντρωση 2). Αν και δεν υπάρχει αναγνωρισμένο όριο συγκέντρωσης κάτω από το οποίο η έκθεση του ραδονίου δεν παρουσιάζει κίνδυνο, οι

συγκεντρώσεις αυτές θεωρούνται σχετικά χαμηλές και πιθανόν «ασφαλείς» από την άποψη ορίων ακτινοπροστασίας. Από την άλλη πλευρά, το γεγονός ότι 9 ορυχεία ουρανίου εμφανίζουν ελάχιστες τιμές μεταξύ 1.000 και 100.000 Bq/m³, θεωρείται ανησυχητικό λαμβάνοντας υπόψη ότι αυτές είναι οι «ελάχιστες» συγκεντρώσεις των ορυχείων αυτών.

Bq/m ³	Λογαριθμική συγκέντρωση	Αριθμός ορυχείων
0 έως 1	0	0
1 έως 3	0,48	1
3 έως 30	1,48	4
30 έως 100	2	6
100 έως 320	2,51	2
320 έως 1.000	3	3
1.000 έως 3.000	3,51	4
3.000 έως 10.000	4	1
10.000 έως 100.000	4,51	4
100.000>	5	0

Πίνακας 4.2: Ομαδοποίηση ελάχιστων συγκεντρώσεων ραδονίου στα ορυχεία ουρανίου

4.4.2 Ανθρακωρυχεία



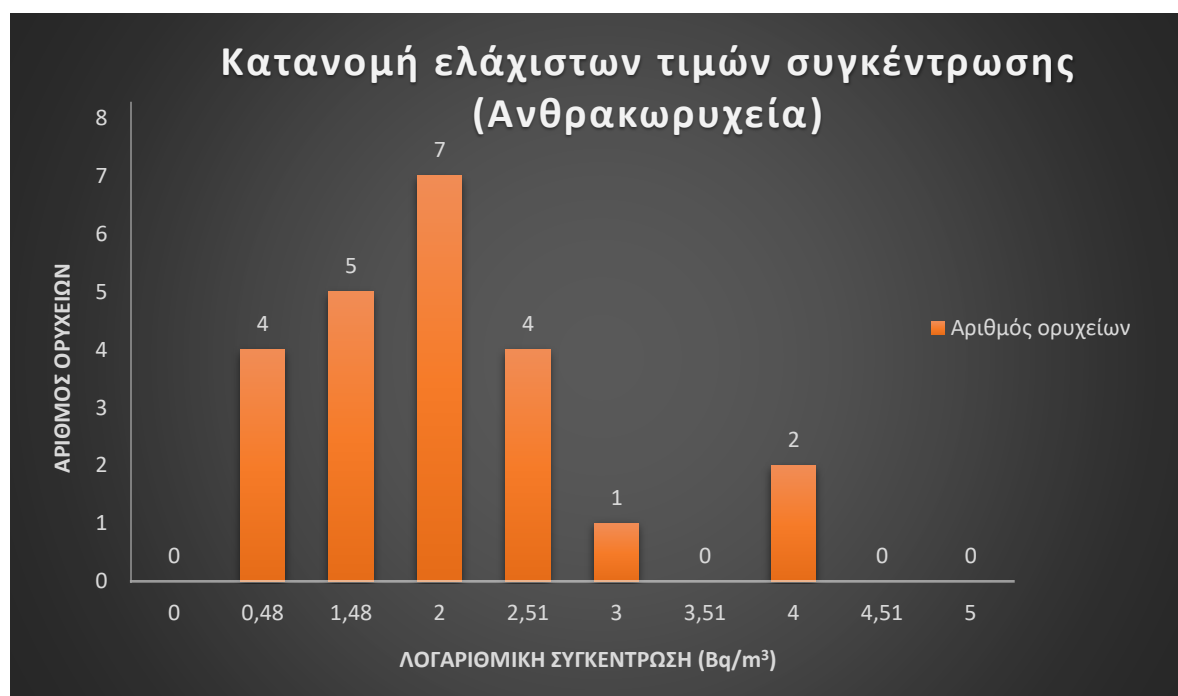
Διάγραμμα 4.3: Κατανομή μέγιστων τιμών συγκέντρωσης στα ανθρακωρυχεία

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα και τις παρακάτω 10 ομαδοποιήσεις, παρατηρείται ότι τα περισσότερα ανθρακωρυχεία και συγκεκριμένα τα 6 από τα 23 της συγκεκριμένης κατηγορίας, έχουν

συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 320 έως 1.000 Bq/m³ (λογαριθμική συγκέντρωση 3). Οι τιμές αυτές λαμβάνοντας υπόψη ότι αποτελούν τις «μέγιστες τιμές» των 6 αυτών ορυχείων και συγκρίνοντάς τες και με τις αντίστοιχες μέγιστες συγκεντρώσεις στα ορυχεία ουρανίου, δε θεωρούνται πολύ υψηλές. Έχοντας ως σημείο αναφοράς τις συγκεντρώσεις μεταξύ 320 και 1.000 Bq/m³, παρατηρείται ίσος περίπου αριθμός ορυχείων που έχει τιμές κάτω και πάνω από τις τιμές αυτές (9 ορυχεία με συγκεντρώσεις κάτω των 320 Bq/m³ και 8 ορυχεία με συγκεντρώσεις άνω των 1000 Bq/m³). Συνεπώς στη συγκεκριμένη κατηγορία των ανθρακωρυχείων παρατηρούνται περιπτώσεις τόσο ασφαλών, όσο και μη ασφαλών μεταλλευτικών χώρων.

Bq/m ³	Λογαριθμική συγκέντρωση	Αριθμός ορυχείων
0 έως 1	0	0
1 έως 3	0,48	0
3 έως 30	1,48	3
30 έως 100	2	2
100 έως 320	2,51	4
320 έως 1.000	3	6
1.000 έως 3.000	3,51	2
3.000 έως 10.000	4	5
10.000 έως 100.000	4,51	1
100.000>	5	0

Πίνακας 4.3: Ομαδοποίηση μέγιστων συγκεντρώσεων ραδονίου στα ανθρακωρυχεία



Διάγραμμα 4.4: Κατανομή ελάχιστων τιμών συγκέντρωσης στα ανθρακωρυχεία

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα και τις παρακάτω 10 ομαδοποιήσεις, παρατηρείται ότι τα περισσότερα ορυχεία, και συγκεκριμένα 7 από τα 23, έχουν τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις τους ανάμεσα στα 30 με 100 Bq/m³ (λογαριθμική συγκέντρωση 2). Το ίδιο συνέβη και με την κατανομή των ελάχιστων συγκεντρώσεων ραδονίου στα ορυχεία ουρανίου. Η πλειοψηφία των ανθρακωρυχείων (16 από τα 23 ανθρακωρυχεία), βρίσκεται κάτω από τα 100 Bq/m³, με μόνο 7 ορυχεία να τα ξεπερνούν.

Bq/m ³	Λογαριθμική συγκέντρωση	Αριθμός ορυχείων
0 έως 1	0	0
1 έως 3	0,48	4
3 έως 30	1,48	5
30 έως 100	2	7
100 έως 320	2,51	4
320 έως 1.000	3	1
1.000 έως 3.000	3,51	0
3.000 έως 10.000	4	2
10.000 έως 100.000	4,51	0
100.000>	5	0

Πίνακας 4.4: Ομαδοποίηση ελάχιστων συγκεντρώσεων ραδονίου στα ανθρακωρυχεία

4.4.3 Άλλα ορυχεία

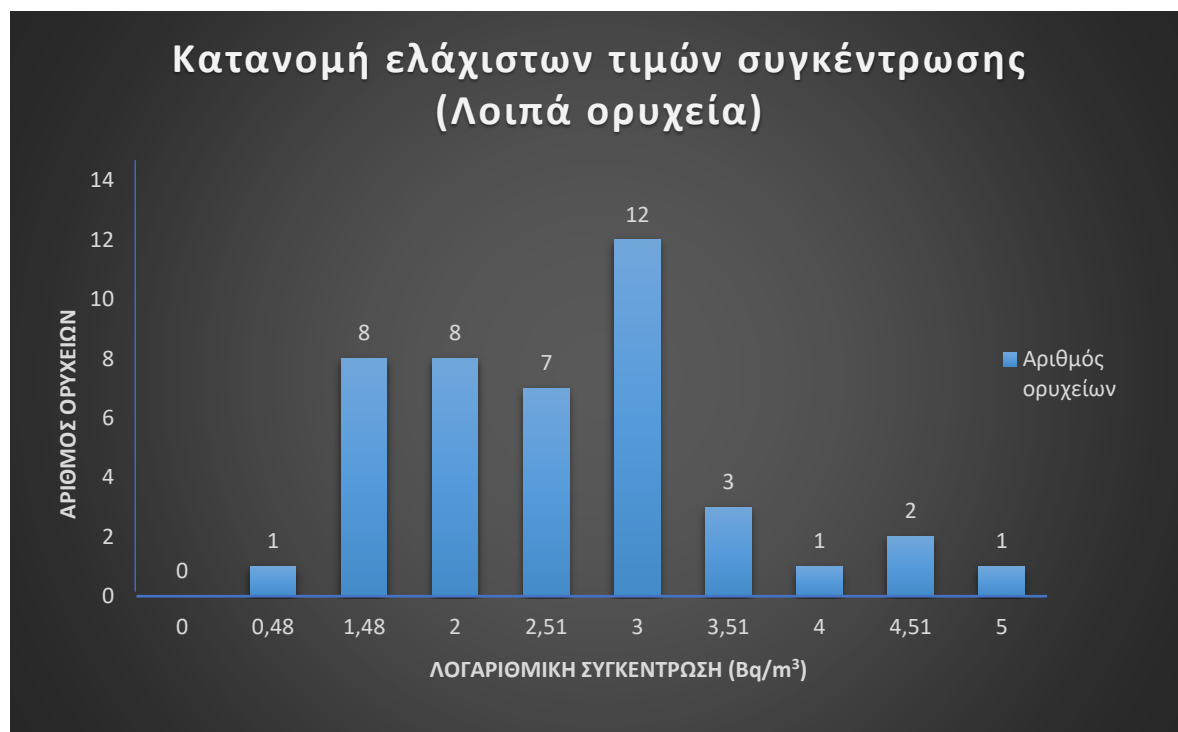


Διάγραμμα 4.5: Κατανομή μέγιστων τιμών συγκέντρωσης στα υπόλοιπα ορυχεία

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα και τις παρακάτω 10 ομαδοποιήσεις, παρατηρείται ότι τα περισσότερα ορυχεία και συγκεκριμένα τα 15 από τα 48 της συγκεκριμένης κατηγορίας, έχουν συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 1.000 έως 3.000 Bq/m³ (λογαριθμική συγκέντρωση 3,51). Η πλειοψηφία των ορυχείων (29 από τα 48 ορυχεία), φαίνεται να βρίσκεται στο εύρος συγκεντρώσεων από 1.000 έως 100.000 (και πάνω) Bq/m³, οι οποίες είναι αρκετά υψηλές και επικίνδυνες για την ανθρώπινη υγεία.

Bq/m ³	Λογαριθμική συγκέντρωση	Αριθμός ορυχείων
0 έως 1	0	0
1 έως 3	0,48	0
3 έως 30	1,48	3
30 έως 100	2	3
100 έως 320	2,51	4
320 έως 1.000	3	9
1.000 έως 3.000	3,51	15
3.000 έως 10.000	4	5
10.000 έως 100.000	4,51	7
100.000>	5	2

Πίνακας 4.5: Ομαδοποίηση μέγιστων συγκεντρώσεων ραδονίου στα υπόλοιπα ορυχεία



Διάγραμμα 4.6: Κατανομή ελάχιστων τιμών συγκέντρωσης στα υπόλοιπα ορυχεία

Όπως παρατηρείται από το Διάγραμμα 4.6, τα περισσότερα ορυχεία (12 από τα 48), έχουν συγκεντρώσεις ραδονίου που βρίσκονται μεταξύ 320 έως 1.000 Bq/m³. Γενικότερα η πλειοψηφία των ορυχείων έχει ελάχιστες συγκεντρώσεις κάτω από 320 Bq/m³, μία τιμή που βρίσκεται οριακά εντός των επιτρεπτών ορίων από την Ε.Ε (300 Bq/m³). Τέλος, παρατηρείται ότι 7 μεταλλευτικοί χώροι έχουν συγκέντρωση πάνω από 1000 Bq/m³, γεγονός που θα έπρεπε να οδηγήσει στη λήψη προστατευτικών μέτρων από τα αντίστοιχα ορυχεία, προκειμένου να εξασφαλιστεί η υγεία τόσο των εργαζόμενων όσο και των επισκεπτών σε αυτά.

Bq/m ³	Λογαριθμική συγκέντρωση	Αριθμός ορυχείων
0 έως 1	0	0
1 έως 3	0,48	1
3 έως 30	1,48	8
30 έως 100	2	8
100 έως 320	2,51	7
320 έως 1.000	3	12
1.000 έως 3.000	3,51	3
3.000 έως 10.000	4	1
10.000 έως 100.000	4,51	2
100.000>	5	1

Πίνακας 4.6: Ομαδοποίηση ελάχιστων συγκεντρώσεων ραδονίου στα υπόλοιπα ορυχεία

4.5 Μέτρα και προστασία από το ραδόνιο

Η έκθεση στο ραδόνιο αποτελεί μια σημαντική συνιστώσα της συνολικής έκθεσης του πληθυσμού και των εργαζομένων σε ιοντίζουσες ακτινοβολίες και ιδιαίτερα σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές και σε συγκεκριμένους τύπους χώρων εργασίας. Είναι επιστημονικά τεκμηριωμένο ότι το ραδόνιο του αέρα των εσωτερικών χώρων είναι υπεύθυνο για το μεγαλύτερο ποσοστό της φυσικής έκθεσης σε ιοντίζουσα ακτινοβολία. Όταν εισπνέεται για μεγάλο χρονικό διάστημα αέρας με μεγάλες συγκεντρώσεις ραδονίου, μπορεί να προκαλέσει, όπως έχει προαναφερθεί, καρκίνο του πνεύμονα. Επιπλέον, οι επιστήμονες έχουν παρατηρήσει μια αλληλεπίδραση του καπνίσματος με το ραδόνιο. Συγκεκριμένα, το κάπνισμα πολλαπλασιάζει τον κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα σε ένα περιβάλλον με υψηλή συγκέντρωση ραδονίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι στον ελληνικό χώρο εμφανίζονται περίπου 7.000 περιπτώσεις καρκίνου του πνεύμονα ανά έτος. **Εκτιμάται ότι το 5-10%**

των καρκίνων αυτών οφείλεται στο ραδόνιο (350-700 άνθρωποι ανά έτος) (ΦΕΚ Β' 1881/18.05.2020).

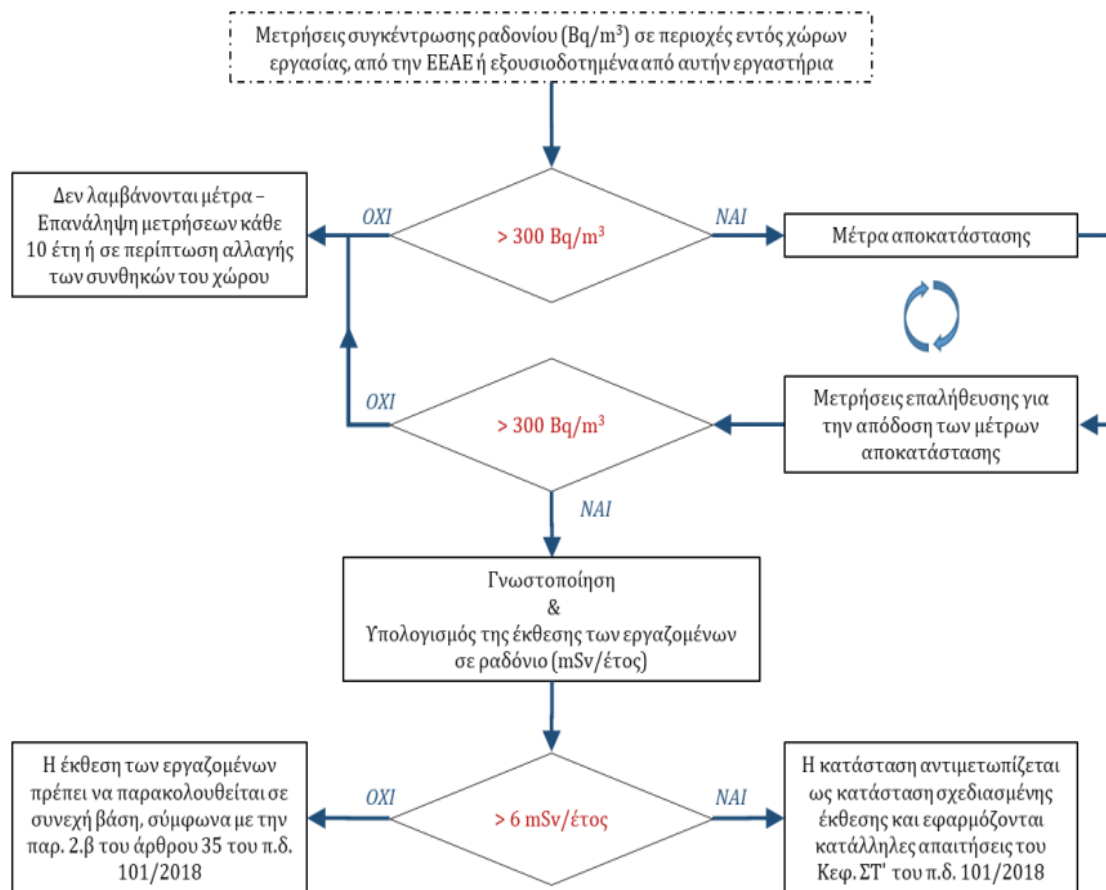
Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η μέτρηση και ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης καθώς και της δόσης ραδονίου, στους χώρους εργασίας, είναι ζωτικής σημασίας. Οι χώροι εργασίας στους οποίους είναι υποχρεωτικός ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης ραδονίου κατηγοριοποιούνται ως ακολούθως (ΦΕΚ Β' 1881/18.05.2020):

a) χώροι εργασίας προτεραιότητας και

b) χώροι εργασίας και χώροι σε κτίρια με δημόσια πρόσβαση σε «περιοχές προτεραιότητας».

Στους χώρους εργασίας προτεραιότητας εντάσσονται συγκεκριμένες, ειδικές περιπτώσεις χώρων εργασίας, όπως ορυχεία, τουριστικά σπήλαια, ιαματικά λουτρά, καθώς και οι βιομηχανικοί τομείς στους οποίους ενδέχεται να υπάρχουν υλικά με αυξημένες συγκεντρώσεις της σειράς του ουρανίου, ενώ στους χώρους εργασίας σε «περιοχές προτεραιότητας», εντάσσονται οι οργανισμοί που χρησιμοποιούν ισόγειους και υπόγειους χώρους εργασίας και βρίσκονται εντός «περιοχής προτεραιότητας».

Στην εθνική νομοθεσία (π.δ. 101/2018, ΦΕΚ 194/Α) έχει καθοριστεί εθνικό επίπεδο αναφοράς για τις συγκεντρώσεις ραδονίου εντός κτιρίων και σε χώρους εργασίας ίσο με 300 Bq/m^3 . Η παρουσία ραδονίου σε χώρους εργασίας, όπου αυτό εισέρχεται από το έδαφος, θεωρείται κατάσταση ζωτικής σημασίας. Στην παρακάτω Εικόνα 4.1 δίνεται διάγραμμα ροής για τις δράσεις που λαμβάνονται σε χώρους εργασίας με υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου.



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας μετρήσεων, υπολογισμού και γνωστοποίησης της έκθεσης των εργαζομένων, (ΕΕΑΕ, 2020)

Σε περίπτωση υπέρβασης των ορίων, σε οποιαδήποτε χώρα, κρίνεται αναγκαίο να ληφθούν μέτρα αποκατάστασης. Αυτά τα μέτρα μπορεί να είναι τεχνικά μέτρα αποκατάστασης ή λειτουργικά μέτρα προστασίας των εργαζομένων, όπως ενδεικτικά η μείωση του χρόνου παραμονής στους χώρους με υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου. Τα μέτρα αυτά σε συνδυασμό με τα είδη των χώρων εργασίας (εστιάζοντας φυσικά στα ορυχεία που είναι και το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής) που ενδέχεται να παρουσιάσουν αυξημένες συγκεντρώσεις ραδονίου, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

	Κτίρια γραφείων, σχολείων κλπ.	Κέντρα θερμαλισμού (Spa)	Εγκαταστάσεις διύλισης υπόγειων υδάτων	Διάνοιξη σηράγγων σε ουρανιούχα πετρώματα	Τουριστικά σπήλαια	Ορυχεία
Φυσικός εξαερισμός με άνοιγμα των παραθύρων ανά τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. σε κάθε διάλειμμα)	***	**	**	*	*	*
Μηχανικά Συστήματα Εξαερισμού	***	**	**	**	*	**
Ολιγόλεπτη αναμονή πριν την είσοδο για τον εξαερισμό του χώρου	*	***	***	*	*	*
Ακριβής επισήμανση των πηγών ραδονίου στον χώρο	**	***	***	**	**	**
Προγραμματισμός του χρόνου παραμονής ανάλογα με τις επιτοκικές διακυμάνσεις της συγκέντρωσης	*	**	**	*	***	***

Πίνακας 4.7: Γενική εκτίμηση της απόδοσης των μέτρων μείωσης συγκεντρώσεων ραδονίου για διάφορα είδη χώρων εργασίας. *=μικρή απόδοση ή δεν εφαρμόζεται, **= μέτρια απόδοση, ***= αυξημένη απόδοση, (ΕΕΑΕ, 2020)

Τα τεχνικά αυτά μέτρα αποδίδουν καλύτερα στους περισσότερους υπέργειους χώρους εργασίας. Ωστόσο σε περιπτώσεις υπόγειων χώρων εργασίας, όπως αυτή των μεταλλευτικών χώρων, τεχνικά μέτρα αποκατάστασης ενδέχεται να μην αποδώσουν την επιθυμητή μείωση των συγκεντρώσεων ραδονίου.

Επιπροσθέτως, τα προγράμματα προστασίας και ασφάλειας που καταρτίζονται από διάφορους οργανισμούς, συστήνουν και περιλαμβάνουν στόχους και κατάλληλες διαδικασίες με μέτρα όπως:

- η ενημέρωση των εργαζομένων αναφορικά με τους ραδιολογικούς κινδύνους,
- η ραδιολογική επιτήρηση και η οριοθέτηση των χώρων εργασίας,
- η εκτίμηση των δόσεων των εργαζομένων στους χώρους εργασίας,
- η τήρηση αρχείου σχετικά με την ατομική παρακολούθηση της δόσης των εργαζομένων
- οι οδηγίες ακτινοπροστασίας και ασφάλειας, όπως ενδεικτικά: (α) η τήρηση χρονικών ορίων παραμονής των εργαζομένων στις Ελεγχόμενες Περιοχές ²¹, (β) η συντήρηση του συστήματος

²¹ Ως «Ελεγχόμενες Περιοχές» εννοούνται οι χώροι αυτοί που βρίσκονται στην πρώτη γραμμή του Πίνακα 4.1

εξαερισμού, ή άλλων μηχανολογικών εγκαταστάσεων των μέτρων αποκατάστασης (ΕΕΑΕ,2020).

Αρχικά η ενημέρωση των εργαζομένων πριν προσληφθούν, για την έκθεση στο ραδόνιο, τους συνεπαγόμενους κινδύνους, καθώς και τις διαδικασίες και τα μέτρα ακτινοπροστασίας που έχουν ληφθεί, αποτελεί βασικό κομμάτι του προγράμματος προστασίας και ασφάλειας. Επιπλέον, η κατάρτισή τους ανά τακτά χρονικά διαστήματα π.χ. ανά τριετία, στοχεύει στο να αποκτηθεί από τους εργαζόμενους μια γενικότερη νοοτροπία ασφάλειας.

Στη συνέχεια, η ραδιολογική επιτήρηση και εκτίμηση δόσεων βασίζονται σε μετρήσεις των συγκεντρώσεων ραδονίου από εργαστήρια. Οι μετρήσεις προτείνεται να επαναλαμβάνονται κατ' ελάχιστον κάθε τριετία για τις «Ελεγχόμενες Περιοχές», με τη συχνότητα επανάληψης των μετρήσεων να καθορίζεται από τις συνθήκες χρήσης και τις ιδιαιτερότητες στις μεταβολές της συγκέντρωσης ραδονίου του εκάστοτε χώρου. Η τοποθέτηση σήμανσης στις εισόδους των «Ελεγχόμενων Περιοχών» που προειδοποιεί για την ελεγχόμενη πρόσβαση και ο περιορισμός του χρόνου παραμονής των εργαζομένων ή/και η συστηματική λειτουργία κατάλληλου εξαερισμού, αποτελούν λειτουργικά μέτρα προστασίας των εργαζομένων.

Τέλος, η ατομική παρακολούθηση, η οποία περιλαμβάνει την περιγραφή του συστήματος ατομικής παρακολούθησης των εργαζομένων, όσον αφορά την έκθεσή τους στο ραδόνιο, και το αρχείο δόσεων με τα αποτελέσματα της ατομικής παρακολούθησης των εργαζομένων, θα πρέπει να εκτιμάται, ενδεικτικά ανά τρίμηνο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

Βάρνης, Γ. (2016). Μετρήσεις της συγκέντρωσης ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους και φυσική ραδιενέργεια σε εδάφη του νομού Καστοριάς. Διπλωματική εργασία Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Θεσσαλονίκη.

Γεωργίου, Δ. (2004). Μετρήσεις ραδονίου σε σχολεία της Λέσβου. Πτυχιακή εργασία Τμήματος Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.

Ελληνική Επιτροπή Ατομική Ενέργειας (2005). Ραδόνιο [Εγχειρίδιο], Αθήνα, 2005.

Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (2020). Ε.Ε.Α.Ε., Κατευθυντήριες οδηγίες για έκθεση εργαζομένων στο ραδόνιο, 2020.

Κασινάλης, Χ. (2008). Μέθοδος in situ μετρήσεις ραδονίου στο νερό Αξιολόγηση της μεθόδου και εφαρμογή της στη μέτρηση ραδονίου σε πηγή μεταλλικού νερού. Διπλωματική εργασία Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

Νικολόπουλος, Δ. Ν. (2000). Μελέτη της έκθεσης του ελληνικού πληθυσμού στο ραδόνιο-222. Διδακτορική διατριβή εργαστηρίου ιατρικής φυσικής, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.

Νικολόπουλος, Δ., Κόττου, Σ., Γιαννακόπουλος, Π. (2015). *Ακτινοβολίες περιβάλλοντος και άνθρωπος*. Αθήνα: Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα. Κεφ. 3.

Οδηγία 2013/59/Ευρατόμ του συμβουλίου, της 5ης Δεκεμβρίου 2013, για τον καθορισμό βασικών προτύπων ασφαλείας για την προστασία από τους κινδύνους που προκύπτουν από ιοντίζουσες ακτινοβολίες και την κατάργηση των οδηγιών 89/618/Ευρατόμ, 90/641/Ευρατόμ, 96/29/Ευρατόμ, 97/43/Ευρατόμ και 2003/122/Ευρατόμ.

Οδηγία 96/29/Ευρατόμ του συμβουλίου, της 31ης Μαΐου 1996, για τον καθορισμό των βασικών κανόνων ασφάλειας για την προστασία της υγείας των εργαζομένων και του πληθυσμού από τους κινδύνους που προκύπτουν από ιοντίζουσες ακτινοβολίες.

Παπαδοπούλου, Α. Α. (2011). Φυσική ραδιενέργεια σε σχέση με την ορυκτολογία, γεωχημεία ουρανίου και θορίου μαγματικών πετρωμάτων από τον ελλαδικό χώρο: συμβολή στη χρήση φυσικών

δομικών υλικών. Διδακτορική διατριβή Τμήματος Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

Πατήρης, Λ. Δ. (2009). Μελέτη της συμπεριφοράς των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα. Διδακτορική διατριβή Τμήματος Φυσικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιωάννινα.

Σεφτελής, Ι. Β. (2007). Μεταβολές της συγκέντρωσης του ραδονίου και των θυγατρικών του στον υπαίθριο επιφανειακό αέρα. Διδακτορική διατριβή Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη.

Σωτηροπούλου, Μ. (2008). Μοντελοποίηση και μέτρηση διάχυσης ραδονίου στο κτήριο Ξενία Β. Μεταπτυχιακή εργασία Τμήματος Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.

Τομέ, Δ. (2018). Συγκριτική αξιολόγηση και αξιοποίηση μεθοδολογιών μέτρησης συγκέντρωσης ραδονίου σε σπήλαια. Διπλωματική εργασία Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Τσίππρας, Κ. Σ. (2010). Το Ραδόνιο. <https://www.tsipiras.gr/index.php/olistiki-arxitektoniki/2012-08-19-15-23-28>.

Τσουκαλά, Δ. Α. (2013). Μετρήσεις ραδονίου και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων σε σπήλαια και ζώνες ρηγματών στην Κρήτη. Διπλωματική εργασία Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

ΦΕΚ 1103/Β'/03.04.2019. Διαδικασίες κανονιστικού ελέγχου πρακτικών ιοντιζουσών ακτινοβολιών - αναγνώριση υπηρεσιών και εμπειρογνωμόνων.

ΦΕΚ 1881/Β'/18.05.2020. Εθνικό σχέδιο δράσης για την αντιμετώπιση των μακροπρόθεσμων κινδύνων από την έκθεση στο ραδόνιο.

ΦΕΚ 194/Α'/20.11.2018. 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) - Θέσπιση Κανονισμών Ακτινοπροστασίας.

Διεθνής

Ahmad N., Nasir T., Rehman J., Ullah H., Uddin Z. (2019). Risk assessment of radon in soil collected from chromite mines of Khanozai and Muslim Bagh, Balochistan, Pakistan. *Environmental Technology & Innovation*, Volume 16, 100476.

- Anjos R.M., Umisedo N., da Silva A.A.R., Estellita L., Rizzotto M., Yoshimura E.M., Velasco H., Santos A.M.A. (2010). Occupational exposure to radon and natural gamma radiation in the La Carolina, a former gold mine in San Luis Province, Argentina. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 101, 153–158.
- Ayres da Silva A. L. M., Eston S. M., Iramina W. S., Francisca D. D. (2018). Radon in Brazilian underground mines. *Journal of Radiological Protection*, 38, 607–620 (14pp).
- Baldık R., Aytekin H., Celebi N., Ataksor B., Tasdelen M. (2006). Radon Concentration Measurements In The Amasra Coal Mine, Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*, 118(1), 122–125.
- Baloch M. A., Qureshi A. A., Waheed A., Ali M., Ali N., Tufail M., Batool S., Akram M., Iftikhar P., Qayyum H., Manzoor S. and Khan H. A. (2012). A Study on Natural Radioactivity in Khewra Salt Mines, Pakistan. *Journal of Radiation Research*, 53, 411–421.
- Bekteshi S., Kabashi S., Ahmetaj S., Xhafa B., Hodolli G., Kadiri S., Alijaj F., Abdullahu B. (2017). Radon concentrations and exposure levels in the Trepça underground mine: A comparative study. *Journal of Cleaner Production*, Volume 155, Part 1, Pages 198-203.
- Breslin A. J., George A. C., Weinstein M. S. (1969). Investigation Of The Radiological Characteristics Of Uranium Mine Atmospheres. *HEALTH AND SAFETY* (TID-4500).
- Calin M. R., Calin M. A. (2011). Investigations on the presence and distribution of radon in the Cacica salt mine, Romania. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 288:203–206.
- Calin M. R., Zoran M., Calin M. A. (2012). Radon levels assessment in some Northern Romanian salt mines. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 293:565–572.
- Chen J. and Harley N. H. (2020). A Review of Radon Equilibrium Factors in Underground Mines, Caves, and Thermal Spas. *Health Physics Society*, 119 (3), 342-350.
- Çile S., Altinsoy N., Çelebi N. (2010). Radon Concentrations In Three Underground Lignite Mines In Turkey. *Radiation Protection Dosimetry*, 138(1), 78–82.
- Cosma C., Dicu T., Szacsvai K., Begy R., Cosma V., Bordeanu C., Margineanu R. (2012). Radon measurements in Romanian salt mines. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 293(2).
- Da Silva A. A. R., Valladares D. L., Anjos R. M., Velasco H., Rizzotto M., Yoshimura E. M. (2011). Assessment the Health Hazard from ^{222}Rn in Old Metalliferous Mines in San Luis, Argentina. *Water Air Soil Pollut*, 218:371–386.

- Doyi I., Oppon O.C., Glover E.T., Gbeddy G., Kokroko W. (2013). Assessment of occupational radiation exposure in underground artisanal gold mines in Tongo, Upper East Region of Ghana. *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 126, Pages 77-82.
- Duggan M. J., Howell D. M., Soilleux P. J. (1968). Concentrations of Radon-222 in Coal Mines in England and Scotland. *Nature*, Vol. 219, pp. 1149.
- Esmailnezhad M., Ghergherehchi M., Afarideh H., Durrani S.A. (2013). Alpha activity measurements in Anarak copper mine. *Radiation Measurements*, Volume 50, Pages 223-227.
- Evans R. D., Harley J. H., Jacobi W., McLean A. S., Mills W. A., Stewart C. G. (1981). Estimate of risk from environmental exposure to radon-222 and its decay products. *Nature*, Vol. 290, 98-100.
- Fan D., Zhuo W. and Zhang Y. (2016). Occupational exposure to radon in different kinds of non-uranium mines. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 170, No. 1–4, pp. 311–314.
- Fijałkowska-Lichwa L. (2014). Short-term radon activity concentration changes along the Underground Educational Tourist Route in the Old Uranium Mine in Kletno (Sudety Mts., SW Poland). *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 135, 25-35.
- Fijałkowska-Lichwa L. (2016). Extremely high radon activity concentration in two adits of the abandoned uranium mine 'Podgorze' in Kowary (Sudety Mts., Poland). *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 165, 13-23.
- Fijałkowska-Lichwa L., Przylibski T. A. (2011). Short-term ^{222}Rn activity concentration changes in underground spaces with limited air exchange with the atmosphere. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 11, 1179–1188.
- Fisne A., Okten G., Celebi N. (2005). Radon Concentration Measurements In Bituminous Coal Mines. *Radiation Protection Dosimetry*, 113 (2), 173–177.
- Furuta S., Ito K., Ishimori Y. (2002). Measurements of radon around closed uranium mines. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 62, 97–114.
- Futas M., Gombala E. (1998). Radon in workplaces- Application of new Slovak legislation. *Radiation Hygiene Days*, 250, p. 222-224.
- Galhardi J. A., Bonotto D. M. (2017). Radionuclides (^{222}Rn , ^{226}Ra , ^{234}U , and ^{238}U) Release in Natural Waters Affected by Coal Mining Activities in Southern Brazil. *Water Air Soil Pollut*, 228: 207.

Gillmore G. K., Grattan J., Pyatt F. B., Phillips P. S., Pearce G. (2002). Radon, water and abandoned metalliferous mines in the UK: Environmental and Human Health implications. *Uranium in the Aquatic Environment*, 65-76.

Gillmore G. K., Phillips P., Denman A., Sperrin M., Pearce G. (2001). Radon Levels in Abandoned Metalliferous Mines, Devon, Southwest England. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 49, 281-292.

Gillmore G., Gharib H. A., Denman A., Phillips P., Bridge D. (2011). Radon concentrations in abandoned mines, Cumbria, UK: safety implications for industrial archaeologists. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 11, 1311–1318.

Grattan J.P., Gillmore G.K., Gilbertson D.D., Pyatt F.B., Hunt C.O., McLaren S.J., Phillips P.S., Denman A. (2004). Radon and ‘King Solomon’s Miners’: Faynan Orefield, Jordanian Desert. *The Science of the Total Environment*, Vol. 319, 99–113.

Gruber V., Ringer W., Graser J., Aspek W., Gschnaller J. (2014). Comprehensive Investigation Of Radon Exposure In Austrian Tourist Mines And Caves. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 162, No. 1–2, pp. 78–82.

Hassan M., Eid E., Helal N., Abdel-Moneim R. and Hussien M. E. (2020). Detection of Radon, Radon Daughters and Thoron Daughters in Abu Tartur Open Pit Phosphate Mine, Egypt. *Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications*, 53 (1), 182-190.

Hodolli G., Bekteshi S., Kadiri S., Xhafa B., Dollani K. (2015). Radon concentration and gamma exposure in some Kosovo underground mines. *International Journal of Radiation Research*, 13(4): 369-372.

Ishimori Y. (2007). Time-integrated monitoring of radon progeny around a closed uranium mine in Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 93, 51-61.

Jakupi B., Krstic G., Tonic M. and Ilic R. (1997). Radon in mines and dwellings in Kosovo and Metohia. *Radiation Measurements*, Vol. 28, Nos 1-6, pp. 691-694.

Jamil K., Ali S. (2001). Estimation of radon concentrations in coal mines using a hybrid technique calibration curve. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 54, 415–422.

Kang J. K., Seo S., Jin Y. W. (2019). Health Effects of Radon Exposure. *Yonsei Medical Journal*, 60(7):597-603.

Kávási N., Somlai J., Vigh T., Tokonami S., Ishikawa T., Sorimachi A., Kovács T. (2009). Difficulties in the dose estimate of workers originated from radon and radon progeny in a manganese mine. *Radiation Measurements*, Vol. 44, 300–305.

Kávási N., Vigh T., Kovács T., Vaupotic J., Jobbágy V., Ishikawa T., Yonehara H. (2011). Dose estimation and radon action level problems due to nanosize radon progeny aerosols in underground manganese ore mine. *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 102, Issue 9, Pages 806-812.

Kleinschmidta R., Watsona D., Janikb M., Gillmore G. (2018). The presence and dosimetry of radon and thoron in a historical, underground metalliferous mine. *Journal of Sustainable Mining*, Volume 17, Issue 3, Pages 120-130.

Kobal I., Vaupoti J., Udov H., Burger J., Stropnik B. (1990). Radon concentrations in the air of Slovene (Yugoslavia) underground mines. *Environment International*, Vol. 16, pp. 171-173.

Lawrence C. E., Akber R. A., Bollhofer A., Martin P. (2009). Radon-222 exhalation from open ground on and around a uranium mine in the wet-dry tropics. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 100, 1–8.

Mahur A.K., Kumar R., Sonkawade R.G., Sengupta D., Prasad R. (2008). Measurement of natural radioactivity and radon exhalation rate from rock samples of Jaduguda uranium mines and its radiological implications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Vol. 266, 1591–1597.

Miles J. (2004). Methods of radon measurements and devices. *National Radiological Protection Board*.

Moshupya P., Abiye T., Mouri H., Levin M., Strauss M. and Strydom R. (2019). Assessment of Radon Concentration and Impact on Human Health in a Region Dominated by Abandoned Gold Mine Tailings Dams: A Case from the West Rand Region, South Africa. *Geosciences*, Vol. 9, 466.

Mudd G. M. (2008). Radon sources and impacts: a review of mining and non-mining issues. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, Vol. 7, 325–353.

Nhan D. D., Carvalho P. F., Ha N. T. T., Long N. Q., Thuan D. D., Fonseca H. (2012). Radon (^{222}Rn) concentration in indoor air near the coal mining area of Nui Beo, North of Vietnam. *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 110, Pages 98-103.

Othman I., Al-Hushari M., Raja G. (1992). Radiation exposure levels in phosphate mining activities. *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 45 No. 1/4 pp. 197-201.

Panigrahi D. C., Mishra D. P., Sahu P., Bhowmik S. C. (2015). Assessment of radiological parameters and radiation dose received by the miners in Jaduguda uranium mine, India. *Annals of Nuclear Energy*, Volume 78, 33-39.

- Panigrahi D. C., Sahu P., Mishra D. P. (2015). An improved mathematical model for prediction of air quantity to minimize radiation levels in underground uranium mines. *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 140, 95-104.
- Panigrahi D. C., Sahu P., Mishra D. P. (2018). Assessment to ^{222}Rn and gamma exposure of the miners in Narwaphar underground uranium mine, India. *Radiation Physics and Chemistry*, Volume 151, 225-231.
- Pohuliai S., Sokolov A., Gostilo V., Joutsenvaara J., Puputti J. (2020). Measurements of gamma-ray background radiation in Pyhasalmi mine. *Applied Radiation and Isotope*, Volume 161, 109166.
- Portola V. A., Torosyan E. S., Antufeyev V. K. (2016). Radon Emission from Coal Mines of Kuzbass Region. *Materials Science and Engineering*, Vol. 127.
- Przylibski T. A. (2001). Radon and its daughter products behavior in the air of an underground tourist route in the former arsenic and gold mine in Złoty Stok (Sudety Mountains, SW Poland). *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 57, 87–103.
- Qin G., Liu Y., Wang Q., Li F., Li W., Wu H. (2020). Investigation And Analysis Of Environmental Radioactivity Levels At Typical Uranium Mines In The South Of China. *Radiation Protection Dosimetry*, 189 (3), 337–346.
- Qureshi A.A., Kakar D.M., Akram M., Khattak N.U., Tufail M., Mehmood K., Jamil K., Khan H.A. (2000). Radon concentrations in coal mines of Baluchistan, Pakistan. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 48, 203-209.
- Raghavendra T., Ramakrishna S.U.B., Vijayalakshmi T., Himabindu V., Arunachalam J. (2014). Assessment of radon concentration and external gamma radiation level in the environs of the proposed uranium mine at Peddagattu and Seripally regions, Andhra Pradesh, India. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7(3), 269-273.
- Reddy. (2000). Radon and its progeny levels in coal mines of Kothagudem. *Indian Journal Of Environmental Protection*, 20(11), 816-820.
- Sahu P., Mishra D. P., Panigrahi D. C., Jha V., Patnaik R. L. (2013). Radon emanation from low-grade uranium ore. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 126, 104-114.
- Sahu P., Panigrahi D. C., Mishra D. P. (2014). Sources Of Radon And Its Measurement Techniques In Underground Uranium Mines – An Overview. *Journal of Sustainable Mining*, 13(3), 11–18.

Sahu P., Panigrahi D. C., Mishra D. P. (2015). Emanation of Radon In underground uranium mines - an overview. *Journal of Mines, Metals & Fuels*, 63(3), 45-49.

Sahu P., Panigrahi D. C., Mishra D. P. (2015). Evaluation of effect of ventilation on radon concentration and occupational exposure to radon daughters in low ore grade underground uranium mine. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 303, 1933–1941.

Saleh G. M., Yousef H. A., Mitwalli M. S., El-Farrash A. H. (2019). Environmental Radioactivity of Radon and its Hazards in Hamash Gold Mine, Egypt. *Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications*, 52 (4), 190-196.

Santos T.O., Rocha Z., Vasconcelos V., Lara E.G., Palmieri H.E.L., Cruz P., Gouvea V.A., Siqueira J.B., Oliveira A.H. (2015). Evaluation of natural radionuclides in Brazilian underground mines. *Radiation Physics and Chemistry*, Volume 116, 377-380.

Shahrokhi A., Kocsis E., Vigh T., Németh Cs., Kovács T. (2016). *Radon measurements and dose assessment of underground miners. Focus on new Eu-BSS and Hungarian legislation*. Veszprém : Social Organization for Radioecological, pp.20.

Shahrokhia A., Vighb T., Némethd C., Csordása A., Kovácsa T. (2017). Radon measurements and dose estimate of workers in a manganese ore mine. *Applied Radiation and Isotopes*, Volume 124, Pages 32-37.

Solomon S., Johnston A., Tate B., Fuller S., Borysenko A., Kruss D. (2018). Assessment of radon progeny dose conversion factors from measurements in the underground uranium mine at Olympic Dam. *Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency*, Technical Report 179.

Song Z., Kuenzer C. (2014). Coal fires in China over the last decade: A comprehensive review. *International Journal of Coal Geology*, Volume 133, 72-99.

Tait D. R., Maher D. T., Santos I. R. (2015). Seasonal and Diurnal Dynamics of Atmospheric Radon, Carbon Dioxide, Methane, $\delta^{13}\text{C}$ -CO₂ and $\delta^{13}\text{C}$ -CH₄ in a Proposed Australian Coal Seam Gas Field. *Water Air Soil Pollut*, 226: 350.

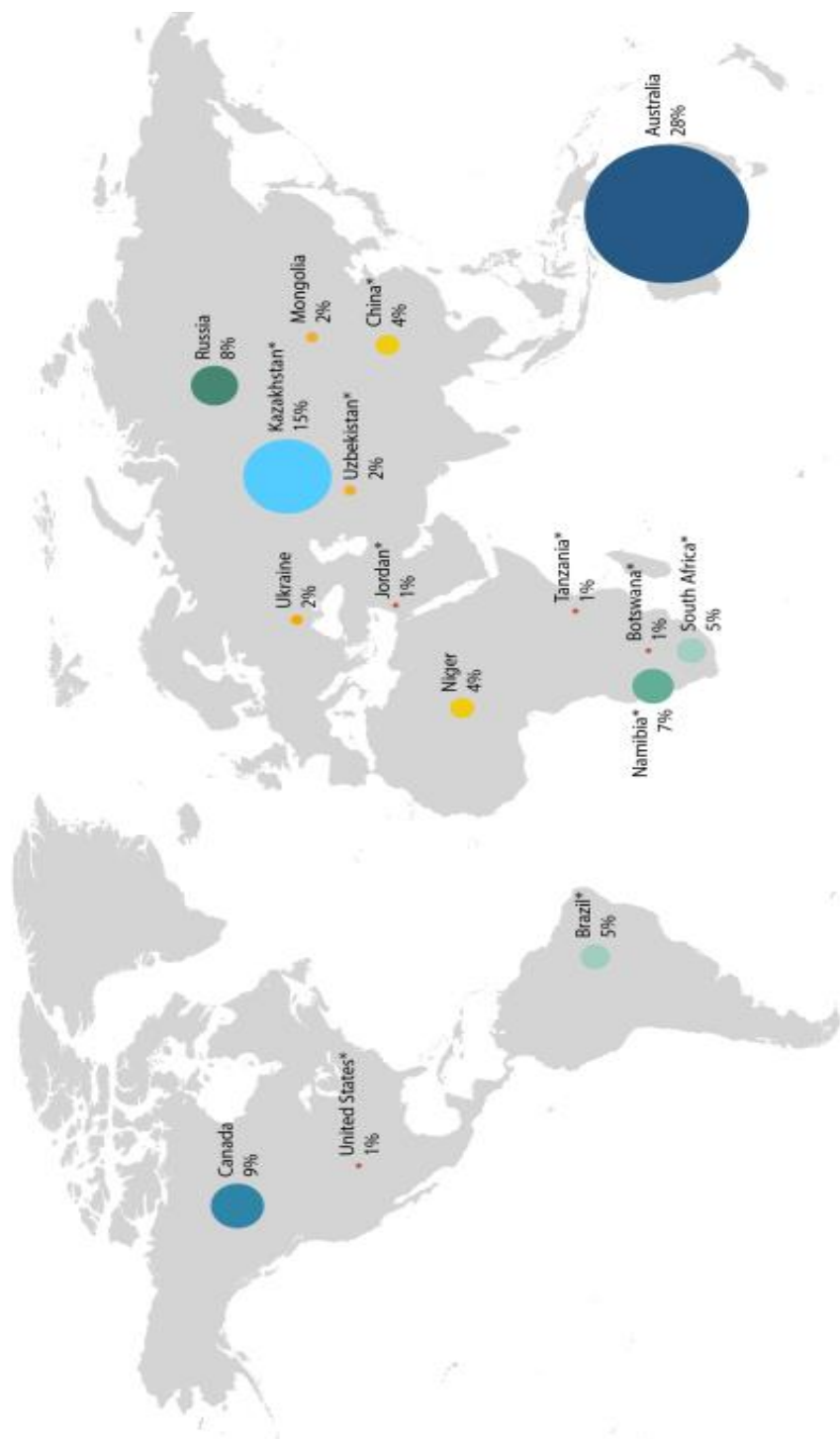
Tchorz-Trzeciakiewicz D. E., Parkitny T. (2015). Radon as a tracer of daily, seasonal and spatial air movements in the Underground Tourist Route “Coal Mine” (SW Poland). *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 149, 90-98.

Tresnjo Z., Adrovic J., Hankic E. (2017). *Levels of Radon Activity Concentration and Gamma Dose Rate in Air of Coal Mines in Bosnia and Herzegovina*. IntechOpen. Chap. 5. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.69903>.

- Tripathi R.M., Sahoo S.K., Jha V.N., Khan A.H., Puranik V.D. (2008). Assessment of environmental radioactivity at uranium mining, processing and tailings management facility at Jaduguda, India. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 66, 1666–1670.
- Tufail M., Matiullah, Ali A., Orfi S.D., Qureshi A.A., Hussain G., Khan H.A. (1988). Radon Measurements In Coal Mines Using Polymeric Nuclear Track Detectors. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*. Vol. 15, Nos. 1-4, pp. 655-658.
- Ullaha K., Khattaka N.U., Qureshi A.A., Akram M., Khan H.A., Nisar A. (2005). Search for Uranium Source in Warcha Sandstone, Salt Range, Pakistan, using SSNTD Technique. *Radiation Measurements*, Vol. 40, 491 – 495.
- UNSCEAR. (1993). *Sources, effects and risks of ionizing radiation*. New York: United Nations.
- UNSCEAR. (2000). *Sources, effects and risks of ionizing radiation*. New York: United Nations.
- UNSCEAR. (2006). *Sources, effects and risks of ionizing radiation*. New York: United Nations.
- Veiga L.H.S., Melo V., Koifman S., Amaral E.C.S. (2004). High radon exposure in a Brazilian underground coal mine. *Journal Of Radiological Protection*, Vol. 24, 295–305.
- Wang N., Hu M., Zeng W., Yu C., Jia B., Yang Z. (2020). Indoor and outdoor ^{222}Rn and ^{220}Rn and their progeny levels surrounding Bayan Obo mine, China. *Nukleonika*, 65(2):145-148.
- Wołoszczuk K., Skubacz K.. (2018). Particle size distribution of the radon progeny and ambient aerosols in the Underground Tourist Route "Liczyrzepa" Mine in Kowary Adit. *Air Protection in Theory and Practice*, Volume 28, 8
- Wysocka M., Skubacz K., Chmielewska I., Urban P., Bonczyk M. (2019). Radon migration in the area around the coal mine during closing process. *International Journal of Coal Geology*, Volume 212, 103253.
- Zhao G., Hong C., Li X., Lin C., Hu P. (2016). Predictive analysis of shaft station radon concentrations in underground uranium mine: A case study. *Journal of Environmental Radioactivity*, Volumes 158–159, 129-137.
- Zhou Q., Liu S., Xu L., Zhang H., Xiao D., Deng J., Pan Z. (2019). Estimation of radon release rate for an underground uranium mine ventilation shaft in China and radon distribution characteristics. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 198, 18-26.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ

Α₁ : Παγκόσμια κατανομή των αναγνωρισμένων πόρων ουρανίου, (ΙΑΕΑ, 2020)



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΠΙΝΑΚΕΣ

B₁ : Αναγνωρισμένοι ανακτήσιμοι πόροι (από την 1η Ιανουαρίου 2019, τόνοι U, στρογγυλοποιημένοι στους πλησιέστερους 100 τόνους), (ΙΑΕΑ, 2020)

Country	Cost ranges			
	<USD 40/kgU	<USD 80/kgU	<USD 130/kgU	<USD 260/kgU
Algeria ^(c,d)	0	0	0	19 500
Argentina	2 400	17 900	38 700	39 800
Australia	NA	NA	1 692 700	2 049 400
Botswana*	0	0	87 200	87 200
Brazil ^(d)	138 100	229 400	276 800	276 800
Canada	260 500	269 500	564 900	873 000
Central African Republic ^{*(a,c)}	0	0	32 000	32 000
Chad ^{*(a,c,d,e)}	0	0	0	2 400
Chile	0	0	0	1 400
China ^(d)	86 000	154 200	248 900	269 700
Congo, Dem. Rep. of ^{*(a,c,d)}	0	0	0	2 700
Czech Republic	0	0	900	119 200
Egypt ^(d)	0	0	400	1 900
Finland ^(c,d)	0	0	1 200	1 200
Gabon ^(a,c)	0	0	4 800	5 800
Germany ^(c)	0	0	0	7 000
Greece ^(a,c)	0	0	0	7 000
Greenland ^(d)	0	0	0	114 000
Hungary ^(c,d)	0	0	0	13 500
India ^(d,e)	NA	NA	NA	195 900
Indonesia ^(b,d)	0	1 500	8 400	8 400
Iran, Islamic Republic of ^(b,d)	0	0	7 500	7 500
Italy ^(a,c)	0	6 100	6 100	6 100
Japan ^(a,c)	0	0	6 600	6 600
Jordan ^(d)	0	0	52 500	52 500
Kazakhstan ^(d)	530 600	720 200	906 800	969 200
Malawi*	0	0	6 200	14 300
Mali ^{*(d)}	0	0	8 900	8 900
Mauritania*	0	0	17 100	24 500
Mexico ^(d)	0	0	3 700	5 000
Mongolia	0	60 000	143 500	143 500
Namibia*	0	0	448 300	504 200
Niger	0	9 900	276 400	439 400
Paraguay*	0	0	0	3 600
Peru ^(a,d)	0	33 400	33 400	33 400
Portugal ^(c)	0	4 500	7 000	7 000
Romania ^{*(a,c)}	0	0	6 600	6 600
Russia ^(b)	0	38 000	486 000	661 900
Senegal ^(d)	0	0	0	1 100
Slovak Republic ^(a,b,d)	0	12 700	15 500	15 500
Slovenia ^(c,d)	0	5 400	9 200	9 200
Somalia ^{*(a,c,d)}	0	0	0	7 600
South Africa*	0	228 000	320 900	447 700
Spain ^(d,f)	8 100	28 500	28 500	28 500
Sweden ^{*(c,d)}	0	0	9 600	9 600
Tanzania ^{*(b)}	0	46 800	58 200	58 200
Turkey ^(b,d)	0	0	12 500	13 600
Ukraine	0	72 900	108 700	186 900
United States ^(d)	0	13 900	47 900	101 900
Uzbekistan*	54 800	54 800	132 300	132 300
Viet Nam ^(d)	0	0	0	3 900
Zambia*	0	0	31 000	31 000
Zimbabwe ^(a,c, d)	0	0	0	1 400
Total ^(d)	1 080 500	2 007 600	6 147 800	8 070 400

B₂ : Αναγνωρισμένοι πόροι «in situ» (από την 1η Ιανουαρίου 2019, τόνοι U, στρογγυλοποιημένοι στους πλησιέστερους 100 τόνους), (ΙΑΕΑ, 2020)

Country	Cost ranges			
	<USD 40/kgU	<USD 80/kgU	<USD 130/kgU	<USD 260/kgU
Algeria ^(c)	0	0	0	26 000
Argentina ^(d)	3 400	24 800	54 000	54 600
Australia ^(b)	NA	NA	2 540 500	2 934 200
Botswana ^{*(d)}	0	0	140 600	140 600
Brazil	184 300	314 600	382 300	382 300
Canada ^(d,f)	298 400	308 700	647 100	1 000 000
Central African Republic*	0	0	42 700	42 700
Chad ^{*(a,e)}	0	0	0	3 200
Chile ^(d)	0	0	0	1 900
China	107 900	192 600	316 300	344 000
Congo, Dem. Rep. of ^{*(a,c)}	0	0	0	3 600
Czech Republic ^(d)	0	0	1 400	197 400
Egypt	0	0	500	2 500
Finland ^(c)	0	0	1 500	1 500
Gabon ^(a,c,d)	0	0	6 400	7 700
Germany ^(c,d)	0	0	0	9 300
Greece ^(a,c,d)	0	0	0	9 300
Greenland	0	0	0	228 000
Hungary ^(c)	0	0	0	17 900
India ^(a)	NA	NA	NA	259 500
Indonesia ^(b)	0	2 000	11 200	11 200
Iran, Islamic Republic of ^(b)	0	0	9 900	9 900
Italy ^(a,c,d)	0	8 100	8 100	8 100
Japan ^(a,c,d,f)	0	0	7 800	7 800
Jordan	0	0	70 000	70 000
Kazakhstan	596 100	809 800	1 027 600	1 102 700
Malawi ^{*(d)}	0	0	7 800	19 000
Mali*	0	0	11 800	11 800
Mauritania ^{*(d)}	0	0	19 900	29 700
Mexico	0	0	4 900	6 700
Mongolia ^(d)	0	79 200	190 500	190 500
Namibia ^{*(d)}	0	0	560 400	630 300
Niger ^(d)	0	12 200	340 700	547 400
Paraguay*	0	0	0	4 300
Peru ^(a)	0	47 700	47 700	47 700
Portugal ^(c,d)	0	6 000	9 300	9 300
Romania ^{*(a,c,d)}	0	0	8 800	8 800
Russia ^(b,d,f)	0	50 600	596 800	847 500
Senegal	0	0	0	1 500
Slovak Republic ^(a,b)	0	15 800	19 300	19 300
Slovenia ^(c)	0	7 200	12 200	12 200
Somalia ^{*(a,c,d)}	0	0	0	10 200
South Africa ^{*(d,f)}	0	313 900	440 800	614 500
Spain ^(f)	9 800	34 300	34 300	34 300
Sweden ^{*(c)}	0	0	12 800	12 800
Tanzania ^{*(b,d)}	0	58 500	72 800	72 800
Turkey ^(b)	0	0	15 300	16 700
Ukraine ^(d)	0	83 200	123 600	212 800
United States	0	18 600	67 100	135 900
Uzbekistan ^{*(d)}	68 500	68 500	171 300	171 300
Viet Nam	0	0	0	5 200
Zambia ^{*(d)}	0	0	34 300	34 300
Zimbabwe ^(a,c)	0	0	0	1 800
Total ^(g)	1 268 400	2 456 300	8 070 300	10 584 500

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΦΕΚ

Γ₁ : ΟΔΗΓΙΑ 96/29/ΕΥΡΑΤΟΜ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 31ης Μαΐου 1996, για τον καθορισμό των βασικών κανόνων ασφάλειας για την προστασία της υγείας των εργαζομένων και του πληθυσμού από τους κινδύνους που προκύπτουν από ιονίζουσες ακτινοβολίες

29. 6. 96

EL

Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων

Αριθ. L 159/1

II

(Πράξεις για την ισχύ των οποίων δεν απαιτείται δημοσίευση)

ΣΥΜΒΟΥΛΙΟ

ΟΔΗΓΙΑ 96/29/ΕΥΡΑΤΟΜ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ

της 31ης Μαΐου 1996

για τον καθορισμό των βασικών κανόνων ασφάλειας για την προστασία της υγείας των εργαζομένων και του πληθυσμού από τους κινδύνους που προκύπτουν από ιονίζουσες ακτινοβολίες

ΤΟ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ,

Έχοντας υπόψη:

τη συνθήκη για την ίδρυση της Ευρωπαϊκής Κοινότητας Ατομικής Ενεργείας, και ιδίως τα άρθρα 31 και 32,

την πρόταση της Επιτροπής, η οποία διατυπώθηκε μετά από γνωμοδότηση ομάδας προσώπων που ορίστηκαν από την Επιστημονική και Τεχνική Επιτροπή μεταξύ επιστημόνων εμπειρογνομόνων των κρατών μελών,

τη γνώμη του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου⁽¹⁾,

τη γνώμη της Οικονομικής και Κοινωνικής Επιτροπής⁽²⁾,

Εκτιμώντας:

ότι το άρθρο 2 στοιχείο β) της συνθήκης προβλέπει ότι πρέπει να θεσπιστούν ομοιόμορφοι βασικοί κανόνες ασφαλείας για την προστασία της υγείας του πληθυσμού και των εργαζομένων·

ότι το άρθρο 30 της συνθήκης ορίζει τους «βασικούς κανόνες» για την προστασία της υγείας του πληθυσμού και των εργαζομένων από τους κινδύνους που προκύπτουν από ιονίζουσες ακτινοβολίες ως εξής:

α) οι ανώτατες επιτρεπτές δόσεις που παρέχουν επαρκή ασφάλεια·

β) οι ανώτατες επιτρεπτές εκθέσεις και μολύνσεις·

γ) οι θεμελιώδεις αρχές ιατρικής επιβλέψεως των εργαζομένων·

ότι το άρθρο 33 της συνθήκης απαιτεί από κάθε κράτος μέλος να θεσπίσει τις κατάλληλες νομοθετικές, κανονιστικές και διοικητικές διατάξεις για την εξασφάλιση της τήρησης των τεθέντων βασικών κανόνων και να λάβει τα αναγκαία μέτρα για την εκπαίδευση, τη διαπαιδαγώγηση και την επαγγελματική κατάρτιση·

ότι η Κοινότητα, για να εκτελέσει το έργο της, όρισε τους βασικούς κανόνες για πρώτη φορά το 1959 σύμφωνα με το άρθρο 218 της συνθήκης μέσω των οδηγιών, της 2ας Φεβρουαρίου 1959, περί καθορισμού των βασικών κανόνων για την προστασία της υγείας των εργαζομένων και του πληθυσμού από τους κινδύνους που προκύπτουν από τις ιονίζουσες ακτινοβολίες⁽³⁾: ότι οι οδηγίες αναθεωρήθηκαν το 1962 με την οδηγία της 5ης Μαρτίου 1969⁽⁴⁾, το 1966 με την οδηγία 66/45/Ευρατόμ⁽⁵⁾, το 1976 με την οδηγία 76/579/Ευρατόμ⁽⁶⁾, το 1979 με την οδηγία 79/343/Ευρατόμ⁽⁷⁾, το 1980 με την οδηγία 80/836/Ευρατόμ⁽⁸⁾ και το 1984 με την οδηγία 84/467/Ευρατόμ⁽⁹⁾·

ότι οι οδηγίες για τους βασικούς κανόνες συμπληρώθηκαν από την οδηγία 84/466/Ευρατόμ του Συμβουλίου, της 3ης Σεπτεμβρίου 1984, για τον καθορισμό των θεμελιωδών μέτρων σχετικά με την προστασία από τις ακτινοβολίες όσων υποβάλλονται σε ιατρικές εξετάσεις και θεραπευτική αγωγή⁽¹⁰⁾, την απόφαση 87/600/Ευρατόμ του Συμβουλίου, της 14ης Δεκεμβρίου 1987, για τις κοινοτικές ρυθμίσεις σχετικά με την ταχεία ανταλλαγή πληροφοριών σε περίπτωση εκτάκτου κινδύνου από ακτινοβολίες⁽¹¹⁾, από τον κανονισμό (Ευρατόμ) αριθ. 3954/87 του Συμβουλίου, της 22ας Δεκεμβρίου 1987, για τον καθορισμό των μεγίστων

⁽¹⁾ ΕΕ αριθ. 11 της 20. 2. 1959, σ. 221/59.

⁽²⁾ ΕΕ αριθ. 57 της 6. 7. 1962, σ. 1633/62.

⁽³⁾ ΕΕ αριθ. 216 της 26. 11. 1966, σ. 3693/66.

⁽⁴⁾ ΕΕ αριθ. L 187 της 12. 7. 1976, σ. 1.

⁽⁵⁾ ΕΕ αριθ. L 83 της 3. 4. 1979, σ. 18.

⁽⁶⁾ ΕΕ αριθ. L 246 της 17. 9. 1980, σ. 1.

⁽⁷⁾ ΕΕ αριθ. L 265 της 5. 10. 1984, σ. 4.

⁽⁸⁾ ΕΕ αριθ. L 265 της 5. 10. 1984, σ. 1.

⁽⁹⁾ ΕΕ αριθ. L 371 της 30. 12. 1987, σ. 76.

⁽¹⁾ ΕΕ αριθ. C 128 της 9. 5. 1994, σ. 209.

⁽²⁾ ΕΕ αριθ. C 108 της 19. 4. 1993, σ. 48.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΟΡΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ

Δ₁ : Πίνακας ορίων συγκέντρωσης ραδονίου με βάση τις δημοσιεύσεις της ICRP (International Commission on Radiological Protection), (ICRP 2019 Proceedings)

ICRP (για χώρους εργασίας)	
1993	Καθιερώθηκαν τα όρια 500-1500 Bq/m³
2007	Μέγιστο όριο συγκέντρωσης ραδονίου 1500 Bq/m³
2010	Το ανώτατο όριο συγκέντρωσης ραδονίου μειώνεται στα 1000 Bq/m³
2014	Το όριο συγκέντρωσης ραδονίου μειώνεται ξανά στα 300 Bq/m³
2015	Το εύρος συγκέντρωσης ραδονίου ορίζεται από 100 έως 300 Bq/m³
2015 έως 2021	Έχει καθιερωθεί πλέον το ανώτατο όριο συγκέντρωσης ραδονίου στα 300 Bq/m³
IAEA (για χώρους εργασίας)	
1996 έως 2021	Ορίζονται ως ανώτατο όριο συγκέντρωσης ραδονίου τα 1000 Bq/m³
European Council Directive (για χώρους εργασίας)	
2012 έως 2021	Ορίζονται ως ανώτατο όριο συγκέντρωσης ραδονίου τα 300 Bq/m³