



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

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΕ ΣΠΗΛΑΙΑ**  
**ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΛΙΘΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΗΛΙΚΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Δημήτριος Τσιφάκης

**Εξεταστική Επιτροπή**

Μανούτσογλου Εμμανουήλ, Καθηγητής, (επιβλέπων)

Καλλίθρακας-Κόντος Νικόλαος, Καθηγητής

Σπανουδάκης Νικόλαος, Δρ., ΕΔΙΠ

Χανιά

Δεκέμβριος 2020

## Περίληψη

Το ραδόνιο  $^{222}\text{Rn}$  είναι ένα ευγενές αέριο, το οποίο εκλύεται στις σειρές διάσπασης του ουρανίου  $^{238}\text{U}$  από θυγατρικά του. Είναι ραδιενεργό, και έχει συνδεθεί εδώ και πολλές δεκαετίες με αρνητικές επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία. Επειδή είναι βαρύτερο από τον ατμοσφαιρικό αέρα, έχει την τάση συγκέντρωσης σε κλειστούς χώρους. Μια τέτοια περίπτωση αποτελεί και η συγκέντρωση του αερίου αυτού στα σπήλαια. Τα σπήλαια είναι ιδιαίτερες μορφοτεκτονικές δομές και είναι διάσπαρτα ανά τον πλανήτη κατά πολλές χιλιάδες. Ιδιαίτερα αυξημένο αριθμό σπηλαίων παρουσιάζουν οι περιοχές με ανθρακικά πετρώματα, διαφόρου γεωλογικής ηλικίας και ιδιαίτερα αυτές που έχουν υποστεί καρστικοποίηση.

Από τις πολλές χιλιάδες των σπηλαίων, εκατοντάδες μόνο παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον (πολιτιστικό, αρχαιολογικό, ερευνητικό, τουριστικό κτλ). Επισκέψεις σε σπήλαια γίνονται είτε ερασιτεχνικά (ερασιτέχνες σπηλαιολόγοι, φυσιδίφες, φυσιολάτρες κ.α.) είτε επαγγελματικά (αρχαιολογικές ανασκαφές, έρευνες, μόνιμη απασχόληση σε τουριστικά αξιοποιημένων σπηλαίων κ.α.). Λόγω της μορφής τους, τα σπήλαια έχουν το δικό τους ιδιαίτερο περιβάλλον, με το ραδόνιο να αποτελεί ένα από τα κύρια αέρια του χώρου με τις συγκεντρώσεις να παρουσιάζουν ένα μεγάλο εύρος τιμών. Η διερεύνηση της κατανομής της συγκέντρωσης του ραδονίου στα σπήλαια έχει τα τελευταία χρόνια ενταθεί ακολουθώντας την αύξηση των επισκεπτών σε αυτά, όπου ο κίνδυνός από το άοσμο αυτό αέριο είναι πάντα υπαρκτός. Η συμπεριφορά της συγκέντρωσης ραδονίου στα σπήλαια εξαρτάται από ένα μεγάλο πλήθος παραγόντων με πρωτεύοντες πέρα του ρυθμού έκκλησης, τις διαφορές ατμοσφαιρικής πίεσης εντός και εκτός σπηλαίων, των θερμοκρασιακών διαφορών εντός και εκτός σπηλαίων καθώς και της πληθώρας των γεωμορφοτεκτονικών ιδιαιτεροτήτων των σπηλαίων.

Στην παρούσα εργασία έγινε βιβλιογραφική επεξεργασία και σύγκριση δεδομένων σχετικών με μέγιστες και ελάχιστες τιμές συγκεντρώσεων συγκεντρώσεων ραδονίου σε 212 σπήλαια κατανεμημένων σε εικοσιπέντε χώρες ανά τον κόσμο. Οι ανωτέρω τιμές παρατέθηκαν προς σύγκριση με μια άλλη ομάδα δεδομένων και παραμέτρων όπως λιθολογία και ηλικία σπηλαίου, ύπαρξη ρηγμάτων, μέθοδος και όργανα μέτρησης. Έγινε ανάλυση των τιμών συγκεντρώσεων από στιγμιαίες και μηνιαίες μετρήσεις, καθώς και συσχετισμός των συγκεντρώσεων με λιθολογίες και ηλικίες σπηλαίων.

Η λογαριθμική κατανομή των μεγίστων και ελαχίστων τιμών συγκέντρωσης δεν διαφέρει από προηγούμενες τιμές που προέκυψαν από αντίστοιχες μελέτες της προηγούμενης δεκαετίας, παρά την διαφοροποίηση των σπηλαίων που επεξεργάστηκαν αλλά και την σχετικά μικρή αλλά αύξηση των αριθμού των. Επιβεβαιώνεται ότι η πλειονότητα των σπηλαίων βρίσκεται σε ασβεστολιθικά και γενικότερα ανθρακικής σύστασης πετρώματα (ασβεστόλιθοι, δολομίτες, μάρμαρα, τραβερτίνες), παρουσιάζοντας μεγάλο εύρος τιμών

συγκέντρωσης, από μικρότερο του 10 Bq/m<sup>3</sup> έως και 130.000 Bq/m<sup>3</sup>. Σπήλαια έχουν δημιουργηθεί σε διάφορου ηλικίας πετρώματα, από το Προκάμβριο έως το Τεταρτογενές.

Η μεγαλύτερη συγκέντρωση ραδονίου που βρέθηκε καταγεγραμμένη αφορά στο σπήλαιο Shawan της Κίνας, όπου η στιγμιαία μέτρηση έδειξε 123.000 Bq/m<sup>3</sup>, ενώ η μικρότερη στο σπήλαιο Cove d'Arta της Ισπανίας (8 Bq/m<sup>3</sup>). Συγκεκριμένη σχέση ανάμεσα στην ηλικία και την ιδιαίτερη λιθολογία δεν βρέθηκε. Οι μεγαλύτερες τιμές ανα ήπειρο ήταν 2.571 Bq/m<sup>3</sup> για την Ωκεανία, 123.000 Bq/m<sup>3</sup> στην Ασία, 84.792 Bq/m<sup>3</sup> στην Αμερική, 50.462 Bq/m<sup>3</sup> στην Ευρώπη, μετά την μεγαλύτερη συγκέντρωση της Ελλάδος που βρέθηκε στα 88.060 Bq/m<sup>3</sup>.

## Abstract

Radon is a noble gas that is emitted during the uranium (<sup>238</sup>U) series decay from its daughters. It is radioactive and has been related to negative impact in human health for decades. It is heavier than atmospheric air and thus has the tendency to concentrate in closed spaces. Radon concentration in caves is such a case. Caves are special morphotectonic structures and are scattered around the globe in thousands. Areas with carbonate rocks have an increased number of caves, varying in geological age, and especially those that have undergone karstification. From thousands of caves, only hundreds of caves present special interest (cultural, archaeological, research, touristic, etc.). Caves' visits are done either amateur (amateur speleologists, naturalists, nature lovers) or professionally (archeological excavations, researches, full-time employees in touristic caves). Caves have a special environment due to their form, with radon being one of the dominant gases of their space with its concentration having a wide range.

In recent years, investigation of radon concentration distribution in caves has increased following caves visitors' number increase; there is always the hazard from this odorless gas. Behavior of radon concentration in caves depends on a wide range of factors, primarily emanation rate, atmospheric pressure differentiation (inside and outside of the caves), temperature differences (inside and outside of the caves), as well as the variety of geomorphological characteristics of the caves themselves.

In this work, data of maximum and minimum values of radon concentration in 212 caves, scattered in 25 countries around the world, were collected from relative literature and processed. These values were compared to another group of data and parameters, such as lithology and age of the cave, faults existence, methods and instruments of measurement. Analysis of concentration values from instant and monthly measurements was done, as well as relation of concentration to lithology and age of the caves. Logarithmic distribution of the maximum and minimum concentration values is not different from previous values of related works of the past decade, despite the differences of the caves that were used, but also the relatively small increase of their number. It is

confirmed that the majority of the caves is located in carbonate and generally carbonate composition rocks (carbonates, dolomites, marbles, travertines), having a wide range of concentration values ranging from  $10\text{Bq/m}^3$  to  $130.000\text{Bq/m}^3$ . Caves are in rocks of different age, ranging from Precambrian to Quarternary.

The highest concentration that has been published is in Shawan cave, China, where the instant concentration was  $123,000\text{Bq/m}^3$ , while the lowest was found in Cove d' Arta cave, Spain ( $8\text{Bq/m}^3$ ). A mathematical relationship between age and lithology was not found. The maximum values per continent were  $2,571\text{Bq/m}^3$  in Oceania,  $123,000\text{Bq/m}^3$  in Asia,  $84,792\text{Bq/m}^3$  in America,  $50,462\text{Bq/m}^3$  in Europe, second to the highest concentration found in Greece at  $88,060\text{Bq/m}^3$ .

## Πρόλογος

Η διερεύνηση του ραδονίου στα σπήλαια προσελκύει τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερο ενδιαφέρον, λόγω των μεγάλων συγκεντρώσεων του σε συγκεκριμένα σπήλαια που έχουν μετρηθεί σε αυτά. Τα σπήλαια έχουν ένα ιδιαίτερο περιβάλλον (συνήθως μια είσοδο - έξοδο αέρα, συνεχή τροφοδοσία ραδονίου από τα περιβάλλοντα πετρώματα) που δυσκολεύει σε ορισμένες περιπτώσεις την διείσδυση, ή/και ανακυκλοφορία του φρέσκου-καθαρού αέρα, και συνεπώς ευνοεί την αύξηση των τιμών συγκέντρωσης του ραδονίου. Για τον λόγο αυτό τα σπήλαια παρουσιάζονται εξειδικευμένα σε νόμους και οδηγίες περι προστασίας από την ραδιενέργεια. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας και η Ευρωπαϊκή Ένωση έχουν προτείνει όρια έκθεσης στο ραδόνιο για επισκέπτες και εργαζόμενους σε σπήλαια και συνεχίζουν τις παραινέσεις και συμβουλές τους για το ραδόνιο συλλέγοντας και εμπλουτίζοντας τα υφιστάμενα δεδομένα από εργασίες ρουτίνας, αλλά και συνεχιζόμενες έρευνες. Η Ελληνική νομοθεσία με την σειρά της έχει εισάγει όρια για τα σπήλαια με Προεδρικό Διάταγμα και δίνει οδηγίες μέσω της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας.

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια συστηματικής αναζήτησης δημοσιευμένων δεδομένων σχετικών με έρευνες που πραγματοποιήθηκαν και αφορούν στην συγκέντρωση ραδονίου σε γνωστά εδώ και δεκαετίες σπήλαια ανά τον κόσμο. Στα πλαίσια αυτά ολοκληρώθηκε η παρούσα εργασία η διάρθρωση της οποίας είναι η ακόλουθη: Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφονται πληροφορίες για το ραδόνιο και τις επιπτώσεις του στην υγεία. Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις συγκεντρώσεις του ραδονίου στα σπήλαια που μελετούνται. Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την συγκέντρωση και επεξεργασία των δεδομένων, ενώ στο 4<sup>ο</sup> δίνονται τα συμπεράσματα και κάποιες προτάσεις.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Καθηγητή Μανούτσογλου για την ευκαιρία που μου έδωσε να τελειώσω τις σπουδές μου και να εργαστώ πάνω σε ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα. Με την υπερπολύτιμη βοήθειά του, κλείνει επιτυχώς μια προσπάθεια που ξεκίνησε το 2004. Ευχαριστώ πολύ επίσης τα δύο άλλα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, τον κ. αντιπρύτανη Καλλίθρακα-Κόντο και τον Δρ. Σπανουδάκη για την ουσιαστική συμβολή τους. Μεγάλο ευχαριστώ και στον Διονύση Χωραφά που με την συνεχή παρακίνησή και βοήθειά του εργάστηκα σ αυτή την εργασία, καθώς και την Μαρία Χωραφά για την συμβολή της στο κείμενο.

## **Περιεχόμενα**

Περίληψη.....	ii
Abstract .....	iii
Πρόλογος.....	iv
Ευχαριστίες.....	v
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ .....	1
1.2 ΡΑΔΟΝΙΟ ΧΗΜΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ .....	2
1.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΔΙΑΦΥΓΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΚΑΙ ΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ ....	6
1.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ .....	12
1.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	20
ΡΑΔΟΝΙΟ ΚΑΙ ΣΠΗΛΑΙΑ.....	20
2.1. ΡΑΔΟΝΙΟ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ .....	20
2.2 ΣΠΗΛΑΙΟΓΕΝΕΣΗ-ΕΙΔΗ ΣΠΗΛΑΙΩΝ .....	23
2.3. ΡΑΔΟΝΙΟ ΚΑΙ ΣΠΗΛΑΙΑ.....	25
2.4 ΕΠΙΤΡΕΠΤΑ ΟΡΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΤΑ ΣΠΗΛΑΙΑ .....	32
2.5 ΓΕΩΧΡΟΝΟΛΟΓΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ .....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	35
3.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	51
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	51
4.1 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ.....	51
4.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	53

4.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	55
Βιβλιογραφία.....	56
Παράρτημα 1-Πίνακας συγκεντρώσεων σπηλαίων Dales (Yorkshire, UK) .....	64
Παράρτημα 2-Σπήλαια Αυστραλίας .....	1
Παράρτημα 3- Γενικός πίνακας .....	2

### **Κατάλογος Πινάκων**

Πίνακας 1: Φυσικοχημικές ιδότητες του ραδονίου ( $^{222}\text{Rn}$ ) .....	3
Πίνακας 2: Μονάδες μέτρησης συγκέντρωσης ραδονίου .....	6
Πίνακας 3: Διαπερατότητα πετρωμάτων (Gleeson et. al., 2011) .....	9
Πίνακας 4: Πηγές εκροής ραδονίου (NCRP 1984).....	11
Πίνακας 5: τεχνικές μέτρησης συγκέντρωσης ραδονίου .....	19
Πίνακας 6: Περιεκτικότητα του ουρανίου στα πετρώματα <sup>[7]</sup> .....	21
Πίνακας 7: Κανονικές Συγκεντρώσεις ραδίου και ραδονίου, μετρημένες σε βάθος ενός μέτρου (Νικολόπουλος, 2008, από Durrani & Ilic, 1997).....	22
Πίνακας 8: Συγκεντρώσεις ραδονίου σε σπήλαια ανα τον κόσμο (Field, 2007) .....	27
Πίνακας 9: συγκέντρωση ραδονίου στο σπήλαιο Hajnóczy από το 1978 έως το 1995 (Cigna, 2005).....	31
Πίνακας 10: Κανονισμοί επιτρεπτών ορίων έκθεσης (Field (2007)).....	32
Πίνακας 11: Γεωχρονολογική κλίμακα .....	34
Πίνακας 12: Κατανομή χωρών και σπηλαίων που καταγράφηκαν ερευνητικές εργασίες σε σπήλαια .....	36
Πίνακας 13:Κατανομή πετρωμάτων που βρίσκονται τα σπήλαια.....	37
Πίνακας 14: Ηλικία σχηματισμών εντός των οποίων έχουν δημιουργηθεί τα σπήλαια.....	38
Πίνακας 15: Λογαριθμική κατανομή ελάχιστων τιμών συγκέντρωσης.....	38
Πίνακας 16: Λογαριθμική κατανομή μέγιστων τιμών συγκέντρωσης.....	39
Πίνακας 17: Λογαριθμική συγκέντρωση ραδονίου .....	39
Πίνακας 18: Σπήλαια με μετρήσεις στιγμιαίας συγκέντρωσης .....	40
Πίνακας 19: Εύρος στιγμιαίων τιμών συγκέντρωσης .....	41
Πίνακας 20: Ελάχιστες και μέγιστες στιγμιαίες συγκεντρώσεις.....	41

Πίνακας 21: Μέση στιγμιαία συγκέντρωση .....	42
Πίνακας 22: Λιθολογία σπηλαίων στιγμιαίας μέτρησης συγκέντρωσης.....	42
Πίνακας 23: Ηλικιακή κατανομή σπηλαίων στιγμιαίας μέτρησης συγκέντρωσης.....	43
Πίνακας 24: Σπήλαια μηνιαίας μέτρησης συγκέντρωσης .....	44
Πίνακας 25: Εύρος μηνιαίων τιμών συγκέντρωσης.....	45
Πίνακας 26: Διακύμανση ελάχιστης και μέγιστης μηνιαίας συγκέντρωσης .....	45
Πίνακας 27: Διακύμανση μέσης μηνιαίας συγκέντρωσης.....	46
Πίνακας 28: Κατανομή λιθολογίας σπηλαίων μηνιαίας συγκέντρωσης .....	46
Πίνακας 29: Κατανομή γεωλογικής χρονολογίας σπηλαίων μηνιαίας συγκέντρωσης .....	47
Πίνακας 30: Λιθολογία σπηλαίων ετήσιας συγκέντρωσης.....	47
Πίνακας 31: Κατανομή γεωλογικής χρονολογίας σπηλαίων ετήσιας συγκέντρωσης.....	48
Πίνακας 32: Συγκέντρωση σε σπήλαια χωρίς ρήγματα ή ρηγματογόνες ζώνες .....	49
Πίνακας 33: Συγκέντρωση σε σπήλαια με ρήγματα ή ρηγματογόνες ζώνες.....	49
Πίνακας 34: Λογαριθμική κατανομή συγκεντρώσεων 220 σπηλαίων (Cigna, 2005) .....	52
Πίνακας 35: Λογαριθμική κατανομή συγκεντρώσεων 114 σπηλαίων .....	53

### **Κατάλογος Σχημάτων**

Σχήμα 1: η διάσπαση του ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ ) <sup>[2]</sup> .....	3
Σχήμα 2: Διαδικασία παραγωγής και διαφυγής ραδονίου <sup>[5]</sup> .....	8
Σχήμα 3: Η ατμόσφαιρα και οι διεργασίες εντός καρστικού σπηλαίου.....	28
Σχήμα 4: Γεωλογικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ύπαρξη του ραδονίου στα σπήλαια .....	29

### **Κατάλογος Εικόνων**

Εικόνα 1: Το ραδόνιο στον περιοδικό πίνακα <sup>[1]</sup> .....	2
Εικόνα 2: Επίδραση του ραδονίου στον άνθρωπο <sup>[6]</sup> .....	15
Εικόνα 3: Απεικόνιση και αεροφωτογραφία του σπηλαίου Shawan, στην νοτιοδυτική Κίνα. ....	54



# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ**

Το ραδόνιο ήταν το πέμπτο ραδιενεργό στοιχείο που ανακαλύφθηκε το 1900 από τον Γερμανό φυσικό Friedrich Ernst Dorn, μετά την ανακάλυψη του Ουρανίου, Θορίου, Ραδίου και Πολωνίου. Το 1900 ο Dorn κατέγραψε ορισμένα πειράματα στα οποία παρατήρησε ότι συγκεκριμένες χημικές ενώσεις ραδίου εκπέμπουν ένα «ραδιενεργό αέριο», που το αποκάλεσε «απόρροια ραδίου» («radium emanation» – «Ra Em»). Πριν από αυτό, το 1899, οι Γάλλοι φυσικοί Pierre και Marie Curie είχαν παρατηρήσει ότι το «αέριο» που απόρρεε από το ράδιο παρέμενε ραδιενεργό για έναν μήνα. Αργότερα, την ίδια χρονιά, ένας Αμερικανός Ηλεκτρολόγος Μηχανικός, ο Robert B. Owens, και ένας Νεοζηλανδός Φυσικός, ο Ernest Rutherford, του οποίου και αργότερα απονεμήθηκε το βραβείο Νόμπελ Χημείας, παρατήρησαν διακυμάνσεις κατά τις οποίες οι ενώσεις του θορίου συνεχώς εκπέμπανε ένα ραδιενεργό αέριο. Το αέριο αυτό διατηρούσε τις ραδιενεργές του δυνάμεις για μερικά λεπτά. Το ονόμασαν «απόρροια» (emanation) και έπειτα «απόρροια Θορίου». Το 1901, απέδειξαν ότι οι εκπομπές αυτές ήταν ραδιενεργές, ωστόσο το απέδωσαν στους Curies για την ανακάλυψη του στοιχείου. Το 1903, παρόμοιες εκπομπές παρατηρήθηκαν από το ακτίνιο, από τον André – Louis Debierne, έναν άλλο Γάλλο χημικό, ο οποίος είχε συνεργαστεί με τους Curies. Ονομάστηκε «απόρροια ακτινίου». Όταν το φάσμα των τριών αυτών αερίων συγκρίθηκαν με αυτό των αργόν, κρυπτό και ξένο, ο Sir William Ramsay, Σκωτσέζος χημικός, πρότεινε ότι αυτές οι «απορροές» μπορεί να περιέχουν ένα νέα στοιχείο της οικογένειας των ευγενών αερίων.

Το 1909, οι Sir William Ramsay και Robert Whytlaw – Gray του πανεπιστημίου του Λονδίνου, απομόνωσαν το ραδόνιο, όρισαν την πυκνότητά του και το 1910 καθόρισαν ότι ήταν το βαρύτερο από τα ευγενή αέρια. Έγραψαν ότι «η έκφραση απόρροια ραδίου είναι πολύ παράξενη» και πρότειναν την νέα ονομασία niton (Nt) (από το λατινικό «nitens» που σημαίνει λαμπερό), διότι το αέριο προκαλούσε τον φωσφορισμό ορισμένων υλικών. Ωστόσο η ονομασία δεν παρέμεινε, και τελικά το 1923 η Διεθνής Επιτροπή Χημικών Στοιχείων (International Committee for Chemical Elements) και η Διεθνής Ένωση Καθαρής και Εφαρμοσμένης Χημείας (International Union of Pure and Applied Chemistry - IUPAC) επέλεξε

τις ονομασίες Ραδόνιο (Rn), Θορόνιο (Th) και Ακτινόνιο (An). Αργότερα, όταν τα ισότοπα αριθμήθηκαν αντί ονομασίας, το στοιχείο πήρε την ονομασία του από το πιο σταθερό ισότοπο, ραδόνιο, ενώ το Th μετονομάστηκε σε  $^{220}\text{Rn}$  και αντίστοιχα το An σε  $^{219}\text{Rn}$  (Al Susoeff Jr, 2009 & η[1])

## 1.2 ΡΑΔΟΝΙΟ ΧΗΜΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ

Το ραδόνιο είναι ένα από τα έξι ευγενή αέρια. Είναι ραδιενεργό, το πιο βαρύ ευγενές αέριο, άχρωμο, άοσμο και άγευστο.

**Periodic Table of the Elements**

Atomic Number

Symbol

Atomic Mass

Name

Hydrogen

1.008

86

Rn

Radon

(222)

Lanthanide Series

Actinide Series

Εικόνα 1: Το ραδόνιο στον περιοδικό πίνακα <sup>[1]</sup>

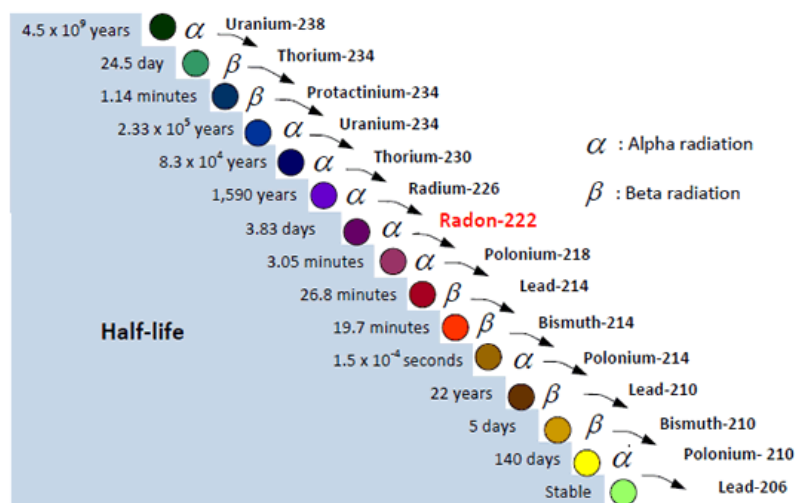
Σύμφωνα με το NCRP Report No 97 (1988) οι ιδιότητές του παρατίθενται στον Πίνακα 1.

Ατομικός αριθμός	86	
Ατομικό βάρος	222	
Πυκνότητα σε κανονικές συνθήκες (kg/m <sup>3</sup> )	9,73	
Διαλυτότητα (cm <sup>3</sup> /kg) στο νερό σε 1atm και θερμοκρασία:		
0 °C	510	
20°C	230	
30°C	169	
Διαλυτότητα (cm <sup>3</sup> /kg) σε 1atm	0°C	18°C
Γλυκερίνη		0,21
Αλκοόλη	8,3	6,2

Αιθυλική αλκοόλη	9,4	7,4
Πετρέλαιο (υγρή παραφίνη)	12,6	9,2
Ελαιόλαδο		29
Ιξώδες σε 1atm (mP)		
20°C	229	
25°C	233.2	
Σημείο βρασμού (°C)	-62	

Πίνακας 1: Φυσικοχημικές ιδότητες του ραδονίου ( $^{222}\text{Rn}$ )

Το ραδόνιο προέρχεται από την σειρά διάσπασης του ουρανίου-238 ( $^{238}\text{U}$ ), από το ράδιο ( $^{226}\text{Ra}$ ). Το ράδιο διασπάται, παράγοντας μία αλυσίδα ραδιενεργών ισοτόπων, καταλήγοντας στο σταθερό μόλυβδο ( $^{206}\text{Pb}$ ), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: η διάσπαση του ουρανίου ( $^{238}\text{U}$ )<sup>[2]</sup>

Η σειρά του ραδονίου αποτελείται από 27 ισότοπα: από το  $^{200}\text{Rn}$  έως το  $^{226}\text{Rn}$ . Από τις 27 μορφές ραδονίου, η πιο σημαντική για την ανθρώπινη υγεία είναι το  $^{222}\text{Rn}$ , καθώς διαθέτει τον υψηλότερο χρόνο ημιζωής (ο χρόνος που απαιτείται για να ελαττωθεί η ποσότητα του ραδονίου κατά το ήμισυ) 3,824 ημέρες, και οι υπόλοιπες μορφές είναι πολύ σπάνιες. Γι' αυτό τον λόγο όταν αναφέρεται το ραδόνιο, νοείται ως το ισότοπο  $^{222}\text{Rn}$ .

Η χημική ραδιενεργή διάσπαση του ραδονίου εκπέμπει τα θυγατρικά του ισότοπα, εκ των οποίων τα πιο σημαντικά είναι τα τέσσερα αρχικά βραχύβια:  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  και  $^{214}\text{Po}$ , με χρόνους ημιζωής 3,11 min, 26,8 min, 19,9min και 164μs αντίστοιχα. Τα  $^{214}\text{Pb}$  και  $^{214}\text{Bi}$  είναι μέταλλα, ενώ τα  $^{218}\text{Po}$  και  $^{214}\text{Po}$  μεταλλοειδή. Από αυτά, τα ισότοπα Po εκπέμπουν σωματίδια – α με σχετικά μεγάλη ενέργεια, ενώ τα ισότοπα Pb και Bi σωματίδια – β με

σχετικά χαμηλή ενέργεια. Τα δύο τελευταία ισότοπα εκπέμπουν και  $\gamma$ - ακτινοβολία κατά τις διασπάσεις τους. (Field, 2007; Νικολόπουλος κ.ά., 2015 )

Η μονάδα μέτρησης της συγκέντρωσης ραδονίου στο σύστημα SI είναι το Becquerel - Bq (μπεκερέλ) ανά κυβικό μέτρο ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ). Ορίζεται ως ο αριθμός των ραδιενεργών διασπάσεων ενός πυρήνα ανά δευτερόλεπτο, ανά κυβικό μέτρο αέρα. Οφείλει την ονομασία του στον Henry Becquerel ο οποίος ανακάλυψε την ιονίζουσα ακτινοβολία του ουρανίου.

Στις Η.Π.Α η αντίστοιχη μονάδα μέτρησης της συγκέντρωσης ραδονίου είναι το picocurie ανά λίτρο ( $\text{pCi}/\text{L}$ ). Ένα curie ισούται με τις διασπάσεις που παρατηρούνται, δηλαδή η ενέργεια που εκπέμπεται, από 1 gr Ra μέσα σε χρονικό διάστημα 1 δευτερολέπτου. Εξ ορισμού 1 picocurie ισούται με το  $0,037\text{Bq}$ , οπότε  $1 \text{ pCi}/\text{L}$  αντιστοιχεί σε  $37 \text{ Bq}/\text{m}^3$  (EPA, 2003). Ειδικά για το ραδόνιο, για τη συσχέτιση της συγκέντρωσής του και των θυγατρικών του στον αέρα με την απορροφούμενη δόση που δέχεται ο ανθρώπινος οργανισμός, χρησιμοποιείται η Δυνητική Συγκέντρωση Ενέργειας-  $\alpha$  (Potential Alpha Energy concentration - PAEC) και η Δυνητική Έκθεση Ενέργειας-  $\alpha$  (Potential Alpha Energy Exposure - PAEE).

Τα μεγέθη αυτά και οι μονάδες τους δίδονται παρακάτω:

- Δυνητική Συγκέντρωση Ενέργειας- $\alpha$  (Potential Alpha Energy Concentration-PAEC): Ορίζεται ως το άθροισμα των αρχικών ενεργειών των σωματιδίων- $\alpha$  που εκπέμπονται από κάποια ποσότητα ραδονίου και βραχύβιων θυγατρικών του, που είναι παρόντα με τη μορφή μίγματος, σε κάποιον όγκο αέρα, ανά μονάδα όγκου. Συμβολίζεται ως PAEC (Potential Alpha Energy Concentration) (Nikolopoulos et al., 2013; Nikolopoulos & Louizi, 2008; Nikolopoulos, & Vogiannis, 2007; Vogiannis & Nikolopoulos, 2008, 2014; Vogiannis, Nikolopoulos, Louizi, Halvadakis, 2004a, 2004b). Μονάδες:  $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$  (SI)
- Η πιο διαδεδομένη μονάδα μέτρησης της Δυνητικής Συγκέντρωσης Ενέργειας -  $\alpha$  των θυγατρικών του ραδονίου, είναι τα Επίπεδα Εργασίας (Working Levels) – WL. Ένα WL ορίζεται ως οποιοσδήποτε συνδυασμός βραχύβιου θυγατρικού του ραδονίου που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την τελική απελευθέρωση  $1.3 \times 10^5$  εκατομμύρια βολτ ηλεκτρονίου (MeV) ενέργειας ακτινοβολίας  $\alpha$ , σε 1 λίτρο αέρα. Ως βραχύβια θυγατρικά ισότοπα του ραδονίου ορίζονται τα θυγατρικά ισότοπα με χρόνους ημιζωής μικρότεροι των 30 λεπτών. Στο σύστημα SI μετριέται σε  $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}$ , όπου  $1 \text{ WL} = 2,083 \times 10^{-5} \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$  (Ανωγειανάκης, 2009). Η ποσότητα αυτή τέθηκε ως όριο ασφάλειας για τους εργαζόμενους σε ορυχεία, καθώς η 40ωρη εβδομαδιαία έκθεσή τους σε

παρόμοιο περιβάλλον θεωρήθηκε ότι δεν επιφέρει σοβαρές βιολογικές βλάβες [NAS, 1968]. Η προαναφερθείσα ενέργεια ισοδυναμεί με συγκέντρωση  $3700 \text{ Bq/m}^3$  του ισοτόπου  $^{222}\text{Rn}$  ή  $275 \text{ Bq/m}^3$  του ισοτόπου  $^{220}\text{Rn}$  ή  $5960 \text{ Bq/m}^3$  του  $^{219}\text{Rn}$  και καθενός από τα βραχύβια θυγατρικά τους σε κατάσταση διαρκούς ισορροπίας (Πατήρης, 2008).

- Η έκθεση στα θυγατρικά του ραδονίου μετριέται σε μηνιαία επίπεδα εργασίας (Working Level Months – WLM). Η έκθεση αυτή ονομάζεται Δυνητική Έκθεση Ενέργειας – α (Potential Alpha Energy Exposure – PAEE) και ορίζεται ως το ολοκλήρωμα του γινομένου του μεγέθους PAEC με τον χρόνο, για κάποιο χρονικό διάστημα μελέτης. Είναι ανάλογη της συγκέντρωσης των θυγατρικών ραδονίου (WL) και του χρόνου. Μιας και το συγκεκριμένο μέγεθος θεσπίστηκε για να προσδιορίσει την εκτιθέμενη ποσότητα στους εργαζόμενους, ένας μήνας θεωρήθηκε 170 ώρες (Νικολόπουλος κ.ά., 2015). Κατ' αυτόν τον τρόπο, 1WLM ορίζεται ως η έκθεση σε 1WL για 170 ώρες. Στο σύστημα SI μετριέται με  $\text{Jm}^{-3}\text{s}$ , ωστόσο η συγκεκριμένη μονάδα μέτρησης δεν χρησιμοποιείται στην πράξη. <sup>[3]</sup>
- Ισοδύναμη Συγκέντρωση Ραδονίου: Είναι η συγκέντρωση ραδονίου που, ευρισκόμενη σε ραδιενεργό ισορροπία με τα βραχύβια θυγατρικά ισότοπα της, αποδίδει την ίδια τιμή του μεγέθους PAEC, με αυτή που αποδίδει ένα συγκεκριμένο μείγμα μελέτης. Συμβολίζεται με EEC (Equilibrium Equivalent Concentration). Σημειώνεται ότι συνήθως το ραδόνιο δεν ευρίσκεται σε ισορροπία με τα θυγατρικά του ισότοπα στους εσωτερικούς χώρους (Nikolopoulos et al., 2013; Nikolopoulos & Louizi, 2008; Nikolopoulos, & Vogianis, 2007; Vogianis & Nikolopoulos, 2008, 2014; Vogianis, Nikolopoulos, Louizi, Halvadás, 2004a, 2004b).
- Παράγοντας Ισορροπίας: Είναι το πηλίκο της ισοδύναμης συγκέντρωσης ραδονίου προς την πραγματική. Συμβολίζεται με το γράμμα F. Συνήθης τιμή του F είναι 0.4 (Nikolopoulos et al., 2002; Vogianis & Nikolopoulos, 2014). Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι ορισμοί και οι μονάδες μέτρησής τους με τις απαραίτητες μετατροπές.

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ
Συγκέντρωση ραδονίου	Bq/m <sup>3</sup> (σύστημα SI)	1pCi/l = 37 Bq/m <sup>3</sup>
	pCi/L	
Δυνητική Συγκέντρωση Ενέργειας - α - PAEC	J/m <sup>3</sup> (σύστημα SI)	
	MeV/L	1MeV/L = 1,6 x 10 <sup>-16</sup> J/m <sup>3</sup>
	WL	1WL = 2,083 x 10 <sup>-5</sup> J/m <sup>3</sup>
Δυνητική Έκθεση Ενέργειας -α - PAEE	WLM	
Ισοδύναμη Συγκέντρωση Ραδονίου – EEC	Bq/m <sup>3</sup>	

Πίνακας 2: Μονάδες μέτρησης συγκέντρωσης ραδονίου

Γενικότερα, όμως, η επιμέρους ραδιενέργεια δεν είναι άμεσα υπολογίσιμη. Για τον έμμεσο προσδιορισμό του ρυθμού έκθεσης σε ραδόνιο χρησιμοποιείται το μέγεθος της Ισοδύναμης Συγκέντρωσης Ραδονίου σε κατάσταση ισορροπίας - Equilibrium Equivalent Concentration, EEC. Η EEC ορίζεται ως η συγκέντρωση ραδονίου που, ευρισκόμενη σε ραδιενεργό ισορροπία με τα βραχύβια θυγατρικά ισότοπά της, αποδίδει την ίδια τιμή του μεγέθους PAEC, με αυτή που αποδίδει ένα συγκεκριμένο μείγμα μελέτης. Μετρείται σε Bq/m<sup>3</sup> (Χαραλάμπου, 2008). Μια εξίσου σημαντική έννοια στην έρευνα και βιβλιογραφία του ραδονίου είναι η «ενεργός δόση». Σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία (Π.Δ. 101/2018 ΦΕΚ 194/Α` 20.11.2018, άρθρο 4), ορίζεται ως «το άθροισμα των σταθμισμένων ισοδύναμων δόσεων σε όλους τους ιστούς και όργανα του σώματος από εσωτερική και εξωτερική έκθεση». Μονάδα μέτρησης είναι το sievert (Sv).

### 1.3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΔΙΑΦΥΓΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΚΑΙ ΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΑ

#### 1.3.1 Ραδόνιο στο έδαφος

Λόγω του ότι το ραδόνιο είναι αέριο, έχει μεγαλύτερη κινητικότητα απ' ότι το ουράνιο ή το ράδιο, τα οποία είναι ακίνητα στην σταθερή ύλη των πετρωμάτων και του φλοιού της γης. Αυτό συνεπάγεται ότι το ραδόνιο μπορεί πολύ πιο εύκολα να διαφύγει από τα πετρώματα



και το έδαφος, μέσα από ρωγμές των πετρωμάτων και ανάμεσα από τους πόρους μεταξύ των κόκκων των υλικών αυτών. Η κινητικότητα του ραδονίου επηρεάζεται από την ποσότητα του ουρανίου που υπάρχει στο υπέδαφος, και τα μονοπάτια διαφυγής του ραδονίου προς την επιφάνεια.

Ωστόσο η συγκέντρωση ραδίου και ουρανίου στο έδαφος δεν είναι ο μόνος παράγοντας που επηρεάζει την παραγωγή ραδονίου και αυτό διότι μονάχα μια ποσότητα από το παραγόμενο στους κόκκους ραδονίου δραπετεύει και εισέρχεται στους πόρους του εδάφους. Η ποσότητα αυτή εκφραζόμενη σε ποσοστό ονομάζεται συντελεστής **ή ποσοστό απορροής (emanation coefficient ή emanation fraction)**. Τα ερευνητικά δεδομένα έχουν δείξει ότι το ποσοστό αυτό κυμαίνεται μεταξύ 0,05 – 0,7 για διάφορους τύπους εδαφών (Nazaroff & Nero, 1988).

Η φυσική ακολουθία της διάσπασης του ουρανίου, ραδίου και συνεπώς της παραγωγής ραδονίου έχει ως εξής:

Όταν το ράδιο διασπάται παράγεται ένα άτομο ραδονίου και ένα σωματίδιο - α. Το σωματίδιο - α εκτοξεύεται και το άτομο ραδονίου υπόκειται σε κατάσταση ανάκρουσης, αποκτώντας κινητική ενέργεια. Η απόσταση που μπορεί να διανύσει το άτομο ραδονίου είναι μεταξύ 0,02 και 0,07  $\mu\text{m}$  σε έναν κόκκο, εξαρτώμενο πάντα από την πυκνότητά του πετρώματος (Nazaroff & Nero, 1988).

Από αυτό το σημείο το ραδόνιο μπορεί να υποστεί τα εξής:

- να εγκλωβιστεί μέσα στον κόκκο.
- να εισέλθει σε όμορο κόκκο και να εγκλωβιστεί πάλι στον κόκκο,
- να μεταφερθεί στους πόρους του εδάφους κατά την διάρκεια μετακίνησης του.

Το τελικό αποτέλεσμα της μεταφοράς του ραδονίου είναι η απορροή και η εκροή:

**Μεταφορά** (transport) ή **απορροή** ονομάζεται το αποτέλεσμα της διαφυγής του ραδονίου προς το εδαφικό πορώδες, λόγω της  $\alpha$  - διάσπασης του ραδίου που υπάρχει στους κόκκους του εδάφους. Για τα περισσότερα είδη εδαφών, μόνο το 10 έως 50% του παραγόμενου ραδονίου, διαφεύγει από τον κόκκο και εισέρχεται στους πόρους του εδάφους.

**Εκροή** (emanation) ονομάζεται η διαφυγή του ραδονίου προς τον ατμοσφαιρικό αέρα, όταν μέρος του ραδονίου που έχει διαφύγει λόγω απορροής, συνεχίζει και κινείται και διαφεύγει από την επιφάνεια του εδάφους προτού διασπαστεί. Για να θεωρηθεί αξιόλογη η εκροή του ραδονίου προς τον εδαφικό αέρα, το άτομο ραδονίου θα πρέπει να έχει δημιουργηθεί σε απόσταση 20 – 70 nm μέσα από την επιφάνειά του ορυκτού.

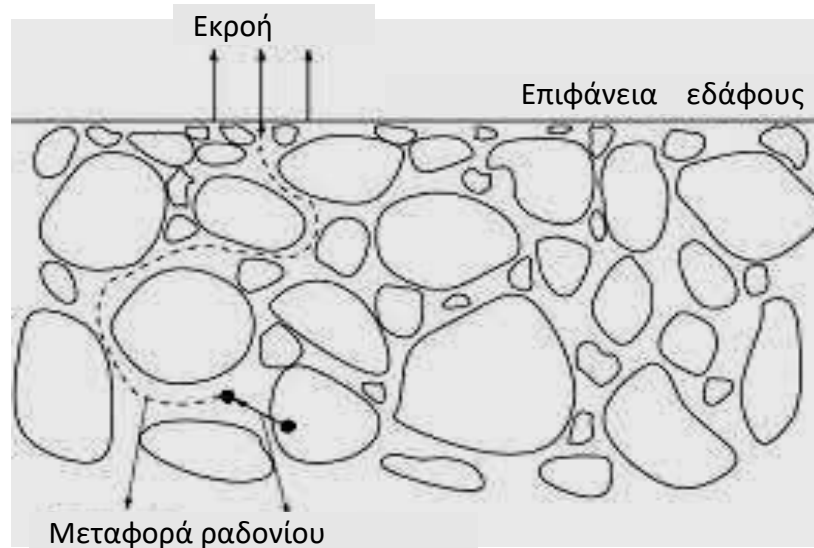
Η μεταφορά του ραδονίου στους πόρους του εδάφους πραγματοποιείται είτε με διάχυση ή με προσαγωγή:

**Διάχυση** (diffusion) πραγματοποιείται από την «ανάγκη» του αερίου να κινείται προς περιοχές χαμηλότερης συγκέντρωσης μέσα στο πέτρωμα, σε μια προσπάθεια να ισορροπήσει την συγκέντρωσή του σε αυτό. Γενικά, το ραδόνιο όντας αέριο, διέπεται από τους νόμους των αερίων και, συνεπώς, έχει την τάση να γεμίζει όλο τον χώρο που καταλαμβάνει.

**Προσαγωγή** (advection) ή **Ροή αέριας μάζας** (advective flow) συμβαίνει όταν με τη μεταβολή κάποιου εξωτερικού παράγοντα, τα μόρια μετακινούνται μαζικά προς μια κατεύθυνση. Ανάλογα με τις μετεωρολογικές συνθήκες, δημιουργούνται διαφορές στην ατμοσφαιρική πίεση, με αποτέλεσμα την κίνηση των πυρήνων ραδονίου. Η κυριότερη μεταβολή είναι η μεταβολή της πίεσης, γι αυτό και το όνομα του μηχανισμού.

Έρευνες έχουν δείξει ότι η διάχυση είναι αυτή που επικρατεί ως μηχανισμός διαφυγής του ραδονίου από το έδαφος στην ατμόσφαιρα [Nazaroff et al., 1988, Οικονομόπουλος, 2008].

Η παραπάνω διαδικασία παραγωγής και διαφυγής του ραδονίου φαίνεται σχηματικά παρακάτω, στο Σχήμα 3.



Σχήμα 2: Διαδικασία παραγωγής και διαφυγής ραδονίου[5]

Άλλοι γεωλογικοί παράγοντες, εκτός της συγκέντρωσης ουρανίου στα πετρώματα, που επηρεάζουν τη συγκέντρωση ραδονίου σε ένα κόκκο ή πέτρωμα καθώς και τη μεταφορά αυτού στην ατμόσφαιρα είναι:



Η υγρασία: Όταν ο κόκκος ενός υλικού έχει αυξημένη υγρασία, είναι πιθανότερο να εγκλωβιστεί μέσα στον κόκκο πριν εισέλθει σε όμορο κόκκο. Και αυτό διότι το ραδόνιο έχοντας υποστεί ανάκρουση μπορεί να διανύσει πολύ μικρότερες αποστάσεις εντός του ύδατος (περίπου 72 nm) συγκριτικά με εκείνες που μπορεί να διανύσει στον αέρα (65μm) [Ziegler and Biersak, 1985]. Κατ' αυτόν το τρόπο, η συγκέντρωση του ραδονίου στους πόρους ενός υλικού αυξάνεται με την αύξηση της υγρασίας (Πατήρης, 2009).

Η διαπερατότητα των πετρωμάτων: Η ικανότητα των πετρωμάτων και των εδαφών να μεταφέρουν υγρά και αέρια (διαπερατότητα) είναι και αυτή πολύ σημαντική γιατί και το διαλυμένο ουράνιο στο νερό του υπεδάφους και το ραδόνιο κινούνται πιο εύκολα μέσω υλικών που έχουν τη μέγιστη διαπερατότητα. Για παράδειγμα, ο ψαμμίτης έχει μεγαλύτερη διαπερατότητα απ' ότι ο γρανίτης ή ο σχιστόλιθος. Τα ψαμμώδη εδάφη είναι πιο διαπερατά από τα λασπώδη ή αργιλικά εδάφη (Otton, 1992). Ρωγμές και ρήγματα στα πετρώματα αποτελούν διαδρομές διαφυγής για το ραδόνιο, που δύναται να διανύσει μεγάλες αποστάσεις με άλλα διαφυγόντα αέρια (π.χ. CO<sub>2</sub>) και το νερό του υπεδάφους.

Παρακάτω παρουσιάζεται το τυπικό εύρος διαπερατότητας για τα διάφορα είδη πετρωμάτων, που συνήθως βασίζονται σε υδραυλικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε πηγάδια.

Πέτρωμα	Διαπερατότητα (m <sup>2</sup> )						
	10 <sup>-21</sup>	10 <sup>-19</sup>	10 <sup>-17</sup>	10 <sup>-15</sup>	10 <sup>-13</sup>	10 <sup>-11</sup>	10 <sup>-9</sup>
<b>Χαλαρά</b>							
Αμμοχάλικο							
Καθαρή άμμος							
Λασπώδης άμμος							
Λάσπη							
Άργιλος							
Σχιστόλιθος							
<b>Συμπαγή</b>							
Πυριγενή & μεταμορφωμένα πετρώματα <sup>1</sup>							
Μη συνεκτικοποιημένος τόφφος							
Συνεκτικοποιημένος τόφφος							
Ψαμμίτης							
Ασβεστόλιθος							
Πυριγενή & μεταμορφωμένα πετρώματα <sup>2</sup>							
Βασάλτης <sup>3</sup>							
Καρστικός ασβεστόλιθος							

1 Αδιατάρακτα

2 Διερυγμένα

3 Διαπερατός

i

Πίνακας 3: Διαπερατότητα πετρωμάτων (Gleeson et. al., 2011)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, αν το άτομο ραδονίου δημιουργηθεί κοντά στην επιφάνεια της γης ή υπάρχουν μικρορωγμές και διαθέτει την κατάλληλη διεύθυνση κίνησης, τότε μπορεί να περάσει στους πόρους του υλικού, διαφορετικά μένει στον κόκκο και στη συνέχεια διασπάται (Durrani and Ilic, 1997). Εκτός των γεωλογικών παραμέτρων, υπάρχουν και κλιματολογικοί και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τον τρόπο μεταφοράς του ραδονίου στο έδαφος. Όπως αναφέρουν οι Νικολόπουλος κ.α. (2015), γενικά, από τις περιβαλλοντικές παραμέτρους, αυτές που μπορούν να μεταβάλλουν το ρυθμό διαφυγής του ραδονίου είναι η βαρομετρική πίεση, το ύψος βροχόπτωσης, η θερμοκρασία και ο άνεμος, με τις δύο πρώτες παραμέτρους να επιδρούν κυρίως (Schery et al., 1989). Για παράδειγμα, αύξηση της προσαγωγής προς τον ατμοσφαιρικό αέρα μπορεί να παρατηρηθεί σε εδάφη ύστερα από μια ισχυρή βροχόπτωση, μετά από την οποία το ραδόνιο διαφεύγει με μεγαλύτερους ρυθμούς, πιεζόμενο – σαν από έμβολο – από τις σταγόνες της βροχής (Schery et al., 1989). Αντίστοιχα, μεταβολές της βαρομετρικής πίεσης εύρους 1000 – 2000 ras σε μια περίοδο 1-2 ημερών, προκαλούν σημαντική αύξηση της ροής ραδονίου λόγω εξαναγκασμένης μεταφοράς, τόσο ώστε να παρατηρείται αλλοίωση της ροής μεταξύ 20% και 60%, αυτής που θα υπήρχε αν δρούσε μόνο ο μηχανισμός της διάχυσης (Clements & Wilkening, 1974).

### **1.3.2 Ραδόνιο στα υπόγεια ύδατα**

Όσον αφορά στα ύδατα, το ραδόνιο έχει υψηλή διαλυτότητα στο νερό και γι' αυτό το λόγο μπορεί και πορεύεται μαζί του. Γενικά όμως, η διαλυτότητά του εξαρτάται από τη θερμοκρασία του νερού: όσο πιο κρύο είναι το νερό τόσο μεγαλύτερη είναι και η διαλυτότητα του ραδονίου. Λόγω της πολύ χαμηλής μερικής πίεσης που έχει το ραδόνιο στον αέρα, όταν το νερό έρθει σε επαφή με μάζες αέρα, το ραδόνιο μπορεί και διαφεύγει προς αυτές. Το χαρακτηριστικό του αυτό και σε συνδυασμό με τη διαλυτότητά του, έχει ως αποτέλεσμα η συγκέντρωση του ραδονίου στα υπόγεια ύδατα να είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν των ποταμών και των λιμνών.

Επιπλέον, όταν το πέτρωμα βρίσκεται κοντά στον υδροφόρο ορίζοντα, οι πόροι του περιέχουν μεγάλες ποσότητες νερού. Λόγω του ότι το ραδόνιο έχει μικρό μήκος διάχυσης στο νερό (5cm), όλο το ραδόνιο που διαφεύγει από τους κόκκους του εδάφους προς του πόρους, διαλύεται στο νερό και τελικά παραμένει στο εδαφικό πορώδες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις στους πόρους αυτούς να είναι αυξημένες. Αν το υπόγειο νερό

κινείται γρήγορα, τότε μπορεί να διαφύγει μια ποσότητα ραδονίου από το πέτρωμα (Χαραλάμπου, 2005; Tommasino, 2005; Οικονομόπουλος, 2008).

### **1.3.3 Ραδόνιο σε εξωτερικούς χώρους**

Οι συγκεντρώσεις ραδονίου θεωρούνται αμελητέες σε εξωτερικούς χώρους και αυτό διότι η ροή των αέριων μαζών καθώς και η μετακίνησή τους εξαιτίας π.χ. των μετεωρολογικών φαινομένων, αποτρέπουν τη συσσώρευσή του (Πατήρης, 2009).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι κύριες πηγές ραδονίου προς την ατμόσφαιρα, απ' όπου φαίνεται ότι οι μεγαλύτερες εκροές ραδονίου, προέρχονται από το έδαφος και τα υπόγεια ύδατα:

Πηγή	Εκροή στην ατμόσφαιρα (εκατομμύρια Ci ανά έτος)*
Εκροή από το έδαφος	2000
Υπόγεια ύδατα	500
Εκροή από ωκεανούς	30
Παραπροϊόντα κοιτασμάτων φωσφόρου	3
Παραπροϊόντα επεξεργασίας ουρανίου	2
Υπολείμματα άνθρακα	0,02
Φυσικό αέριο	0,01
Καύση άνθρακα	0,001

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

Πίνακας 4: Πηγές εκροής ραδονίου (NCRP 1984)

### **1.3.4 Παράγοντες Διαφυγής Ραδονίου**

Συνοπτικά, μετά την παραγωγή του ραδονίου, υπάρχουν τέσσερις πιθανότητες:

- Να διασπαστεί πλησίον του σημείο παραγωγής του.
- Να υποστεί διάχυση μέσω των γεμάτων αέρα πόρων του ιζήματος, λόγω της κινητικής ενέργειας των ατόμων ραδονίου. Μέσω αυτής του της ενέργειας, το

ραδόνιο μπορεί να μεταναστεύσει έως ένα μέτρο την ημέρα σε ξηρά ιζήματα, αλλά πολύ λιγότερο σε πόρους γεμάτα με νερό. Λόγω του μικρού χρόνου ημιζωής του (3,8 ημέρες), μόνο το ραδόνιο που έχει παραχθεί σε απόσταση λίγων μέτρων από την επιφάνεια του ξηρού ιζήματος μπορεί να δραπετεύσει κατ' αυτόν τον τρόπο.

- Να μεταφερθεί με προσαγωγή - να διοχετευθεί σε μάζες αέρα κινούμενες από τον άνεμο ή την αλλαγή της ατμοσφαιρικής πίεσης. Δηλαδή σε χώρους που εκκενώνονται, το ραδόνιο ακολουθεί την εκκένωση.
- Αν το ίζημα είναι κορεσμένο από νερό, δεν υπάρχει καμία μεταφορά ραδονίου. Αν όμως υπάρξει ξαφνική ροή νερού στα ιζήματα, τότε, καθώς το ραδόνιο είναι διαλυτό στο νερό, υπάρχει η πιθανότητα το ραδόνιο να μεταφερθεί από το σημείο παραγωγής του. Εφόσον απομακρυνθεί από τη ζώνη κορεσμού, τότε το ραδόνιο μπορεί να διαφύγει από το νερό και να εκλυθεί στην ατμόσφαιρα.

Γενικά, ο τρόπος και η ταχύτητα με την οποία κινείται το ραδόνιο μέσα από τα εδάφη και τα ύδατα, και η συγκέντρωσή του σε αυτά εξαρτάται από (Whittlestone et al., 2003; Cigna, 2005):

- τη συγκέντρωση ραδίου και ουρανίου στο πέτρωμα
- τον αριθμό των ατόμων ραδονίου που διαφεύγουν από τον πόρο
- το πορώδες, τη διαπερατότητα, την πυκνότητα και την υγρασία του εδάφους,
- τους μηχανισμούς μεταφοράς αερίων και ύδατος του εδάφους
- την πίεση και τη θερμοκρασία.

## 1.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ

Όπως αναφέρθηκε, το ραδόνιο διασπάται εκπέμποντας σωματίδιο  $\alpha$  και τα ραδιενεργά θυγατρικά του (Po-218, Pb-214, Bi-214 και Po-214) διασπώνται εκπέμποντας είτε σωματίδια  $\alpha$  ή σωματίδια-β και αντίστοιχα ακτινοβολία  $\gamma$ . Αυτά τα σωματίδια αποτελούν τύπους ionτίζουσας ακτινοβολίας που προκαλούν καρκινογενέσεις.

Σύμφωνα με στοιχεία του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας <sup>[6]</sup>, «η έκθεση σε υψηλές τιμές ραδονίου συνιστά τη δεύτερη αιτία πρόκλησης καρκίνου του πνεύμονα μετά το κάπνισμα», και συμπληρώνει πως «3-14% του καρκίνου των πνευμόνων σε μια χώρα προέρχονται από το ραδόνιο, ανάλογα με το μέσο επίπεδο ραδονίου και την τάση καπνίσματος».

Στις Η.Π.Α το ραδόνιο ευθύνεται για 20.000 θανάτους από καρκίνο του πνεύμονα ετησίως [EPA, 2016]. Σύμφωνα με ελληνικά δεδομένα, 300-700 περιπτώσεις καρκίνου του πνεύμονα ετησίως προκαλούνται από την έκθεση στο ραδόνιο (ΦΕΚ 1881/Β', 18.5.2020). Πρέπει να σημειωθεί ότι ο κίνδυνος εμφάνισης καρκίνου του πνεύμονα εξαιτίας του ραδονίου αυξάνεται πολύ για τους καπνιστές σε σχέση με τους μη καπνιστές.

#### **1.4.1 Ιστορική Αναδρομή**

Η πρώτη αναφορά που σχετίζεται με τις επιπτώσεις των ιοντίζουσων ακτινοβολιών, και συγκεκριμένα για το ραδόνιο στα ορυχεία, οφείλεται στον Επίκουρο, Έλληνα φιλόσοφος (γεννηθείς το 341 π.Χ. στη Σάμο, απεβίωσε το 270 π.Χ. στην Αθήνα), του οποίου οι μελέτες έχουν διασωθεί μερικώς έως σήμερα. Το κυρίως θέμα των μελετών του είναι γνωστά μέσω καμμένων παπύρων, που βρέθηκαν σε μια βιβλιοθήκη του Ηρακλείου Καμπανίας στην Ιταλία. Ωστόσο, η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη καταστράφηκε από την έκρηξη του Βεζούβιου το 79μ.Χ., με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η σύγχρονη ανεύρεση δεδομένων για την επίδραση των ιοντίζουσων ακτινοβολιών.

Αντίστοιχα δεδομένα για τις επιπτώσεις αναφέρονται από τον Titus Lucretius Carus, Λατίνος ποιητής, που γεννήθηκε γύρω στο 95 π.Χ. (ίσως στην Πομπηία, δίπλα στη Νάπολη) και αυτοκτόνησε μετά από 44 χρόνια αφού ένα φίλτρο αγάπης τον τρέλανε. Έγραψε ένα ποίημα με τίτλο «De rerum natura» (= για τη φύση των πραγμάτων), όπου, οι αναφορές του είχαν μια ιδιαίτερη άποψη για τα επιστημονικά δεδομένα της εποχής, γεγονός αρκετά αξιοπερίεργο (Carus, 61 ± 10 π.Χ.).

Συγκεκριμένα, η αναφορά του T.L. Carus για μια αρρώστια ενός εργάτη ορυχείου, επικαλούμενος μία μελέτη που είχε συνταχθεί από τον Επίκουρο, περίπου 200 χρόνια νωρίτερα, είναι πιθανότατα η αρχαιότερη αναφορά σε ραδιενεργό καρκίνο του πνεύμονα (ο οποίος τυγχάνει να είναι και ο αρχαιότερος γνωστός τύπος ραδιενεργούς κακοήθειας).

Είναι δύσκολο να γνωρίζει κάποιος αν αυτή η ασθένεια του εργάτη προκλήθηκε από πυριτιάση ή από το ραδόνιο: ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι στα πεδία του Παγγαίου όρους (όπου ευρίσκονταν τα ορυχεία που επικαλούνταν ο T.L. Carus), η εσωτερική συγκέντρωση ραδονίου είναι πάνω από 100Bq/m<sup>3</sup> και η εξωτερική δόση ακτινοβολίας - γ είναι περίπου 100nGy/ώρα (Green et al. 1991). Συνεπώς, αυτές οι τιμές (ανάμεσα στις υψηλότερες σε σχέση με ολόκληρη την Ελλάδα), υποστηρίζουν την υπόθεση, ότι σε τέτοιου

είδους ορυχεία, μπορούν να ανιχνευθούν συγκεντρώσεις ραδονίου τόσο υψηλές ώστε να προκαλέσουν κακοήθειες στους εργάτες. Από την άλλη πλευρά, η τεχνολογία των ορυχείων ήταν τέτοια εκείνη την εποχή, που δεν θα μπορούσε να παράγει τόσο υψηλές ποσότητες σκόνης ώστε να προκαλέσουν πυριτίαση.

Έναν αιώνα μετά, ένας άλλος Λατίνος φιλόσοφος, ο Lucius Annaeus Seneca (γεννηθείς στις 4 στην Κόρδοβα Ισπανίας, απεβίωσε το 65 μ.Χ. στη Ρώμη) ανέφερε ξανά το πρόβλημα των βλαβερών αερίων που απελευθερώνονταν στα σπήλαια, που ίσως μερικές φορές να είχαν κάποια σύνδεση με το ραδόνιο (Seneca, 60±5).

Την ίδια περίοδο, άλλος Λατίνος συγγραφέας, ο Gaius Plinius Secundus, γνωστός ως «Plinius ο Πρεσβύτερος» (γεννηθείς το 23 στο Κόμο, απεβίωσε το 79μ.Χ. στην Στάμπια), δημιούργησε μια μεγάλη εγκυκλοπαίδεια (Plinius, 77) χωρισμένη σε 37 τόμους. Ήταν σίγουρο ότι ήταν γνώστης των αναφορών των προηγούμενων συγγραφέων, και αντίστοιχες αναφορές σχετικά με τις βλαβερές απελευθερώσεις από το έδαφος περιλαμβάνονται στην δουλειά του, χωρίς όμως να υπάρχουν συγκεκριμένα δεδομένα χρήσιμα για τη μελέτη των επιπτώσεων.

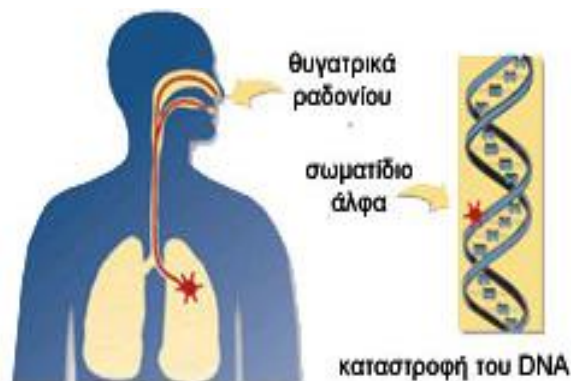
Η επόμενη αναφορά για τον ραδιενεργό καρκίνο των πνευμόνων εμφανίζεται αρκετά αργότερα, από τον γιατρό Agricola στο Schneeberg του όρους Erz (περιοχή με άφθονο ορυκτό πλούτο) τον 16<sup>ο</sup> αιώνα. Η πρώτη παράθεση γίνεται στο «Barmannus» (Agricola, 1530) η οποία επεκτάθηκε αργότερα (Agricola, 1556) ως: «Από τις ασθένειες, κάποιες επιτίθενται στις κλειδώσεις, άλλες επιτίθενται στα πνευμόνια, κάποιες στα μάτια, και τελικά κάποιες είναι θανάσιμες για τους ανθρώπους». Επίσης, ο Paracelsus (Ελβετός φυσικός (1493 – 1541) του οποίου απονεμήθηκε ο τίτλος «Λούθηρου της Ιατρικής») ανέφερε μια ασυνήθιστη υψηλή θνησιμότητα από ασθένεια των πνευμόνων σε νεαρούς εργάτες ορυχείων (Paracelsus, 1567). Εν συνεχεία, ομοίως, ο B. Ramazzini (1713) (Ιταλός φυσικός (1613 – 1714), θεωρείται ο ιδρυτής της ιατρικής των επαγγελματιών), παραθέτει προηγούμενους επιστήμονες οι οποίοι τόνιζαν τις παρατηρήσεις των Agricola και Carus (Cigna, 2005).

Ανάμεσα στους εργάτες των ορυχείων στην περιοχή Schneeberger – Jachymov στο Erzgebirge η ασθένεια ήταν γνωστή ως «Schneeberger Krankheit», η οποία διαγνώστηκε ως καρκίνος του πνεύμονα το 1879 από τους Γερμανούς γιατρούς Harting και Hesse. Η πιθανή συσχέτισή του με το ραδόνιο προτάθηκε περίπου 40 χρόνια μετά, όταν ανακαλύφθηκαν οι υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου στην περιοχή αυτή, και η πραγματική αιτία της ασθένειας αυτής αναγνωρίστηκε τη δεκαετία του 50, μόνο μετά από τις πρώτες προσπάθειες για τη θέσπιση ορίων δοσιμετρίας για τους πνεύμονες (Aurand et al., 1955; Bale & Shapiro, 1955).

#### **1.4.2 Νεώτεροι χρόνοι**

Το αέριο ραδόνιο αποτελεί την κυρίαρχη πηγή έκθεσης του ανθρώπου σε ιοντίζουσα ακτινοβολία, σε παγκόσμιο επίπεδο. Το ραδόνιο προέρχεται από το απανταχού παρών στη φύση ουράνιο, έτσι ώστε κι αυτό να ανιχνεύεται παντού. Μπορεί να συσσωρευτεί σε κλειστούς χώρους, όπως στις κατοικίες, στους χώρους εργασίας, στα σπήλαια και τα ορυχεία, και να έχει επίδραση είτε σε μεμονωμένα άτομα ή και σε ολόκληρο πληθυσμό. Στο ραδόνιο οφείλεται το 55% της ετήσιας ραδιενεργού δόσης που προσλαμβάνει ο άνθρωπος τόσο από φυσικές όσο και από ανθρωπογενείς πηγές ραδιενέργειας [NCRP, 1987].

Το ραδόνιο και τα θυγατρικά του μπορούν να μπουν στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της εισπνοής και να επικαθήσουν στους πνευμονικούς ιστούς, όπως στην Εικόνα 2. Ειδικά για τα ραδιενεργά θυγατρικά του ραδονίου, έχουν την τάση να προσκολλώνται σε αιωρούμενα σωματίδια, με τη μορφή αεροζόλ, τα οποία ομοίως με την εισπνοή εισέρχονται στους πνεύμονες. Στη συνέχεια τα θυγατρικά διασπώνται εκπέμποντας κυρίως σωματίδια – α, με αποτέλεσμα απορρύθμιση της λειτουργίας, και, ίσως αργότερα, την καρκινογένεση αναφέρει ο Νικολόπουλος κ.ά. (2015).



Εικόνα 2: Επίδραση του ραδονίου στον άνθρωπο<sup>[7]</sup>

Προτού διαγνωστεί η επικινδυνότητα του ραδονίου για την ανθρώπινη υγεία, πραγματοποιούνταν μελέτες και οι μετρήσεις του χρησιμοποιούνταν ως γεωλογικοί δείκτες για το ράδιο και το ουράνιο, για θεραπείες καρκίνου και ως αδρανείς ανιχνευτές αέριων μαζών (Tommasino 2005). Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (World Health Organization - WHO) έχει κατηγοριοποιήσει το ραδόνιο ως «καρκινογενή ουσία κατηγορίας 1» αναφέρει ο

Tommasino (2005) με βασική επίπτωση στον ανθρώπινο οργανισμό τον καρκίνο του πνεύμονα.

Η δόση ραδονίου που εκτίθεται κάποιος στο ραδόνιο εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες.

Ο Tommasino (2005) αναφέρει τους παρακάτω:

- Η συγκέντρωση του ραδονίου και των θυγατρικών του στην κατοικία
- Στον χώρο εργασίας
- Στο εξωτερικό περιβάλλον
- Οι διακυμάνσεις των ανωτέρω
- Ο παράγοντας ισορροπίας
- Η κατανομή των συγκεντρώσεων αεροζόλ και οι μεταβολές της
- Ο ρυθμός αναπνοής
- Το ιστορικό εκθέσεων σε ραδόνιο

Η βαρύτητα της συνεισφοράς της συγκέντρωσης ραδονίου και των θυγατρικών του στο φυσικό ραδιενεργό παρασκήνιο, προκάλεσε την παγκόσμια προσοχή, ώστε να θεσπιστούν κάποιου είδους έλεγχοι και τιμές αναφοράς για να μειωθεί η δόση που μπορεί ο άνθρωπος να εκτείνεται.

Ειδικά για την Ευρώπη, σύμφωνα με την πιο πρόσφατη οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Οδηγία 2013/59/Euratom) η Ελλάδα και τα κράτη μέλη υποχρεούνται να καθορίσουν εθνικό επίπεδο αναφοράς για τις συγκεντρώσεις ραδονίου σε εσωτερικούς χώρους εργασίας, ορίζοντας στο Άρθρο 54 «τα επίπεδα αναφοράς για τον ετήσιο μέσο όρο της συγκέντρωσης ενεργότητας στην ατμόσφαιρα δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 300 Bq/m<sup>3</sup>, εκτός αν αυτό δικαιολογείται από τις επικρατούσες εθνικές συνθήκες» και θεσπίζει υπό κανονιστικό έλεγχο την έκθεση σε ραδόνιο σε εργασιακούς χώρους όπου παρατηρούνται μεγάλες συγκεντρώσεις. Για την Ελλάδα, το εθνικό επίπεδο αναφοράς, σύμφωνα με το προεδρικό διάταγμα 101/2018, έχει θεσπιστεί, επίσης, στα 300Bq/m<sup>3</sup>.

Τέλος, με στόχο την ενημέρωση και ευαισθητοποίηση του κοινού για το ραδόνιο ως σημαντική πηγή έκθεσης σε ιοντίζουσα ακτινοβολία, έχει καθιερωθεί η 7<sup>η</sup> Νοεμβρίου ως Ευρωπαϊκή Ημέρα Ραδονίου.(<http://eeae.gr/>).



## 1.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ

Προκειμένου να μετρηθεί η συγκέντρωση του ραδονίου στον αέρα, ανιχνεύεται και καταγράφεται η ραδιενεργή ακτινοβολία (α-σωματιδίων ή γ-φωτονίων) που «εκπέμπεται από τις διασπάσεις της αλυσίδας του ραδονίου που περιέχεται σε ένα συγκεκριμένο όγκο αέρα» αναφέρουν οι Νικολόπουλος κ.ά (2015).

### Ενεργητικοί ανιχνευτές (active detectors)

Οι ανιχνευτές αυτοί χρειάζονται ενέργεια-ηλεκτρική ισχύς για να λειτουργήσουν και διακρίνονται σε:

- 1) Θαλάμου σπινθηρισμών
- 2) Ιοντισμού
- 3) Ημιαγώγιμων θαλάμων

Η ηλεκτρική ισχύς χρειάζεται για να λειτουργήσουν οι αντλίες, οι οποίες σύμφωνα με τον Tommasino (2005), θα “σπρώξουν” δείγμα αέρα μέσα στον θάλαμο του ανιχνευτή.

### Παθητικοί ανιχνευτές (passive detectors)

Σε αντίθεση με τους ενεργητικούς, οι παθητικοί ανιχνευτές δεν χρειάζονται ισχύ για να λειτουργήσουν, αφού χρησιμοποιούν την μέθοδο της διάχυσης για την καταγραφή της συγκέντρωσης του ραδονίου. Τα είδη των παθητικών ανιχνευτών είναι τα εξής:

- 1) Καταγραφής ιχνών (etched track)
- 2) Ενεργοποιημένου ξυλάνθρακα (activated charcoal)
- 3) Διηλεκτρικών υλικών (electret ionisation)

Πέραν από τους ανιχνευτές, και η δειγματοληπτική μέθοδος μέτρησης της συγκέντρωσης διαχωρίζεται σε:

- 1) Στιγμιαία (grab sampling), όπου μετράται η συγκέντρωση ραδονίου σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή
- 2) Συνεχής (continuous sampling), κατά την οποία καταγράφεται η συγκέντρωση ανά τακτά χρονικά διαστήματα
- 3) Ολοκληρωτική (integrated sampling), όπου η συγκέντρωση υπολογίζεται από μετρήσεις μικρής και μεγάλης διάρκειας

Κάθε δειγματοληπτική μέθοδος μπορεί να συνδυαστεί με συγκεκριμένους ανιχνευτές ανάλογα με τον σκοπό μέτρησης της συγκέντρωσης του ραδονίου.

Στην **στιγμιαία μέθοδο**, ένα δοχείο γεμίζει με το προς εξέταση δείγμα αέρα. Συνήθως πρόκειται για *δοχείο σπινθηρισμών (scintillation flask)* όπως αναφέρει ο Tommasino (2005), τα τοιχώματα του οποίου είναι συνήθως από θειούχο ψευδάργυρο. Με την αλληλεπίδραση του θειούχου ψευδαργύρου και των α-σωματιδίων δημιουργούνται σπινθηρισμοί. Ο θάλαμος μπορεί να γεμίσει είτε με κενό αέρος είτε με πίεση από αντλία. Μετά την πλήρωσή του, το δοχείο μεταφέρεται στο εργαστήριο, μετρούνται με την βοήθεια μεγεθυντικού σωλήνα. Η ελάχιστη συγκέντρωση που μπορεί να ανιχνευτεί είναι 37Bqm-3 (1pCi-l-1).

Στην **συνεχή μέτρηση**, η συγκέντρωση του ραδονίου μετράτε από λίγα λεπτά έως αρκετές ημέρες δίνοντας μια σειρά τιμών σε διάφορες χρονικές στιγμές. Για την συνεχή δειγματοληψία μπορούν να χρησιμοποιηθούν 4 μέθοδοι: δοχείο σπινθηρισμών, ηλεκτροστατική διάχυση, θάλαμος ιοντισμού και μέθοδος των δυο φίλτρων.

Όπως και στην στιγμιαία, σ' ένα δοχείο σπινθηρισμών εισάγεται δείγμα αέρα και μετρούνται οι σπινθηρισμοί από την αντίδραση του υλικού των τοιχωμάτων με τα α-σωματίδια. Στην περίπτωση της συνεχούς δειγματοληψίας, αέρας μπαίνει συνεχώς στο δοχείο και οι σπινθηρισμοί μετρούνται αντίστοιχα.

Στην ηλεκτροστατική μέθοδο διάχυσης, με την χρήση ηλεκτροστατικού πεδίου, τα παράγωγα της διάλυσης του ραδονίου έλκονται στην επιφάνεια ενός ανιχνευτή σπινθηρισμών και η μέτρησή τους στην συνέχεια γίνεται όπως έχει προαναφερθεί.

Στους θαλάμους ιοντισμού, η τάση μέσα στον θάλαμο είναι ανάλογη της συγκέντρωσης του ραδονίου. Η ελάχιστη μετρήσιμη συγκέντρωση είναι 0,5Bqm-3.

Στην μέθοδο των δυο φίλτρων, το πρώτο φίλτρο χρησιμοποιείται προκειμένου ν' απομακρυνθούν όλα τα προϊόντα διάσπασης του ραδονίου ενώ στο δεύτερο φίλτρο αναπτύσσονται και συγκεντρώνονται τα παράγωγα της διάσπασης. Μετρώντας την ενεργότητα του δεύτερου φίλτρου, μετράται και η συγκέντρωση του ραδονίου, αφού οι δυο ποσότητες είναι ανάλογες.

Στις **ολοκληρωτικές μεθόδους**, το διάστημα μέτρησης ξεκινά από μερικές ημέρες και φτάνει αρκετούς μήνες έως και ένα έτος, με την βοήθεια τόσο ενεργητικών όσο και παθητικών ανιχνευτών. Από το σύνολο των μετρήσεων προκύπτει η μέση τιμή που αντιστοιχεί σε όλο το χρονικό διάστημα μέτρησης.

Οι ανιχνευτές καταγραφής ιχνών (SSNTD) χρησιμοποιούν την ιδιότητα συγκεκριμένων πολυμερών να καταστρέφονται περιοχές τους όταν σ' αυτά χτυπήσει ένα σωματίδιο (π.χ. α-σωματίδιο). Με την βοήθεια χημικών, οι περιοχές αυτές μπορούν να παρατηρηθούν μακροσκοπικά ή μικροσκοπικά και να μετρηθούν ως ίχνη και άρα να υπολογιστεί η συγκέντρωση του ραδονίου.

Στους ανιχνευτές ενεργοποιημένου ξυλάνθρακα (activated charcoal) χρησιμοποιείται μεταλλικό δοχείο το οποίο περιέχει ενεργοποιημένο ξυλάνθρακα. Λόγω της προσρόφησης του ραδονίου από τον ενεργοποιημένο ξυλάνθρακα, το ραδόνιο διασπάται και παράγει γ-ακτινοβολία, η οποία και μετράται στο τέλος της έκθεσης του δοχείου στο προς μελέτη περιβάλλον.

		Μέθοδος δειγματοληψίας		
		Στιγμιαία	Συνεχής	Ολοκληρωτική
<b>Παθητικοί ανιχνευτές</b>	Καταγραφής ιχνών			X
	Ενεργοποιημένου ξυλάνθρακα			X
	Διηλεκτρικών υλικών			X
<b>Ενεργητικοί ανιχνευτές</b>	Θαλάμου σπινθηρισμών	X	X	
	Θαλάμου ιοντισμού	X	X	
	Θαλάμου ημιαγωγών	X	X	

Πίνακας 5: τεχνικές μέτρησης συγκέντρωσης ραδονίου

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

### **ΡΑΔΟΝΙΟ ΚΑΙ ΣΠΗΛΑΙΑ**

Επισκέψεις σε σπήλαια γίνονται είτε ερασιτεχνικά (ερασιτέχνες σπηλαιολόγοι, φυσιοδίφες, φυσιολάτρες) είτε επαγγελματικά (αρχαιολογικές ανασκαφές, έρευνες, μόνιμη απασχόληση σε τουριστικά αξιοποιημένων σπηλαίων). Σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία (ΦΕΚ1881/Β 18.5.2020), είναι υποχρεωτικός ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης ραδονίου στα τουριστικά σπήλαια, ως «χώρος εργασίας προτεραιότητας». Στην κατηγορία αυτή εμπίπτουν τα ορυχεία, οι ιαματικοί φυσικοί πόροι, η παραγωγή πετρελαίου κ.ά. Στην Ελλάδα, η εποπτεύουσα αρχή για την επισκόπηση του ραδονίου είναι η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ).

### **2.1. ΡΑΔΟΝΙΟ ΚΑΙ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ**

#### **2.1.1. Ουράνιο στα πετρώματα και τα εδάφη**

Όλα τα πετρώματα περιέχουν ουράνιο. Η ύπαρξη ουρανίου στα πετρώματα έχει να κάνει με τον τρόπο δημιουργίας των πυριγενών πετρωμάτων και αυτό διότι η πλειοψηφία των πετρωμάτων στη Γη είχαν υποστεί μαγματική διεργασία, σε κάποιο σημείο της δημιουργίας τους. Δηλαδή, αρκετά ιζηματογενή και μεταμορφωμένα πετρώματα προέρχονται από κάποιο πυριγενές πέτρωμα.

Καθώς το μάγμα στερεοποιείται, διάφορα ορυκτά ενσωματώνονται στα κρύσταλλα και την ύλη του πετρώματος με μια κανονικότητα (Norm - normalisation). Το ουράνιο ωστόσο δεν ενσωματώνεται εύκολα στη δομή των ορυκτών που αναπτύσσονται κατά την στερεοποίηση του μάγματος. Συνήθως ενσωματώνεται στο πέτρωμα στο τέλος της διαδικασίας της κρυσταλλοποίησης. Έτσι τα αποθέματα ουρανίου βρίσκονται κυρίως στις εξωτερικές επιφάνειες των πετρωμάτων και ανάμεσα στις ρωγμές της ύλης του πετρώματος.

Τα πετρώματα συνεισφέρουν ποικιλοτρόπως στην δημιουργία εδαφών. Έτσι πολλά εδάφη περιέχουν και μικρές ποσότητες ουρανίου (1 έως 3ppm). Γενικά, η ποσότητα του ουρανίου στο έδαφος θα είναι ανάλογη με την ποσότητα του ουρανίου που είχε το πέτρωμα από το οποίο δημιουργήθηκε. Μερικά είδη πετρωμάτων έχουν πάνω από το μέσο όρο περιεκτικότητας ουρανίου. Αυτά είναι κυρίως τα ανοιχτόχρωμα ηφαιστειακά πετρώματα, οι

γρανίτες, ο μαύρος σχιστόλιθος, τα ιζηματογενή πετρώματα που περιέχουν φωσφορικά άλατα, και τα μεταμορφωμένα πετρώματα προερχόμενα από τα παραπάνω πετρώματα. Αυτά τα πετρώματα και τα αντίστοιχα εδάφη μπορεί να περιέχουν έως και 100 ppm ουρανίου (από Μπεχλιβάνος 2014, Otton 1992).

Η περιεκτικότητα του ουρανίου στον φλοιό της γης αλλά και των πετρωμάτων, ποικίλουν ανάλογα με την θέση και τη γεωλογική ηλικία. Ενδεικτικές μετρήσεις περιεκτικότητας ουρανίου στα πετρώματα, από δεδομένα του σοβιετικού γεωχημικού Α. Ρ. Vinogradov, παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

ΠΕΤΡΩΜΑ	ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΟΥΡΑΝΙΟΥ (% του βάρους)
1. Φλοιός της γης	$3 \times 10^{-4} \%$
2. Πυριγενή πετρώματα:	
Υπερβασικής σύστασης πετρώματα (περιδοτίτης, πυροξανίτης)	$3 \times 10^{-6} \%$
Βασικής σύστασης πετρώματα (βασάλτης, γάββρος, τραχίτης)	$3 \times 10^{-5} \%$
Ενδιάμεσης σύστασης πετρώματα (διορίτης, ανδεσίτης)	$1,8 \times 10^{-4} \%$
Όξινης σύστασης πετρώματα (γρανίτης, λιπαρίτης, ρυόλιθος κ.α.)	$3,5 \times 10^{-4} \%$
3. Ιζηματογενή πετρώματα: Ψαμμίτης και σχιστόλιθος	$3,2 \times 10^{-4} \%$

Πίνακας 6: Περιεκτικότητα του ουρανίου στα πετρώματα<sup>[7]</sup>

Όλα τα ισότοπα του ουρανίου είναι ραδιενεργά. Διασπώνται εκπέμποντας ακτινοβολία – α. Το φυσικό ουράνιο αποτελείται από τρία ισότοπα, εκ των οποίων το  $^{238}\text{U}$  είναι στη μεγαλύτερη αφθονία (99,276%). Από τις ραδιενεργές διασπάσεις του ουρανίου, και συγκεκριμένα από το  $^{238}\text{U}$  παράγεται το ράδιο  $^{226}\text{Ra}$ . Η μέση συγκέντρωση του Ra-226 στα εδάφη παγκοσμίως είναι 40 Bq/kg (δηλαδή συμβαίνουν 40 διασπάσεις πυρήνων ραδίου το δευτερόλεπτο σε μάζα πετρώματος της γης ενός κιλού), σύμφωνα με τη σχετική δημοσίευση

της UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993, 2008.

Όπως αναφέρθηκε, το ράδιο εν συνεχεία διασπάται παράγοντας ραδόνιο. Συνεπώς, λόγω των διασπάσεων της αλυσίδας του  $^{238}\text{U}$  που υπάρχει στο έδαφος και τα πετρώματα, ανανεώνονται διαρκώς οι πυρήνες  $^{226}\text{Ra}$  και παράγεται συνεχώς ραδόνιο. Έτσι, η ποσότητα του παραγόμενου ραδονίου εξαρτάται από την ποσότητα του  $^{238}\text{U}$  που περιέχεται στα εδάφη και τα πετρώματα. Όταν η συγκέντρωση του ουρανίου είναι μεγάλη στο πέτρωμα, συνεπάγεται ότι και ο ρυθμός παραγωγής και η συγκέντρωση ραδονίου είναι επίσης μεγάλη. Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται οι μετρήσεις ραδίου και ραδονίου σε πετρώματα σε βάθος ενός μέτρου. (Νικολόπουλος κ.ά., 2015; Μισαηλίδη, 2017).

Τύπος Εδάφους	Ράδιο - 226 (Bq kg <sup>-1</sup> )*	Ραδόνιο (Bq m <sup>-3</sup> )
Υπολειμματικά εδάφη	15 - 65	5.000 - 30.000
Αποθέσεις παγετώνων ή γηγενή εδάφη με θραύσματα γρανίτη	30 - 125	10.000 - 60.000
Αποθέσεις παγετώνων ή γηγενή εδάφη με θραύσματα γρανίτη πλούσιο σε ουράνιο	125 - 360	10.000 - 200.000
Αμμοχάλικο	30 - 75	10.000 - 250.000
Άμμος	5 - 35	2.000 - 20.000
Πηλός	10 - 50	5.000 - 60.000
Άργιλος (clay)	10 - 100	10.000 - 100.000

\* 12,3 Bq kg<sup>-1</sup>  $^{226}\text{Ra}$  είναι ισοδύναμο με 1ppm ουρανίου

Πίνακας 7: Κανονικές Συγκεντρώσεις ραδίου και ραδονίου, μετρημένες σε βάθος ενός μέτρου (Νικολόπουλος, 2008, από Durrani & Ilic, 1997)

## 2.2 ΣΠΗΛΑΙΟΓΕΝΕΣΗ-ΕΙΔΗ ΣΠΗΛΑΙΩΝ

Η σπηλαιογένεση είναι ορισμός που χρησιμοποιείται στην σπηλαιολογία και τη γεωλογία για να περιγράψει τον μηχανισμό δημιουργίας οποιουδήποτε σπηλαίου. Με τον όρο σπηλαιογένεση εννοούμε το σύνολο των φυσικοχημικών και βιολογικών φαινομένων που γίνονται η αιτία της δημιουργίας του πρώτου μικρού εγκοίλου μέσα σε ένα πέτρωμα, το οποίο με την πάροδο του χρόνου θα εξελιχθεί σε σπήλαιο (Γιαννόπουλος, 2000). Ως σπήλαιο μπορεί να οριστεί ένα φυσικό όρυγμα, διαστάσεων ικανών, ώστε να χωράει ένας άνθρωπος (Gunn, 2004). Οι ρυθμοί σχηματισμού των σπηλαίων, ή αλλιώς της σπηλαιογένεσης, ποικίλουν καθώς επηρεάζονται από μία σειρά από γεωλογικές, υδρογεωλογικές, μετεωρολογικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες. Αυτές οι διεργασίες μπορεί να περιλαμβάνουν καθίζηση, κίνηση υπόγειων υδάτων, αλμυρότητα, λιθολογία των πετρωμάτων, χημεία του νερού, διάβρωση, σκάψιμο, πίεση, τεκτονικές συνθήκες, παρουσία βακτηρίων κ.α. <sup>[8], [9]</sup>

Ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού τους (λόγω μηχανικών ή χημικών διεργασιών) αλλά και με το πέτρωμα ή το υλικό από το οποίο έχουν δημιουργηθεί, τα σπήλαια χωρίζονται σε διάφορους τύπους. Τα σπήλαια που σχηματίστηκαν λόγω μηχανικών διεργασιών, ο σχηματισμός τους οφείλεται κυρίως λόγω της διάβρωσης από τριβή. Σε αυτά ανήκουν τα:

- Αιολικά σπήλαια, σμιλευμένα από τον αέρα και απαντώνται συνήθως στις ερήμους. Ο αέρας μεταφέρει κόκκους ιζημάτων ή σωματίδια άμμου προσκρούοντας συνεχόμενα σε απόκρημνες βραχώδεις επιφάνειες ή αντίστοιχα λιθοδομήματα. Μετά από μια μεγάλη χρονική περίοδο, η διάβρωση αυτή που προκαλείται από τον αέρα δημιουργεί στον βράχο μορφολογίες σπηλαίων που έχουν μήκος μερικές δεκάδες μέτρα.
- Τεκτονικά σπήλαια, που δημιουργούνται από την μετακίνηση των τεκτονικών πλακών. Ογκώδη, εύθραυστα πετρώματα όπως ψαμμίτες και γρανίτες είναι οι καλύτεροι ξενιστές για αυτά τα σπήλαια.
- Σπήλαια παγετώνων, που σχηματίζονται από τη διαβρωτική δράση των παγετώνων διερχόμενοι από τα πετρώματα.

- Παράκτια σπήλαια. Δημιουργούνται όταν η δραστηριότητα των κυμάτων διαβρώνει τα πετρώματα από τις απόκρημνες βραχώδεις ακτές, για πάνω από μια γεωλογική περίοδο, ώστε να σχηματίσουν σπήλαιο.
- Σπήλαια διάβρωσης. Παράγονται όταν πραγματοποιείται διαβρωτική δράση του νερού στα κατώτατα στρώματα του πετρώματος ενός αδιάλυτου βράχου, δημιουργώντας μικρών διαστάσεων έγκοιλα.
- Σπήλαια κατάπτωσης, που σχηματίστηκαν από την πτώση ογκόλιθων δημιουργώντας μεγάλες εσοχές. Συνήθως είναι μικρά σε μέγεθος.

Στα σπήλαια που σχηματίστηκαν από χημικές διεργασίες ανήκουν τα:

- Καρστικά ή υπογενή σπήλαια. Είναι τα πιο διαδεδομένα και περίπλοκα συστήματα σπηλαίων. Σχηματίζονται κυρίως σε ανθρακικά πετρώματα όπως σε ασβεστόλιθο, δολομίτη, μάρμαρο και σε εβαποριτικά, όπως σε γύψο, ανυδρίτη και αλίτη. Τα καρστικά σπήλαια σχηματίζονται όταν νερό του υπεδάφους διαρρέει υπόγεια μέσα από σχισμές, διακλάσεις, ρίξεις και άλλα επιφανειακά ανοίγματα. Με την πάροδο των γεωλογικών εποχών, μικρές ρωγμές στο πέτρωμα γίνονται μεγάλα σπηλαιολογικά συστήματα.
- Σπήλαια λάβας. Είναι σπήλαια που σχηματίστηκαν μέσω ηφαιστειακής δραστηριότητας. Όταν η ζεστή υγρή λάβα κυλάει στην πλαγιά ενός ηφαιστείου, η επιφάνεια της λάβας ψύχεται και στερεοποιείται. Ωστόσο, ζεστή υγρή λάβα συνεχίζει και ρέει κάτω από την στερεοποιημένη επιφάνεια και όταν η ροή σταματά, δημιουργούνται συστήματα σπηλαίων. Το σπήλαιο λάβας μπορούν να είναι αρκετών χιλιομέτρων.
- Σπήλαια πάγου: υπάρχουν με τη μορφή μακριών σπηλαίων μεταξύ του υποκείμενου βραχώδους υπεδάφους και του πάγου του παγετώνα. Τα σπήλαια σχηματίζονται όταν το επιφανειακό νερό που προκύπτει από την τήξη των πάγων του παγετώνα αποχετεύεται προς τα κάτω, μέσα από ρωγμές, έως τη βάση του παγετώνα. Σε αυτή την περίπτωση, το νερό από την τήξη του πάγου προμηθεύει τη θερμότητα που λιώνει τον πάγο, δημιουργώντας σπηλαίες κατά μήκος του παγετώνα, καθώς αυτό κυλάει προς τα κάτω. Είναι συνήθως αυλακωτά κανάλια μεταφοράς με πολύπλοκα λαξευμένα τείχη, και έδαφος φτιαγμένο από το βραχώδες υπέδαφος. [12], [13]



Επιπλέον, γίνεται διάκριση των σπηλαίων ως προς την στιγμή της σπηλαιογένεσής τους, δηλαδή τη χρονική στιγμή της δημιουργίας του σπηλαίου σε αντιστοιχία με τη χρονική στιγμή που δημιουργήθηκε το πέτρωμα που περιέχουν. Έτσι, για παράδειγμα, τα σπήλαια λάβας σχηματίστηκαν την ίδια χρονική στιγμή με το πέτρωμα, ενώ τα αιολικά, τα τεκτονικά και τα καρστικά σπήλαια δημιουργήθηκαν εκ των υστέρων από τα αντίστοιχα πετρώματα, με την επίδραση άλλων παραγόντων (Παππά, 2014).

## **2.3. ΡΑΔΟΝΙΟ ΚΑΙ ΣΠΗΛΑΙΑ**

### **2.3.1 Συγκέντρωση ραδονίου στην ατμόσφαιρα του σπηλαίου**

Με τη λέξη ατμόσφαιρα νοείται κάθε τι που απαρτίζει και εμπεριέχεται στον εναέριο χώρο του σπηλαίου. Η θερμοκρασία, η υγρασία, η πίεση, η κίνηση της αέριας μάζας, η σύσταση του αέρα καθώς και η ραδιενέργεια αποτελούν και συνθέτουν την ατμόσφαιρα σε κάθε σπήλαιο (Γιαννόπουλος 2000). Σε οποιοδήποτε σύστημα αέρος, η συγκέντρωση ραδονίου εξαρτάται από την συγκέντρωση του ουρανίου στα πετρώματα, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες καθώς και τον βαθμό εξαερισμού στο σύστημα αυτό. Τα σπήλαια, έχοντας δικό τους σύστημα αέρος – δική τους ατμόσφαιρα, περιλαμβάνουν όλες τις παραπάνω παραμέτρους για την πιθανή ανίχνευση υψηλών συγκεντρώσεων ραδονίου κι αυτό διότι:

- Τα σπήλαια ποικίλουν ως προς τη λιθολογία τους και συνεπώς ως προς τη συγκέντρωση ουρανίου και ραδίου.
- Έχουν αρνητικό περιβάλλοντα αέρα (negative air space), με αποτέλεσμα το ραδόνιο να μετακινείται εύκολα εντός αυτών.
- Το ραδόνιο είναι διαλυτό στο νερό και παραμένει στα ύδατα και τις ατμόσφαιρες των σπηλαίων σε ισορροπία.
- Το μητρικό του ραδονίου, το ράδιο, μπορεί και αντιδρά και ιζηματοποιείται στα τοιχώματα των σπηλαίων ως ανθρακικό ράδιο ( $\text{RaCO}_3$ ), αποτελώντας μια συνεχής πηγή ραδονίου.
- Σε έγκλειστους χώρους, όπως είναι και τα σπήλαια, αλλά και τα ορυχεία και οι κατοικίες, η έλλειψη κυκλοφορίας του αέρα επιτρέπει την παραγωγή μεγάλων συγκεντρώσεων ραδονίου στον παγιδευμένο αέρα. Σε ενεργά ορυχεία ή αντίστοιχα στα σπίτια, το πρόβλημα αυτό επιλύεται με τεχνητό εξαερισμό, ωστόσο στα σπήλαια, τέτοιος εξαερισμός είναι ανεπίτρεπτος, λόγω των πιθανών δηλητηριωδών επιπτώσεων που μπορεί

να έχει στο μικροκλίμα και στη χλωρίδα και πανίδα του σπηλαίου (Field, 2007; BCARWP, 2012).

Αρκετές έρευνες έχουν γίνει σε σπήλαια αναφορικά με τη μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου, και αρκετές από αυτές έχουν επιδείξει υψηλές συγκεντρώσεις.

Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται από τον Field (2007) έρευνες σε σπήλαια διαφόρων χωρών, στα οποία παρουσιάζονται αρκετά υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου.

Χώρα	Μέση συγκέντρωση (Bq/m <sup>3</sup> )	Αριθμός μετρήσεων	Μέγιστη συγκέντρωση (Bq/m <sup>3</sup> )	Ελάχιστη συγκέντρωση (Bq/m <sup>3</sup> )
Αυστραλία	610	274	4045	9
Κίνα	141	32	278	38
Τσεχία	1235	60	21.000	200
Μεγάλη Βρετανία	2.907	820	46.080	10
Μεγάλη Βρετανία		2.000	155.000	100
Μεγάλη Βρετανία	35.890	34	155.000	7.400
Μεγάλη Βρετανία	9.306	13	12.552	68
Μεγάλη Βρετανία	365	42	3.187	26
Μεγάλη Βρετανία	315	28	3.047	34
Ελλάδα	25.179	6	88.060	185
Ουγγαρία	3.300	25	14.000	500
Ουγγαρία	2.468	8	13.200	200
Ιρλανδία	4.127	26	7.940	200
Ιαπωνία	11	5	20	<1
Μαλαισία	596	39	1.978	100
Πολωνία	1.166	279	4.180	60
Ρωσία	2.390	14	8.550	373
Σλοβενία	1.412	101	7.220	15
Σλοβενία	965	66	5.920	60
Ισπανία	108	301	488	5
Ισπανία	3.564	8.587	7.120	186
Νότιος Αφρική	267	63	2.319	3

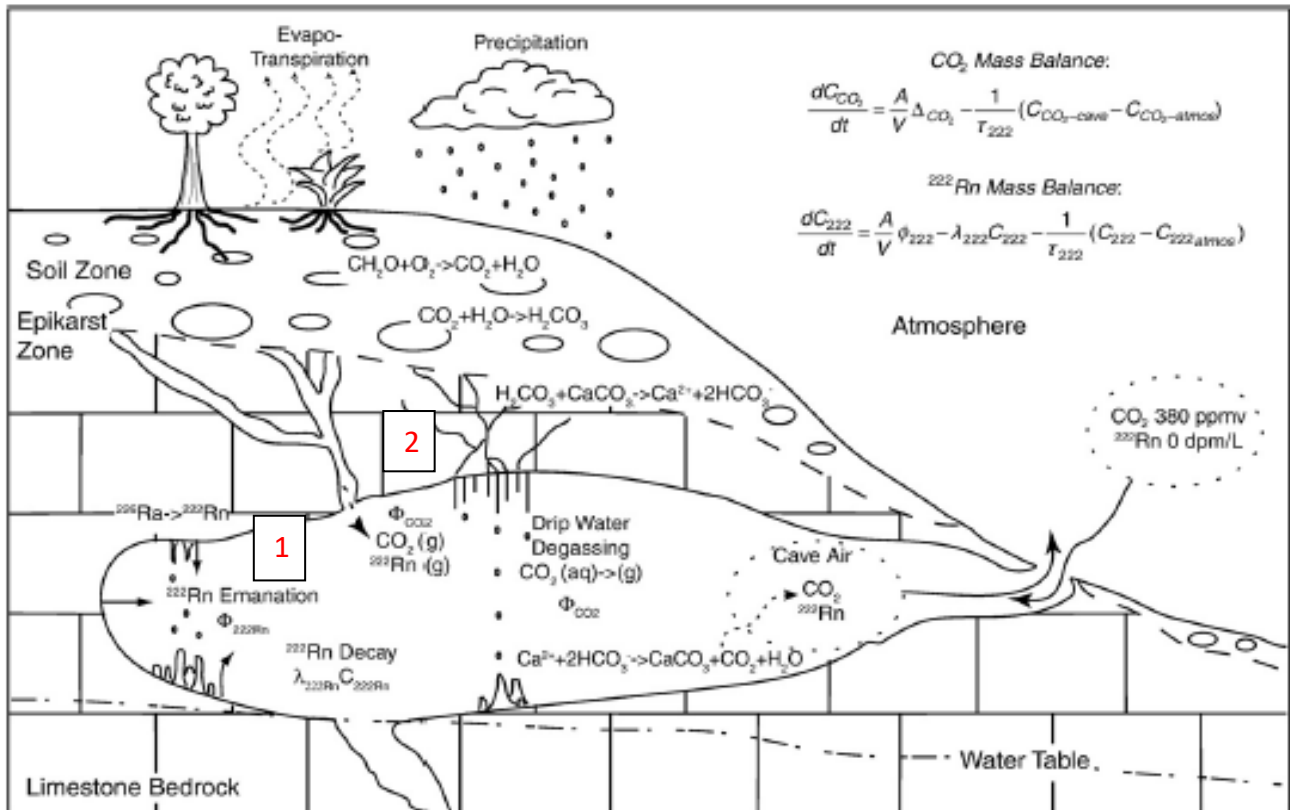
Ελβετία	25.000	6	40.000	2.000
Η.Π.Α	1.927	60	9.350	37
Η.Π.Α	2.589	11	9.460	370
Η.Π.Α	1.475		2.350	740
Η.Π.Α		860	1.850	333
Η.Π.Α	11.678	37	82.177	11

Πίνακας 8: Συγκεντρώσεις ραδονίου σε σπήλαια ανα τον κόσμο (Field, 2007)

Οι βασικοί μηχανισμοί εισόδου του ραδονίου στην ατμόσφαιρα του σπηλαίου είναι η διάχυση και η προσαγωγή:

- Το ραδόνιο διαχέεται στην ατμόσφαιρα του σπηλαίου με σταθερό ρυθμό μέσα από τους λεπτούς πόρους του ιζήματος πάνω από ένα αδιαπέρατο πέτρωμα. Σε αυτήν την περίπτωση, η ατμοσφαιρική πίεση δεν επηρεάζει ουσιαστικά τη συγκέντρωση του ραδονίου.
- Αν τα τοιχώματα του σπηλαίου είναι από ιζήματα μεσαίας διαπερατότητας και διερυγμένου πετρώματος, τότε η διαδικασία εισόδου του ραδονίου στο σπήλαιο πραγματοποιείται μέσω προσαγωγής. Σε αυτήν την περίπτωση, μία αύξηση της πίεσης του αέρα μπορεί να ωθήσει αέρα μέσα στις επιφάνειες του σπηλαίου. Ακόμη και μια πολύ μικρή ροή αέρα μέσα στις επιφάνειες των σπηλαίων, μπορεί να σταματήσει την διάχυση του ραδονίου, παράγοντας τελικά πολύ μικρές συγκεντρώσεις ραδονίου στην ατμόσφαιρα του σπηλαίου.
- Αντίθετα, μια μείωση στην πίεση του αέρα, θα τραβήξει αέρα από τις επιφάνειες του σπηλαίου, μεταφέροντας μαζί του και ραδόνιο, προκαλώντας τελικά υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου. (Whittlestone et al., 2003; Gunn, 2004).

Στο Σχήμα 3, φαίνεται η δημιουργία και η κυκλοφορία των αερίων εντός ενός καρστικού σπηλαίου. Το ραδόνιο εκλύεται από την διάσπαση του ουρανίου, το οποίο περιέχεται σε συγκεντρώσεις 1,3-2,5ppm στους ασβεστόλιθους. Το ραδόνιο είτε εκρέει από το περιβάλλον πέτρωμα του σπηλαίου, είτε εισέρχεται μαζί με διοξείδιο του άνθρακα από τα ανώτερα εδαφικά στρώματα εντός του σπηλαίου μέσω ρηγμάτων (εαν υπάρχουν).



Σχήμα 3: Η ατμόσφαιρα και οι διεργασίες εντός καρστικού σπηλαίου (Kowalczek et al., 2010). 1-Εκροή ραδονίου από το περιβάλλον πέτρωμα του σπηλαίου. 2-είσοδος ραδονίου μαζί με διοξείδιο του άνθρακα από ανώτερα εδαφικά στρώματα.

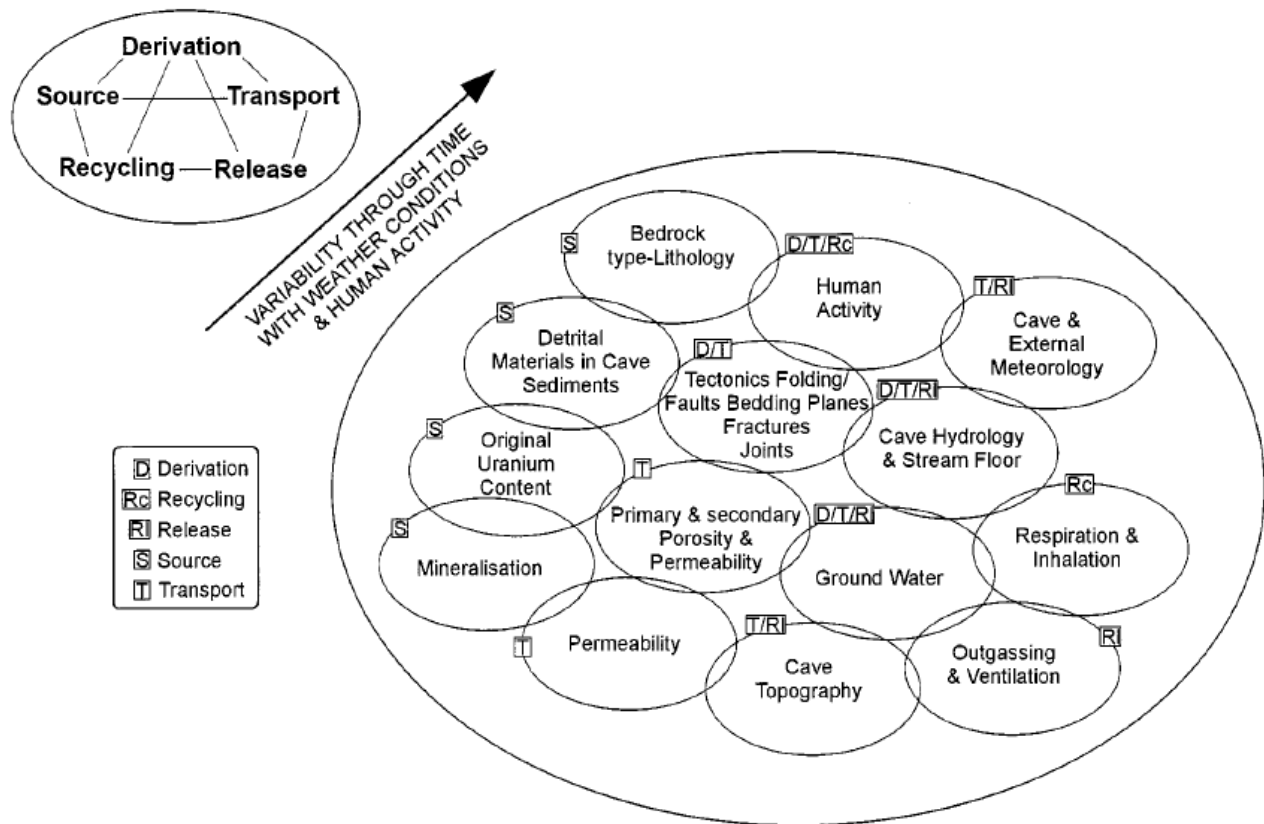
### 2.3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη συγκέντρωση ραδονίου στα σπήλαια

Γενικά, η συγκέντρωση ραδονίου σε οποιοδήποτε στιγμή αποτελεί μια πολύπλοκη λειτουργία της απορροής, της εκροής και του κλίματος του σπηλαίου. Στο Σχήμα 5, παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο μοντέλο με 14 γεωλογικές ιδιότητες που επηρεάζουν την συγκέντρωση του ραδονίου στα σπήλαια. Οι ιδιότητες συνεισφέρουν στην

- Παραγωγή
- Ανακύκλωση
- Απελευθέρωση
- Εκροή
- Μεταφορά

ραδονίου εντός του σπηλαίου.

Για παράδειγμα, η ανθρώπινη δραστηριότητα είναι παράγοντας παραγωγής, μεταφοράς και ανακύκλωσης ραδονίου, ενώ η λιθολογία του σπηλαίου είναι παράγοντας εκροής.



Σχήμα 4: Γεωλογικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ύπαρξη του ραδονίου στα σπήλαια.

(Gillmore et al., 1999)

Η απορροή αποτελεί το ποσοστό παραγωγής καθαρού ραδονίου στα πετρώματα ενός σπηλαίου ή διασκορπισμένων κόκκων μέσα στο ίδιο το σπήλαιο. Συνεπώς, η λιθολογία του σπηλαίου παίζει σημαντικό ρόλο σε αυτή τη φάση, γιατί η ποσότητα του παραγόμενου ραδονίου εξαρτάται από τη συγκέντρωση ουρανίου στο υλικό.

Η εκροή αποτελεί την ποσότητα του παραγόμενου ραδονίου που εκλύεται στην ατμόσφαιρα του σπηλαίου. Καθώς το ραδόνιο είναι αδρανές αέριο μπορεί και διαχέεται από το σημείο παραγωγής του και κάποια άτομα ραδονίου μπορούν και ταξιδεύουν μέσα από τα πετρώματα/τους κόκκους προς έναν πόρο και έπειτα από μια ρωγμή και τελικά στην ατμόσφαιρα του σπηλαίου. Η εκροή επηρεάζεται από γεωλογικούς παράγοντες (ρήγματα, εδαφικά χαρακτηριστικά, υπόγεια ύδατα κ.α.) και από το κλίμα, ειδικά από τη βαρομετρική πίεση.

Το κλίμα του σπηλαίου επηρεάζει την ποσότητα ραδονίου που απορρέει στην ατμόσφαιρα του σπηλαίου, μέσω της βαρομετρικής πίεσης και της επίδρασης της θερμοκρασίας, όπως επίσης καθορίζει και την κίνηση και την ποσότητα της υγρασίας του υπεδάφους.

Η βαρομετρική πίεση επιδρά στη συγκέντρωση του ραδονίου στην ατμόσφαιρα του σπηλαίου με το φαινόμενο της καμινάδας. Τα βασικά στοιχεία είναι το σπήλαιο και οι πόροι και τα μεγαλύτερα διάκενα στα υποστρώματα που περιέχουν πετρώματα και ιζήματα που εκπέμπουν ραδόνιο. Αν αυτά τα διάκενα είναι συνδεδεμένα με το σπήλαιο μέσω μικρορωγμών, τότε είναι πιθανό αλλαγές στην πίεση να επηρεάσουν τη συγκέντρωση ραδονίου εντός του σπηλαίου. Αν η πίεση του αέρα του σπηλαίου είναι μικρότερη από αυτή των διακενων, θα προκληθεί εισροή ραδονίου στο σπήλαιο μέσω των υπολοίπων αερίων του υπεδάφους. Με την απουσία εξαερισμού, η συγκέντρωση του ραδονίου θα φθάσει σε ισορροπία, έτσι ώστε ο ρυθμός με τον οποίο το ραδόνιο διασπάται θα ισούται με τον ρυθμό με τον οποίο εισέρχεται ραδόνιο από όλες τις ρωγμές.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι σημαντικό ρόλο στην κινητικότητα του αέρα λόγω αλλαγών στη βαρομετρική πίεση, παίζει και ο όγκος του σπηλαίου: γενικά όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος του σπηλαίου, τόσο πιο ουσιαστική θα είναι η ροή του αέρα εντός και εκτός αυτού, δεδομένης μιας αλλαγής στη βαρομετρική πίεση.

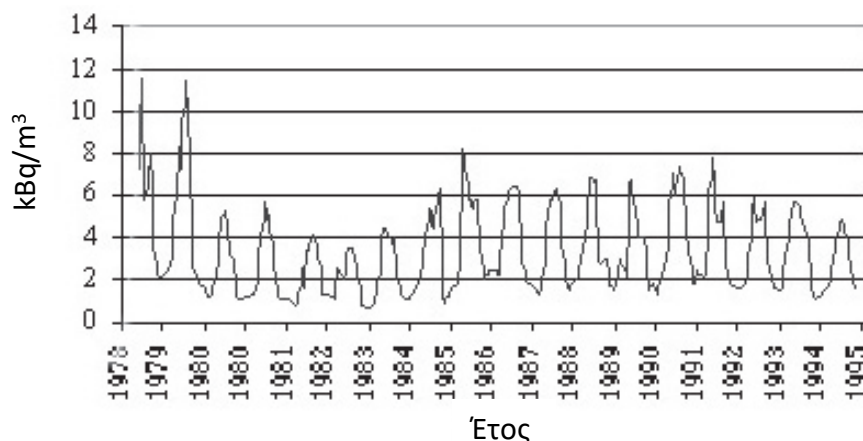
Η θερμοκρασία συντελεί στη διαμόρφωση υψηλών ή χαμηλών συγκεντρώσεων ραδονίου στο σπήλαιο. Επηρεάζεται από την εξωτερική εποχιακή διακύμανση (κυρίως κοντά στην είσοδο του σπηλαίου) και την ανταλλαγή θερμότητας από τα εσωτερικά του μέρη. Επειδή η πυκνότητα του αέρα εξαρτάται από την θερμοκρασία του αέρα, ο φυσικός εξαερισμός των σπηλαίων διαφέρει τις κρύες ή θερμές εποχές. Τον χειμώνα, λόγω της διαφοράς της πυκνότητας μεταξύ του κρύου εξωτερικού αέρα και του θερμότερου αέρα του σπηλαίου, δημιουργείται εντονότερη κυκλοφορία αέρα και έτσι ταχύτερη ανταλλαγή του αέρα του σπηλαίου με τον εξωτερικό αέρα. Ο εξαερισμός είναι ελάχιστος όταν δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του σπηλαίου και την εξωτερική θερμοκρασία. Έτσι, οι συγκεντρώσεις ραδονίου σε ένα σπήλαιο είναι γενικά χαμηλότερες τον χειμώνα και υψηλότερες το καλοκαίρι, λόγω του ότι υπάρχει μεγάλη ξηρασία στα περισσότερα σπήλαια τον χειμώνα, ενώ το καλοκαίρι ο αέρας τείνει να είναι πιο στατικός ή έλκεται προς τα έξω. (Gunn, 2004; Whittlestone, 2003; [14])

Επιπλέον, το ραδόνιο, όντας διαλυτό αέριο μπορεί να προστεθεί ή, λιγότερο σύνηθες, να αφαιρεθεί από την ατμόσφαιρα του σπηλαίου, με το νερό. Άπαξ και βρεθεί στο σπήλαιο, η

συγκέντρωση του αέριου ραδονίου θα τροποποιηθεί από τον φυσικό εξαερισμό (εφόσον υπάρχει) και αυτό θα επηρεάσει επίσης τον παράγοντα ισορροπίας και τελικά τη συγκέντρωση των θυγατρικών του ραδονίου. (Gunn, 2004).

Ο συνδυασμός όλων αυτών των παραγόντων δείχνουν ότι οι συγκεντρώσεις ραδονίου και των θυγατρικών του στα σπήλαια παρουσιάζουν συγκεκριμένες τοπικές διακυμάνσεις (από περιοχή σε περιοχή, από σπήλαιο σε σπήλαιο σε μια συγκεκριμένη περιοχή, καθώς και από σημείο σε σημείο μέσα στο ίδιο το σπήλαιο), καθώς και χρονικές διακυμάνσεις (ωριαία, ημερήσια, και εποχιακά), τα οποία δυσκολεύουν τις προβλέψεις παραγωγής και συγκέντρωσης ραδονίου.

Τέτοιο παράδειγμα παρουσιάζεται στον Πίνακα 9, όπου εμφανίζεται η συγκέντρωση ραδονίου στο σπήλαιο Hajnóczy στην Ουγγαρία, για χρονικό διάστημα 18 ετών (Hank et al., 1995).



Πίνακας 9: συγκέντρωση ραδονίου στο σπήλαιο Hajnóczy από το 1978 έως το 1995 (Cigna, 2005)

Αυτή η μακροχρόνια μέτρηση της συγκέντρωσης ραδονίου δείχνει ότι πέραν της εποχιακής διακύμανσης, υπάρχουν επιπρόσθετες ανώμαλες διακυμάνσεις της συγκέντρωσης ραδονίου στα σπήλαια οι οποίες έχουν να κάνουν με το είδος του πετρώματος, το πορώδες, τη ροή αέρα και νερού, την ατμοσφαιρική πίεση, τη σεισμική δραστηριότητα κ.α. Το γεγονός αυτό συντελεί στο να μην είναι εφικτός ένας ακριβής υπολογισμός της συγκέντρωσης ραδονίου και γι' αυτό το λόγο ο μόνος αξιόπιστος τρόπος για την ανίχνευσή της σε οποιοδήποτε σύστημα είναι οι μετρήσεις (Tommasino 2005, Cigna 2005).

## 2.4 ΕΠΙΤΡΕΠΤΑ ΟΡΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΤΑ ΣΠΗΛΑΙΑ

Λόγω του ότι στα σπήλαια μπορεί να παρουσιαστούν συγκεντρώσεις ραδονίου οι οποίες μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την υγεία των εργαζομένων σε αυτά, έχουν συσταθεί κανονισμοί για τα ανώτερα επιτρεπτά όρια έκθεσης. Οι κανονισμοί αυτοί εκδόθηκαν από τον OSHA Occupational Safety and Health Administration (OSHA, 1988) και τον MSHA (Mine Safety and Health Administration) (MNSH, 1989), (με τροποποίηση από την Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR, 1990, σελ. 93-94), και οι ανώτερες τιμές έκθεσης των σπηλαιολόγων στα θυγατρικά του ραδονίου, παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 10.

PAEC		PAEE	Δημοσιευμένος Κανονισμός	Αναφορά
( $\mu\text{J m}^{-3}$ )	(WL)	(WLM $\text{yr}^{-1}$ )		
....	....	4,0	Όριο ατομικής έκθεσης	OSHA <sup>a</sup>
2,08	0,1	....	Έλεγχος εργασιακού χώρου τουλάχιστον μία φορά ετησίως	OSHA <sup>b</sup>
2,08 – 6,24	0,1 – 0,3	....	Τριμηνιαίος έλεγχος εργασιακού χώρου	OSHA <sup>c</sup>
>6,24	>0,3	....	Έλεγχος εργασιακού χώρου εβδομαδιαίως και αναφορές έκθεσης για όλους του εκτιθέμενους εργαζόμενους	OSHA <sup>d</sup>
20,80	1,0	....	Άμεση διορθωτική ενέργεια για ελάττωση PAEC	OSHA <sup>e</sup>
20,80	1,0	....	Στιγμιαίο μέγιστο	MSHA <sup>f</sup>
....	....	4,0	Ανώτατη αθροιστική δόση	MSHA <sup>f</sup>

<sup>a</sup> (OSHA, 1988, 41 CFR 8 \*57.5038)

<sup>b</sup> (OSHA, 1988, 41 CFR 8 \*57.5087)

<sup>c</sup> (OSHA, 1988, 41 CFR 8 \*57.5037)

<sup>d</sup> (OSHA, 1988, 41 CFR 8 \*57.5037)

<sup>e</sup> (OSHA, 1988, 41 CFR 8 \*57.5041)

<sup>f</sup> (OSHA, 1988, 30 CFR Part 57)

Πίνακας 10: Κανονισμοί επιτρεπτών ορίων έκθεσης (Field (2007))

Στην Ελλάδα, σύμφωνα με το Π.Δ. 101/2018 (ΦΕΚ 194/Α 20.11.2018, άρθρα 9 & 54), το όριο συγκέντρωσης ραδονίου για εσωτερικούς χώρους είναι  $300\text{Bq/m}^3$ , ενώ το όριο της ενεργού δόσης είναι  $20\text{mSv}$  ανα έτος.



## 2.5 ΓΕΩΧΡΟΝΟΛΟΓΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ

Η Γη χρονολογείται περίπου στα 4,6 δισεκατομμύρια χρόνια, ενώ τα πρώτα πετρώματα φαίνεται να σχηματίστηκαν περίπου πριν από 3,96 δισεκατομμύρια χρόνια. Οι γεωλόγοι, με σκοπό να υπολογίσουν την ηλικία των πετρωμάτων, των διαφόρων γεωλογικών σχηματισμών και των γεωλογικών γεγονότων, έχουν διαμορφώσει μια γεωχρονολογική κλίμακα η οποία αποτελείται από Μεγαιώνες, Αιώνες, Περιόδους και Εποχές. Το καθένα από αυτά έχει συγκεκριμένη χρονική διάρκεια και ορίζουν ένα χρονικό διάστημα της γεωλογικής ιστορίας. Ανάλογα την περιοχή όπου ανιχνεύθηκαν για πρώτη φορά οι αντίστοιχοι γεωλογικοί σχηματισμοί, δίνεται και η ονομασία της περιόδου της κλίμακας.

Οι κύριοι διαχωρισμοί του γεωλογικού χρόνου είναι οι εξής:

- Τρεις Μεγαιώνες: ο Αρχαιοζωικός, ο Προτεροζωικός και ο Φανεροζωικός. Ο Προτεροζωικός και ο Αρχαιοζωικός αιώνας αναφέρονται συχνά ως Προκάμβριος Μεγαιαίωνας ή ως Κρυπτοζωικός Χρόνος.
  - Ο Φανεροζωικός Μεγαιαίωνας υποδιαιρείται σε 3 Αιώνες: Παλαιοζωικός, Μεσοζωικός και Καινοζωικός.
    - Ο Παλαιοζωικός Αιώνας υποδιαιρείται σε 6 Περιόδους: Κάμβριο, Ορδοβίσιο, Σιλούριο, Δεβόνιο, Λιθανθρακοφόρο, Πέρμιο.
    - Ο Μεσοζωικός Αιώνας υποδιαιρείται σε 3 Περιόδους: Τριαδική, Ιουρασική, Κρητιδική.
    - Ο Καινοζωικός αιώνας υποδιαιρείται σε 2 περιόδους Τριτογενής και Τεταρτογενής.
- Η Τεταρτογενής περίοδος υποδιαιρείται σε 5 εποχές: Πλειόκαινος, Μειόκαινος, Ολιγόκαινος, Ηώκαινος, και Παλιόκαινος.
- Η Τριτογενής περίοδος υποδιαιρείται σε 2 εποχές: Πλειστόκαινος και Ολόκαινος.

Στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται οι γεωλογικές περίοδοι.

Μεγαιαιώνας	Αιώνας	Περίοδος	Εποχή	Εκ. Έτη Πριν
ΦΑΝΕΡΟΖΩΙΚΟΣ	ΚΑΙΝΟΖΩΙΚΟΣ	ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΗΣ	Ολόκαινος	0,01
			Πλειστόκαινος	1,6
		ΤΡΙΤΟΓΕΝΗΣ	Πλειόκαινος	6,3
			Μειόκαινος	23
			Ολιγόκαινος	36,6
			Ηώκαινος	53
			Παλαιόκαινος	66
	ΜΕΣΟΖΩΙΚΟΣ	ΚΡΗΤΙΔΙΚΗ		135
		ΙΟΥΡΑΣΙΚΗ		205
		ΤΡΙΑΔΙΚΗ		250
	ΠΑΛΑΙΟΖΩΙΚΟΣ	ΠΕΡΜΙΑ		290
		ΛΙΘΑΝΘΡΑΚΟΦΟΡΟΣ		355
		ΔΕΒΟΝΙΟΣ		410
		ΣΙΛΟΥΡΙΟΣ		438
		ΟΡΔΟΒΙΣΙΑ		510
		ΚΑΜΒΡΙΟΣ		570
ΚΡΥΠΤΟΖΩΙΚΟΣ ή ΠΡΟΚΑΜΒΡΙΟ				4.600 - 570

Πίνακας 11: Γεωχρονολογική κλίμακα

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

### **3.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

Έγινε βιβλιογραφική έρευνα σε ηλεκτρονικές βάσεις επιστημονικών περιοδικών (scopus, sciencedirect, core, academia), αναζητώντας μετρήσεις συγκεντρώσεων ραδονίου σε σπήλαια. Κατά την έρευνα αυτή γινόταν αναζήτηση και για τα εξής δεδομένα:

- Είδος σπηλαίου: επισκέψιμο, τουριστικό ή μη αξιοποιημένο
- Μέθοδος μέτρησης: ενεργητική ή παθητική, συσκευή μέτρησης, περίοδος/τύπος μέτρησης
- Λιθολογία σπηλαίου
- Ηλικία πετρωμάτων που φιλοξενούν το/τα σπήλαιο/α
- Πιθανή σχέση ρήγματος ή ρηγματογόνου ζώνης και σπηλαίου/ων

Από τα επιστημονικά άρθρα που βρέθηκαν, επεξεργάστηκαν και μελετήθηκαν τα 53 σχετιζόμενα με 212 σπήλαια από 25 χώρες, τα οποία περιείχαν το σύνολο ή ένα σχετικά μεγάλο μέρος των πληροφοριών που αναζητήθηκαν. Τα στοιχεία καταχωρήθηκαν σε δύο αρχεία Excel. Σε ένα περιελήφθησαν όλα τα σπήλαια της Αυστραλίας (68) τον αριθμό και στο δεύτερο αρχείο όλα τα υπόλοιπα. Παράδειγμα των αρχείων δίνεται στο παράρτημα Ι.

Οι έρευνες και οι εργασίες αυτές έγιναν προκειμένου να καταγραφούν οι συγκεντρώσεις ραδονίου στα σπήλαια και να καθοριστεί το επίπεδο ασφάλειας ή μη για την επίσκεψή του. Λογω της μορφολογίας τους και της γεωλογίας τους, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι πολύ πιθανό οι συνθήκες εντός ενός σπηλαίου να είναι ευνοϊκές ώστε να παρουσιάσουν αυξημένες συγκεντρώσεις ραδονίου και αυτό επομένως έχει αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων κατά την διάρκεια επίσκεψής τους σε αυτό. Οι εργασίες αυτές βοηθούν στην καταγραφή των συγκεντρώσεων σε διάφορα (συνήθως) σημεία του σπηλαίου και συμπεραίνουν σε ποιο σημείο και για πόσο χρονικό διάστημα είναι ασφαλές να το επισκέπτονται άνθρωποι. Επίσης, μπορούν να προτείνουν τρόπους βελτίωσης των δυσμενών συνθηκών προκειμένου να μειωθεί κατάλληλα η έκθεση των ανθρώπων στο ραδόνιο εντός του σπηλαίου.

Ο Πίνακας 12 παρουσιάζει τον αριθμό των σπηλαίων και την κατανομή τους στις διάφορες χώρες.

Χώρα	Αριθμός σπηλαίων
Αργεντινή	1
Αυστραλία	68
Αυστρία	1
Βραζιλία	1
Γαλλία	1
Ελλάδα	8
Ηνωμένο Βασίλειο	23
Η.Π.Α.	2
Ιαπωνία	1
Ιρλανδία	3
Ισπανία	21
Κίνα	4
Κορέα	1
Κούβα	4
Μαλαισία	1
Μεξικό	1
Ουγγαρία	19
Πολωνία	15
Ρουμανία	7
Σαουδική Αραβία	5
Σλοβακία	2
Σλοβενία	13
Τζαμάικα	4
Τουρκία	4
Τσεχία	2

Πίνακας 12: Κατανομή χωρών και σπηλαίων που καταγράφηκαν ερευνητικές εργασίες σε σπήλαια

Στους Πίνακες 13 και 14 καταγράφονται η κατανομή της λιθολογίας και της ηλικίας των σπηλαίων.

<b>Λιθολογία</b>	<b>Αριθμός σπηλαίων</b>
Ασβεστόλιθοι	121
Καρστ	26
Μάρμαρα	25
Βασάλτες	11
Δολομίτες	10
Ανθρακικά πετρώματα & αποθέσεις	7
Τραβερτίνης	3
Ηφαιστειοκλαστική τέφρα	1

Πίνακας 13:Κατανομή πετρωμάτων που βρίσκονται τα σπήλαια

<b>Ηλικία</b>	<b>Αριθμός σπηλαίων</b>		<b>Αιώνας</b>	<b>Αριθμός σπηλαίων</b>
Προκάμβριο	3		Προτεροζωικός	3
Κάμβριο	4		Παλαιοζωικός	84
Ορδοβίσιο	2			
Σιλούριο	11			
Δεβόνιο	23			
Δεβόνιο εως Πέρμιο	12			
Λιθανθρακοφόρο	31			
Πέρμιο	1			
Τριαδικό	15		Μεσοζωικός	51
Τριαδικό-Ιουρασικό	4			
Ιουρασικό	17			
Ιουρασικό-Κρητιδικό	3			
Κρητιδικό	12			
Ηώκαινο	9		Καινοζωικός	41
Ολιγόκαινο	1			

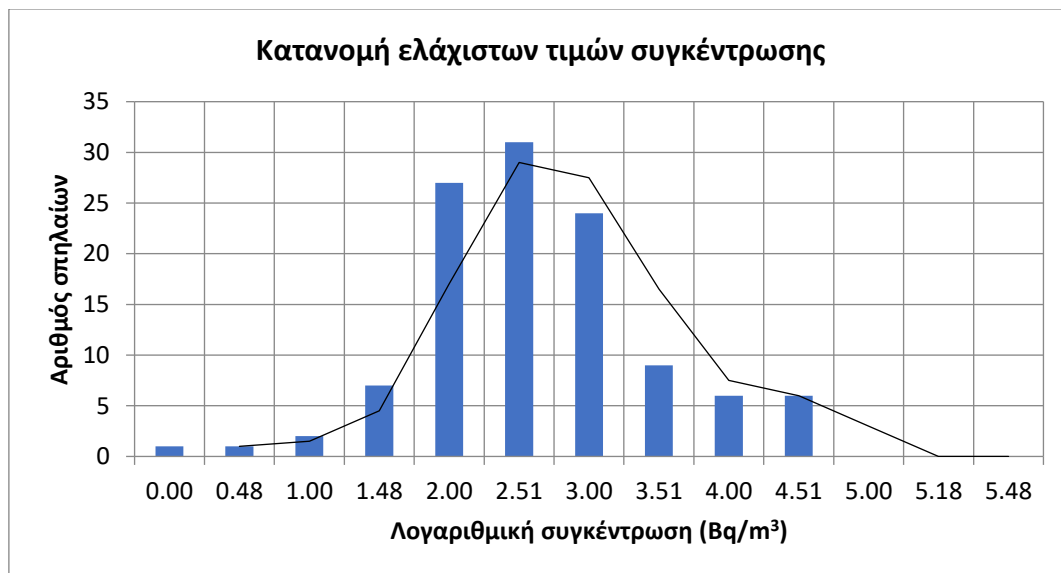
Ολιγόκαινο-Μειόκαινο	4		
Μειόκαινο	9		
Τριτογενές	1		
Πλειστόκαινο	16		
Τεταρτογενές	1		

Πίνακας 14: Ηλικία σχηματισμών εντός των οποίων έχουν δημιουργηθεί τα σπήλαια

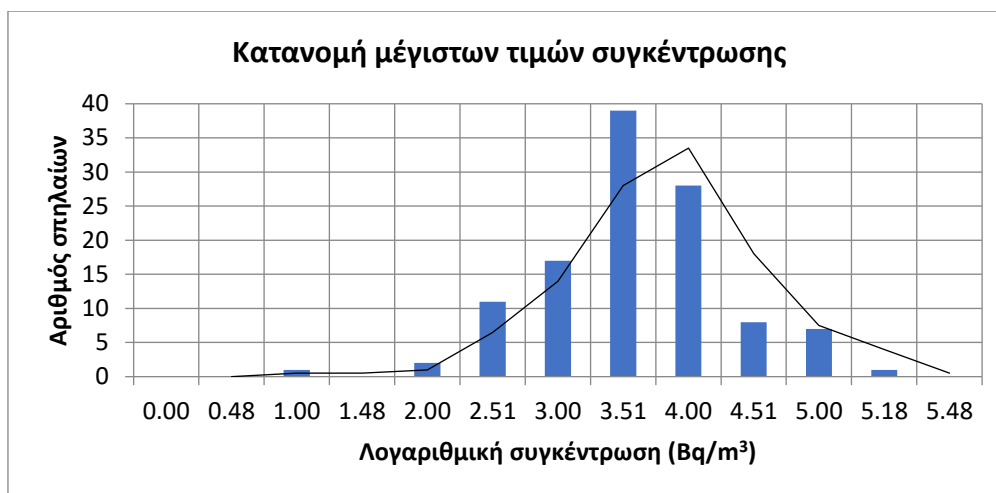
Παρατηρήθηκε μεγάλη ανομοιομορφία στον τύπο μέτρησης (στιγμιαία, μηνιαία, διμηνιαία, ετήσια) της συγκέντρωσης. Τις περισσότερες μετρήσεις είχαν οι μηνιαίες και οι στιγμιαίες μετρήσεις (22 και 32 σπήλαια αντίστοιχα), ακολουθούμενες από την εποχική (10 σπήλαια).

### 3.1.1 Δεδομένα ελάχιστων και μέγιστων τιμών συγκέντρωσης

Προκειμένου να συγκριθούν οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές συγκέντρωσης όλων των σπηλαίων, χωρίς να επηρεάζονται από την διάρκεια μέτρησης, χρησιμοποιήθηκαν οι λογαριθμικές τιμές των μετρήσεων. Από αυτές προέκυψαν οι παρακάτω λογαριθμικές κατανομές, που φαίνονται στους Πίνακες 15 και 16.



Πίνακας 15: Λογαριθμική κατανομή ελάχιστων τιμών συγκέντρωσης



Πίνακας 16: Λογαριθμική κατανομή μέγιστων τιμών συγκέντρωσης

Στον Πίνακα 17 παρουσιάζεται η συγκέντρωση και η αντίστοιχη λογαριθμική συγκέντρωση.

Συγκέντρωση (Bq/m <sup>3</sup> )	Λογαριθμική συγκέντρωση (Bq/m <sup>3</sup> )
1	0,00
3	0,48
10	1,00
30	1,48
100	2,00
320	2,51
1.000	3,00
3.200	3,51
10.000	4,00
32.000	4,51
100.000	5,00
150.000	5,18
300.000	5,48

Πίνακας 17: Λογαριθμική συγκέντρωση ραδονίου

Από τις 114 ελάχιστες τιμές, οι περισσότερες (31) παρατηρήθηκαν στο εύρος 100-320 Bq/m<sup>3</sup>, ενώ από τις 114 μέγιστες, οι περισσότερες (39) τιμές παρατηρήθηκαν στο εύρος 1.000-3.200 Bq/m<sup>3</sup>. Το συνολικό εύρος ελάχιστων τιμών είναι 0,02-32.000 Bq/m<sup>3</sup>, ενώ των μέγιστων 10-150.000 Bq/m<sup>3</sup>.

### **3.1.2 Δεδομένα από μετρήσεις στιγμιαίας συγκέντρωσης**

Στον Πίνακα 18, καταγράφονται 24 μετρήσεις στιγμιαίας συγκέντρωσης σε 23 διαφορετικά σπήλαια.

<b>A/A</b>	<b>Σπήλαιο</b>	<b>Χώρα</b>
1	Domica	Σλοβακία
2	Driny	Σλοβακία
3	Les Grandes Combes cave	Γαλλία
4	Shawan	Κίνα
5	Palvolgyi	Ουγγαρία
6	Vass Imre	Ουγγαρία
7	Cserszegtomaj	Ουγγαρία
8	Bozkov Dolomitic Cave (BDC)	Τσεχία
9	Castanar de Ibor	Ισπανία
10	Santo Tomas	Κούβα
11	Tapiada	Κούβα
12	Del Indio	Κούβα
13	Jose Miguel	Κούβα
14	Hollow Ridge	ΗΠΑ
15	Xishui	Κίνα
16	Lingyun	Κίνα
17	Xiaoyao	Κίνα
18	Seongryu	Κορέα
19	Carlsbad Caverns	ΗΠΑ
20	Perama	Ελλάδα
21	Dachstein-Mammuthohle (DMH)	Αυστρία
22-23	Mackovica	Σλοβενία
24	Lipiska	Σλοβενία

Πίνακας 18: Σπήλαια με μετρήσεις στιγμιαίας συγκέντρωσης

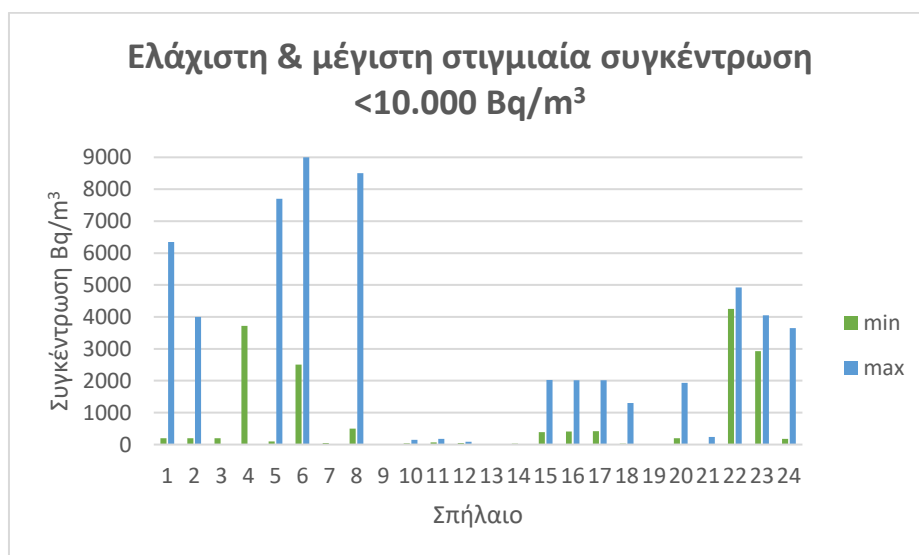


Από αυτές τις μετρήσεις, όπως φαίνεται στον Πίνακα 19, στα περισσότερα σπήλαια η ελάχιστη τιμή είναι χαμηλότερη από  $1.000 \text{ Bq/m}^3$ , ενώ η μέγιστη τιμή είναι μεταξύ  $1.000$  και  $5.000 \text{ Bq/m}^3$ . Στις ελάχιστες τιμές, το εύρος είναι από  $0,02$  έως  $20.000 \text{ Bq/m}^3$ , ενώ στις μέγιστες από  $88$  έως  $123.000 \text{ Bq/m}^3$ . Εάν αφαιρεθούν 2 σπήλαια που παρουσιάζουν τιμές μεγαλύτερες των  $20.000 \text{ Bq/m}^3$ , τότε η μέγιστη ελάχιστη τιμή είναι  $4.250 \text{ Bq/m}^3$ , ενώ η μεγαλύτερη μέγιστη  $9.000 \text{ Bq/m}^3$ .

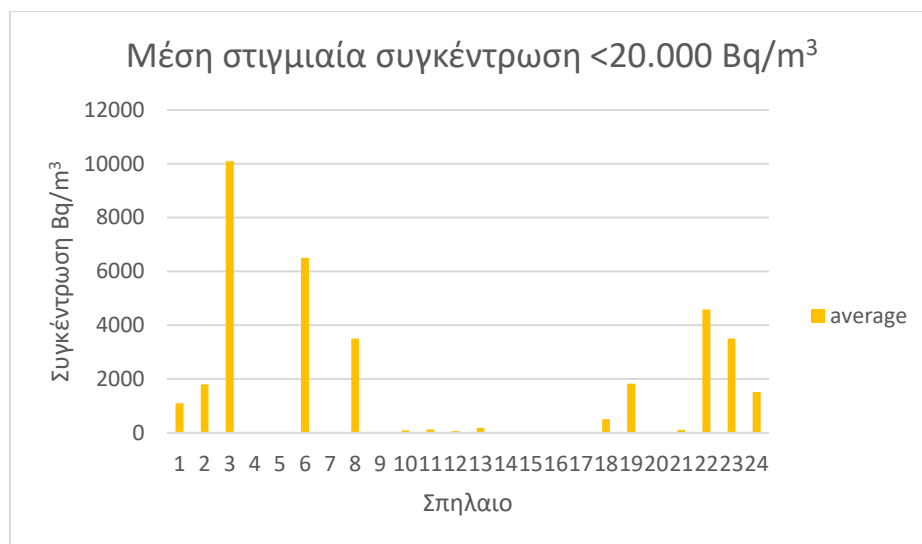
Στον Πίνακα 20 διακρίνεται το εύρος και η κατανομή της ελάχιστης και μέγιστης τιμής για κάθε σπήλαιο, με συγκέντρωση μικρότερη των  $10.000 \text{ Bq/m}^3$ . Στον Πίνακα 21 παρουσιάζεται το εύρος της μέσης συγκέντρωσης για τα 24 σπήλαια με συγκεντρώσεις μικρότερες των  $20.000 \text{ Bq/m}^3$ . Οι περισσότερες τιμές βρίσκονται χαμηλότερα των  $2.000 \text{ Bq/m}^3$ .

Εύρος στιγμιαίων τιμών συγκέντρωσης			
	Αριθμός σπηλαίων		
$\text{Bq/m}^3$	ελάχιστη	μέγιστη	μέση
<1.000	17	4	6
1.000-5.000	4	9	7
5.000-10.000	0	4	1
10.000<	1	5	4

Πίνακας 19: Εύρος στιγμιαίων τιμών συγκέντρωσης



Πίνακας 20: Ελάχιστες και μέγιστες στιγμιαίες συγκεντρώσεις



Πίνακας 21: Μέση στιγμιαία συγκέντρωση

Όσον αφορά την λιθολογία, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 22, το 50% των σπηλαίων βρίσκονται σε ασβεστόλιθους. Ακολουθούν τα σπήλαια με σχιστόλιθους και μάρμαρα, καρστ (δεν υπάρχει κάποια λεπτομέρεια για το είδος του πετρώματος) και δολομίτες, ενώ ένα αποτελείται από ανθρακικά πετρώματα.

Τα ασβεστολιθικά σπήλαια παρουσιάζουν αρκετά μεγάλο εύρος συγκέντρωσης, ξεκινώντας από τα 0,02Bq/m<sup>3</sup> και φτάνουν τα 123.000Bq/m<sup>3</sup>. Η αμέσως μικρότερη μέγιστη συγκέντρωση είναι 84.792Bq/m<sup>3</sup> και 50.000Bq/m<sup>3</sup>.

Λιθολογία σπηλαίου	Ελάχιστη συγκέντρωση (Bq/m <sup>3</sup> )	Μέγιστη συγκέντρωση (Bq/m <sup>3</sup> )	Αριθμός σπηλαίων
Ασβεστόλιθοι	0,02	123.000	12
Κάρστ	197	2.020	4
Μάρμαρα σε επαφή με σχιστολίθους	35	175	4
Δολομίτες	50	50.000	3
Ανθρακικά πετρώματα	2.500	9.000	1

Πίνακας 22: Λιθολογία σπηλαίων στιγμιαίας μέτρησης συγκέντρωσης

Τα περισσότερα σπήλαια ήταν ηλικίας Κρητιδικού και Τριαδικού, τρία στην κάθε ηλικία, σύμφωνα και με τον Πίνακα 23. Στο Τριαδικό, παρουσιάστηκε το μεγαλύτερο εύρος τιμών συγκέντρωσης (από 0,02 έως 123.000 Bq/m<sup>3</sup>), ενώ ομαλότερη είναι η διακύμανση στα σπήλαια ηλικίας Κρητιδικού με συγκεντρώσεις από 176 έως 4.320 Bq/m<sup>3</sup>. Ένα σπήλαιο καταγράφηκε στις ηλικίες, Προκαμβρίου, Σιλούριου, Ιουρασικού, Ηώκαινου και Ολιγόκαινου.

Χρονολογία	Ελάχιστη συγκέντρωση (Bq/m <sup>3</sup> )	Μέγιστη συγκέντρωση (Bq/m <sup>3</sup> )	Αριθμός σπηλαίων
Προκάμβριο	20.000	40.000	1
Σιλούριο	500	8.500	1
Τριαδικό	0.02	123.000	3
Ιουρασικό	200	20.000	1
Κρητιδικό	176	4.320	3
Ηώκαινο	94	7.704	1
Ολιγόκαινο	30	84.792	1

Πίνακας 23: Ηλικιακή κατανομή σπηλαίων στιγμιαίας μέτρησης συγκέντρωσης

### **3.1.3 Δεδομένα από μετρήσεις μηνιαίας συγκέντρωσης**

Στον Πίνακα 24 παρουσιάζονται τα 29 σπήλαια στα οποία έγιναν μετρήσεις για 30 ημέρες (1 μήνα).

A/A	Σπήλαιο	Χώρα
1	Ailwee	Ιρλανδία
2	Michestown	
3	Crag	
4	Petralona	Ελλάδα
5	Jaskinia Niedźwiedzia ( Bear Cave)	Πολωνία
6	El Viento	Ισπανία
7	San Marcos	
8	La Losa	
9	La Robada Pits	
10	El Helecho Pit	
11	El Llana Maja	
12	Ogof Ffynnon Ddu	Ηνωμένο Βασίλειο
13	Szemlo-hegyi	Ουγγαρία
14	Palvolgyi	
15	Szent Istvan	
16	Anna	
17	Baradla	
18	Baradla	
19	Abaligeti	
20	Lake Cave of Tapolca	
21	Loczy	
22	Cave near Sezana Hospital	Σλοβενία
23	Lipiska	
24	Medvejek	
25	Koscakova	
26	Niedzwiedzia	Πολωνία
27	Niedzwiedzia	
28	Radochowska	
29	Gyokusen-do	Ιαπωνία

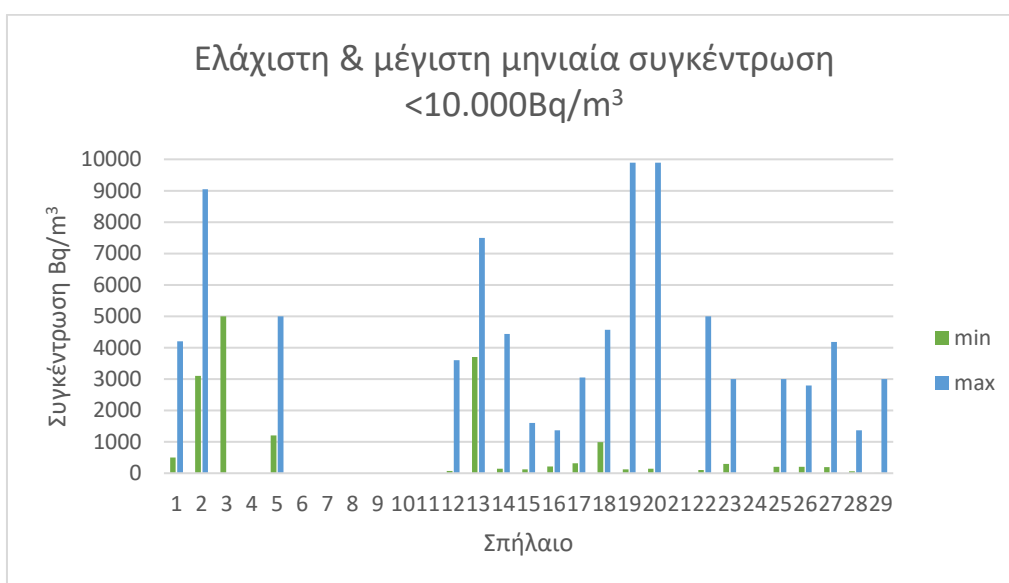
Πίνακας 24: Σπήλαια μηνιαίας μέτρησης συγκέντρωσης

Στον Πίνακα 25 παρουσιάζεται το εύρος των μηνιαίων τιμών συγκέντρωσης. Οι περισσότερες ελάχιστες τιμές είναι μικρότερες των 1.000 Bq/m<sup>3</sup>, ενώ οι περισσότερες μέγιστες στο εύρος 1.000-5.000 Bq/m<sup>3</sup>. Στους Πίνακες 26 και 27 παρουσιάζονται οι ελάχιστες, μέγιστες και μέσες μηνιαίες τιμές έως 10.000 Bq/m<sup>3</sup>.

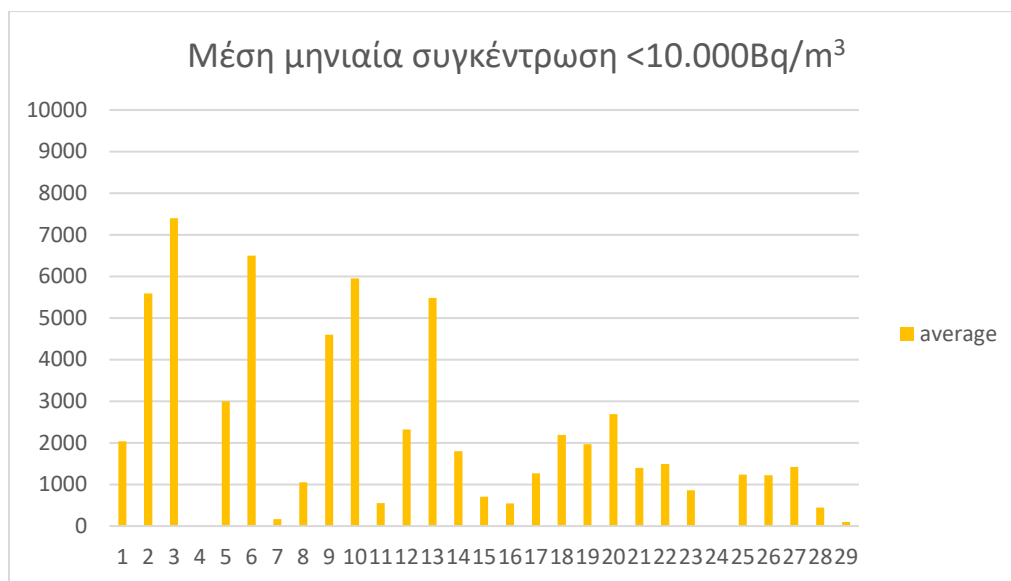
Το εύρος των ελάχιστων τιμών είναι από 10 έως 11.910 Bq/m<sup>3</sup>, ενώ των μέγιστων είναι από 1.369 έως 88.060 Bq/m<sup>3</sup>. Εάν αφαιρεθούν 3 σπήλαια που παρουσιάζουν τιμές μεγαλύτερες των 10.000 Bq/m<sup>3</sup>, τότε η μέγιστη ελάχιστη τιμή είναι 5.000 Bq/m<sup>3</sup>, ενώ η μεγαλύτερη μέγιστη είναι 9.896 Bq/m<sup>3</sup>.

Εύρος μηνιαίων τιμών συγκέντρωσης			
	Αριθμός σπηλαίων		
Bq/m <sup>3</sup>	ελάχιστη	μέγιστη	μέση
<1.000	17	0	7
1.000-5.000	3	13	15
5.000-10.000	1	6	6
10.000<	1	3	1

Πίνακας 25: Εύρος μηνιαίων τιμών συγκέντρωσης



Πίνακας 26: Διακύμανση ελάχιστης και μέγιστης μηνιαίας συγκέντρωσης



Πίνακας 27: Διακύμανση μέσης μηνιαίας συγκέντρωσης

Τα περισσότερα σπήλαια (10) βρίσκονται σε ασβεστόλιθους, ενώ τα υπόλοιπα σε καρστικούς σχηματισμούς, και τραβερτίνη.

Από την κατηγοριοποίηση των σπηλαίων με βάση την λιθολογία τους, προέκυψε πως τα περισσότερα σπήλαια βρίσκονταν σε ασβεστόλιθους, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 28. Το εύρος τιμών συγκέντρωσης είναι από 10 έως 9.896Bq/m<sup>3</sup>. Η ελάχιστη συγκέντρωση καταγράφηκε σε ασβεστολιθικό σπήλαιο, ενώ η μέγιστη σε καρστικό (18.000Bq/m<sup>3</sup>). Το μικρότερο εύρος τιμών συγκέντρωσης παρατηρήθηκε στα μάρμαρα (190-1.420Bq/m<sup>3</sup>).

Λιθολογία σπηλαίου	Ελάχιστη συγκέντρωση (Bq/m <sup>3</sup> )	Μέγιστη συγκέντρωση (Bq/m <sup>3</sup> )	Αριθμός σπηλαίων
Ασβεστόλιθοι	10	9.896	10
Καρστ	100	18.000	4
Μάρμαρα	190	1.420	2
Τραβετίνης	214	7.500	2

Πίνακας 28: Κατανομή λιθολογίας σπηλαίων μηνιαίας συγκέντρωσης

Με βάση την χρονολογία, τα περισσότερα σπήλαια ήταν ηλικίας Λιθανθρακοφόρου και Τριαδικού (2 σπήλαια στην κάθε ηλικία), ενώ υπήρχαν και σπήλαια του Μειοκαίνου,

Πλειστόκαινου και Τεταρτογενούς (Πίνακας 29). Το μικρότερο εύρος συγκέντρωσης παρατηρείται στα σπήλαια ηλικίας Τριαδικού, από 121 έως 3.051 Bq/m<sup>3</sup>, ενώ το σπήλαιο του Πλειστόκαινου παρουσιάζει τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, αλλά και το μεγαλύτερο εύρος τιμών.

Χρονολογία	Ελάχιστη συγκέντρωση (Bq/m <sup>3</sup> )	Μέγιστη συγκέντρωση (Bq/m <sup>3</sup> )	Αριθμός σπηλαίων
Λιθανθρακόφορο	70	4.200	2
Τριαδικό	121	3.051	2
Μειόκαινο	143	9.896	1
Πλειστόκαινο	11.910	88.060	1
Τεταρτογενες	10	3.000	1

Πίνακας 29: Κατανομή γεωλογικής χρονολογίας σπηλαίων μηνιαίας συγκέντρωσης

Η επιρροή των σπηλαίων που παρουσιάζουν τιμές μεγαλύτερες των 10.000 Bq/m<sup>3</sup> είναι τέτοια που 3 σπήλαια, ανεβάζουν τον μέσο όρο (και την τυπική απόκλιση) κατά 79% στην χαμηλότερη και μέση στιγμιαία συγκέντρωση, και 92% μέγιστη συγκέντρωση.

### 3.1.4 Δεδομένα από μετρήσεις ετήσιας συγκέντρωσης

Στον Πίνακα 30 παρουσιάζονται τα στοιχεία από μετρήσεις ετήσιας συγκέντρωσης σε 68 Αυστραλιανά σπήλαια και 8 σπήλαια στην Σλοβενία, με βάση την λιθολογία τους.

Λιθολογία σπηλαίου	Ελάχιστη συγκέντρωση (Bq/m <sup>3</sup> )	Μέγιστη συγκέντρωση (Bq/m <sup>3</sup> )	Αριθμός σπηλαίων
Ασβεστόλιθοι	27	2571	40
Καρστ	48	2134	18
Μάρμαρα	48	2134	16
Βασάλτες	45	420	4
Καλκαρενίτες	379	591	3
Δολομίτες	1634		1

Πίνακας 30: Λιθολογία σπηλαίων ετήσιας συγκέντρωσης

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, τα περισσότερα σπήλαια βρίσκονται σε ασβεστόλιθους, ακολουθούμενα από καρστικά σπήλαια και σπήλαια σε μάρμαρα, βασάλτες και καλκαρενίτες, ενώ ένα σπήλαιο βρέθηκε σε δολομίτες. Την μεγαλύτερη διακύμανση παρουσιάζουν τα σπήλαια των ασβεστόλιθων όπου οι τιμές της συγκέντρωσης ξεκινούν από τα  $27\text{Bq/m}^3$  και φτάνουν τα  $2571\text{Bq/m}^3$ . Ακολουθούν τα σπήλαια σε καρστικούς σχηματισμούς, μάρμαρα και βασάλτες, ενώ την μικρότερη διακύμανση παρουσιάζουν τα σπήλαια σε καλκαρενίτες ( $379$  έως  $591\text{Bq/m}^3$ ).

Στον Πίνακα 31 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις με βάση την ηλικία των σπηλαίων της Αυστραλίας, καθώς δεν υπάρχουν πληροφορίες για τα σπήλαια της Σλοβενίας.

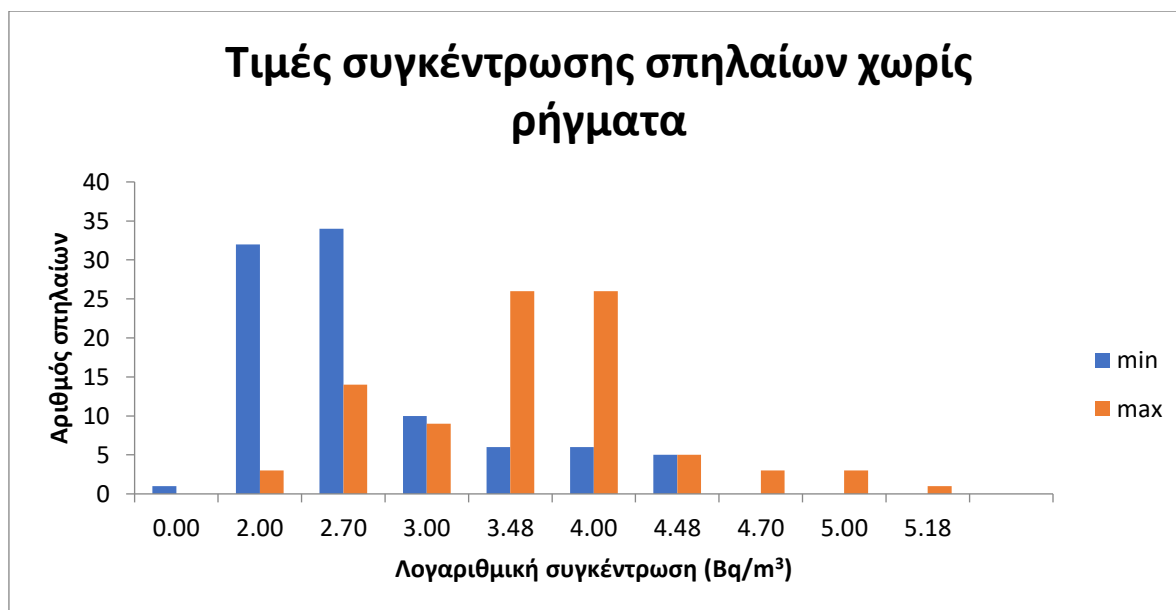
Λιθολογία σπηλαίου	Ελάχιστη συγκέντρωση ( $\text{Bq/m}^3$ )	Μέγιστη συγκέντρωση ( $\text{Bq/m}^3$ )	Αριθμός σπηλαίων
Μέσο Κάμβριο	89	1509	3
Ορδοβίσιο	447	2383	2
Σιλούριο	48	2134	10
Δεβόνιο	27	2571	20
Δεβόνιο-Πέρμιο	337	2134	12
Ηώκαινο	1634		1
Ολιγόκαινο Μειόκαινο	30	516	4
Πλειστόκαινο	27	2571	15
Τριτογενές	1314		1

Πίνακας 31: Κατανομή γεωλογικής χρονολογίας σπηλαίων ετήσιας συγκέντρωσης

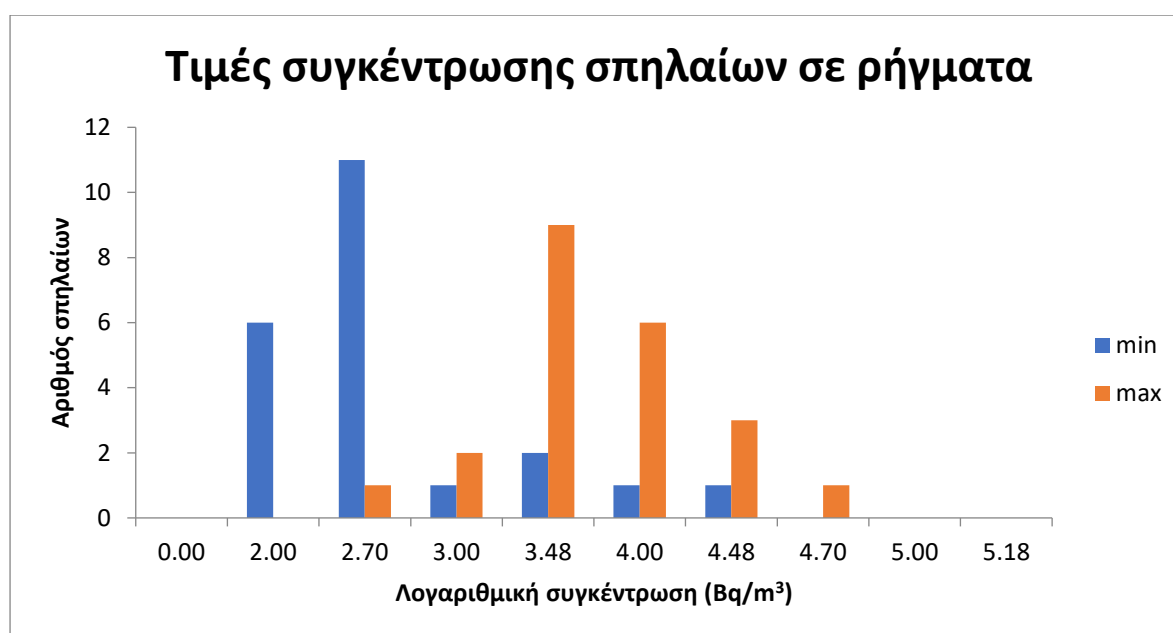
### **3.1.5 Κατανομή σπηλαίων με και χωρίς ρήγματα ή ρηγματογόνες ζώνες**

Από τα 212 σπήλαια, τα 22 συνδέθηκαν με ρήγματα ή ρηγματογόνες ζώνες. Ο Πίνακας 32 παρουσιάζει την κατανομή των ελάχιστων και μέγιστων λογαριθμικών τιμών συγκέντρωσης ραδονίου των σπηλαίων που δεν έχουν ρήγματα, ενώ ο Πίνακας 33 την κατανομή των σπηλαίων που έχουν ρήγματα ή βρίσκονται εντός ρηγματογόνων ζωνών.





Πίνακας 32: Συγκέντρωση σε σπήλαια χωρίς ρήγματα ή ρηγματογόνες ζώνες



Πίνακας 33: Συγκέντρωση σε σπήλαια με ρήγματα ή ρηγματογόνες ζώνες

Φαίνεται πως οι κατανομές των δυο περιπτώσεων είναι παρόμοιες και για τις ελάχιστες και για τις μέγιστες τιμές συγκέντρωσης. Ειδικότερα, οι ελάχιστες τιμές και στις δυο περιπτώσεις είναι «συγκεντρωμένες» στο εύρος 100-1.000 Bq/m<sup>3</sup>, ενώ οι μέγιστες το εύρος 3.200-32.000Bq/m<sup>3</sup>.

Η διαφορά έγκειται στο ελάχιστο και μέγιστο όριο των μέγιστων τιμών. Στην περίπτωση των σπηλαίων χωρίς ρήγματα το ελάχιστο όριο ξεκινά από τα 30Bq/m<sup>3</sup>, ενώ στα σπήλαια χωρίς

ρήγματα στα 320Bq/m<sup>3</sup>. Το μέγιστο όριο είναι τα 150.000Bq/m<sup>3</sup> στα σπήλαια χωρίς ρήγματα, ενώ στα σπήλαια με ρήγματα 32.000Bq/m<sup>3</sup>.

### **3.1.6 Τύπος και όργανα μετρήσεων**

Από τα δεδομένα, προέκυψε πως 31 μετρήσεις έγιναν με ενεργητικές μεθόδους μέτρησης, ενώ 85 με παθητικές.

Στις ενεργητικές μεθόδους, χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω όργανα:

- Radon scout monitors (SARAD GmbH)
- Alphaguard PRO2000
- Alphaguard PQ2000PRO
- Alphaguard PQ2000MC50
- RADIM 5-WP
- RADIM 3A
- α-detector PRASSI-5S, Silena
- Barasol probe
- TS96 progeny monitor

Στις παθητικές μεθόδους, χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω όργανα:

- Pylon AB5 scintillometer
- Activated charcoal
- CR39
- Kodak CA 80-15 cellulose nitrate films
- Makrofol
- RAD7
- Lucas cells
- TASTRAK etch detectors

Οι περισσότερες παθητικές μετρήσεις, 56 από τις 85, έγιναν με το CR-39, ενώ 20 από τις 31 ενεργητικές μετρήσεις έγιναν με κάποιον τύπο Alphaguard.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Στο Κεφάλαιο αυτό, γίνονται συγκρίσεις και συσχέτιση των συγκεντρώσεων ραδονίου με βάση την λιθολογία και την ηλικία σπηλαίων. Ακολουθεί μια σύγκριση των τιμών με μια εργασία του 2005 σε 220 σπήλαια, και μια σειρά γενικών συμπερασμάτων-παρατηρήσεων που βρέθηκαν κατά την διάρκεια της έρευνας της εργασίας αυτής. Τέλος, παρατίθενται προτάσεις για τις μεθόδους και τις τεχνικές μέτρησεις συγκέντρωσης ραδονίου, καθώς και για τις παραμέτρους που χρειάζονται καταγραφή προκειμένου να υπάρξει ομογενοποίηση των αποτελεσμάτων και ευκολία στην σύγκριση με άλλες παρόμοιες εργασίες.

#### **4.1 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ**

##### **4.1.1 Σύγκριση με βάση την λιθολογία**

Ο ασβεστόλιθος είναι το πέτρωμα στο οποίο βρέθηκαν τα περισσότερα σπήλαια (121), ακολουθούμενος από καρστ (26), μάρμαρα (25), βασάλτες (11), δολομίτες (10) και ανθρακικά πετρώματα (7). Τρία (3) σπήλαια βρέθηκαν σε τραβερτίνες και ένα (1) σε ηφαιστειοκλαστική τέφρα. Όπου καρστ, εννοείται κάποιο ασβεστολιθικό πέτρωμα το οποίο έχει υποστεί καρστικοποίηση, αλλά δεν δίνονται περισσότερες πληροφορίες.

Με εξαίρεση ορισμένα σπήλαια που σχηματίστηκαν εντός ηφαιστειακών πετρωμάτων (βασάλτες και ηφαιστειοκλαστική τέφρα) όλα τα υπόλοιπα σπήλαια που καταγράφηκαν βρίσκονται εντός ανθρακικών πετρωμάτων (ασβεστόλιθοι, δολομίτες, μάρμαρα, τραβερτίνες αλλά και καλκαρενίτες) εντός των οποίων οποίους υπερταίρουν αριθμητικά οι ασβεστόλιθοι. Τα σπήλαια που βρίσκονται μέσα σε ασβεστόλιθους παρουσιάζουν υψηλότερες συγκεντρώσεις ραδονίου σε σχέση με σπήλαια που βρίσκονται στα υπόλοιπα πετρώματα. Η απόκλιση των συγκεντρώσεων ραδονίου σε σπήλαια που έχουν δημιουργηθεί στους ασβεστόλιθους είναι μεγαλύτερη, γιατί το πλήθος των υπο έρευνα σπηλαίων είναι μεγαλύτερος.

Μεγάλο ρόλο στην μεγάλη απόκλιση που αφορά τα σπήλαια σε ασβεστολίθους παίζουν οι έρευνες σε σπήλαια με τιμές συγκέντρωσης μεγαλύτερες των 10.000 Bq/m<sup>3</sup>, όπως η έρευνα των Wang et al., 2019 (ελάχιστη 3.720 Bq/m<sup>3</sup>, μέγιστη 123.000 Bq/m<sup>3</sup>, μέση 47.419 Bq/m<sup>3</sup>).

Στο Κεφάλαιο 4.2 αναλύονται οι λόγοι που το συγκεκριμένο σπήλαιο παρουσιάζει τόσο υψηλές τιμές. Τα σπήλαια στα υπόλοιπα πετρώματα έχουν εύρος από μερικές εκατοντάδες Bq/m<sup>3</sup> έως 9.000 Bq/m<sup>3</sup>.

#### **4.1.2 Σύγκριση με βάση την χρονολογία**

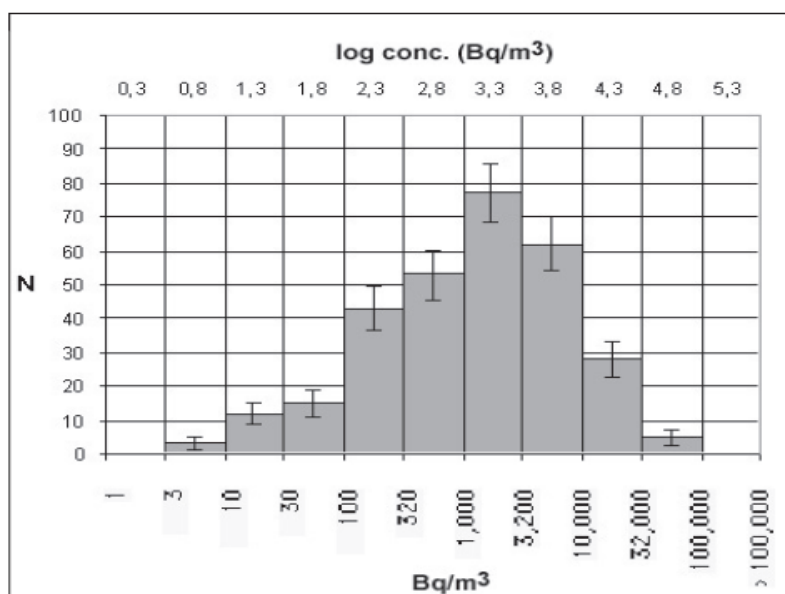
Οι περισσότερες εργασίες που συγκεντρώθηκαν αφορούσαν σπήλαια ηλικίας Δεβόνιου, ενώ ακολούθησαν αυτά ηλικίας Προκάμβριου. Τις χαμηλότερες τιμές και αποκλίσεις εμφάνισαν τα σπήλαια Δεβόνιου, ενώ ακολουθούν αυτά του Προκάμβριου.

Στα σπήλαια ηλικίας Τριαδικού, εάν αφαιρεθεί το σπήλαιο που παρουσιάζει υπερβολικά μεγάλες τιμές και είναι η μεγαλύτερη συγκέντρωση (123.000Bq/m<sup>3</sup>) που παρατηρήθηκε (Wang et al., 2019), τότε παρουσιάζεται μείωση των τιμών και των αποκλίσεων κατά 90%.

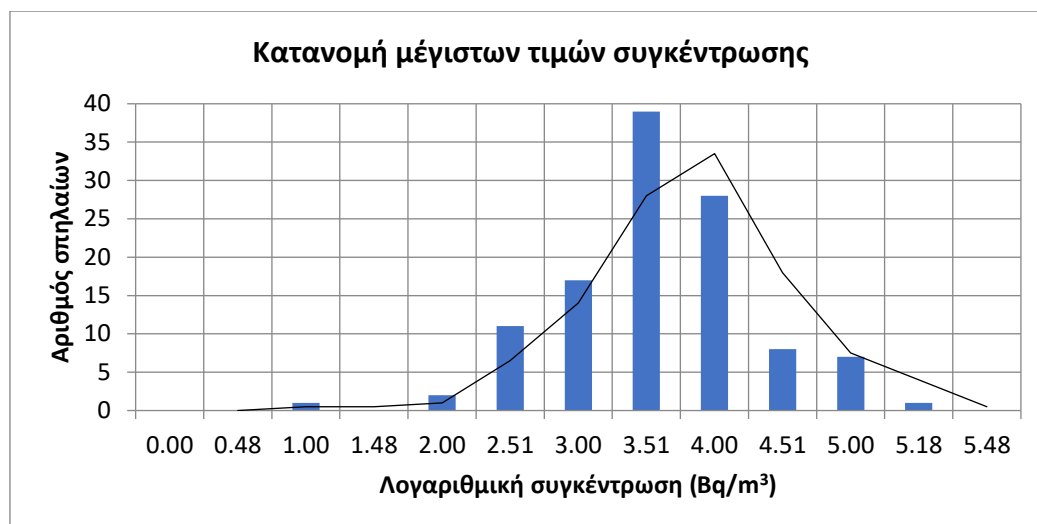
Σε σπήλαιο του Πλειστοκαίνου, παρατηρήθηκε η 2<sup>η</sup> μεγαλύτερη συγκέντρωση (88.060 Bq/m<sup>3</sup>) σε μηνιαία μέτρηση.

#### **4.1.3 Σύγκριση λογαριθμικών τιμών συγκέντρωσης με άλλη εργασία**

Ο Πίνακας 34 παρουσιάζει την κατανομή συγκεντρώσεων 220 σπηλαίων από εργασία που έγινε το 2005, από τον Cigna.



Πίνακας 34: Λογαριθμική κατανομή συγκεντρώσεων 220 σπηλαίων (Cigna, 2005)



Πίνακας 35: Λογαριθμική κατανομή συγκεντρώσεων 114 σπηλαίων

Οι περισσότερες τιμές είναι στο εύρος 1.000-3.200 Bq/m<sup>3</sup>, το ίδιο εύρος με τις περισσότερες μέγιστες τιμές όπως παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3.1. (Πίνακας 35). Παρόμοια, και το δεύτερο μεγαλύτερο εύρος τιμών παρατηρείται και στις δυο εργασίες από 3.200 έως 10.000 Bq/m<sup>3</sup>. Η ειδοποιός διαφορά είναι πως το μέγιστο ακρότατο της εργασίας αυτής είναι στο εύρος από 100.000-150.000 Bq/m<sup>3</sup>, ενώ της προηγούμενης εργασίας ήταν στο 32.000-100.000 Bq/m<sup>3</sup>. Αυτό δείχνει μια ομοιομορφία των αποτελεσμάτων των δυο ερευνών, ως προς τις μέγιστες τιμές, και μια ένδειξη πως τα περισσότερα σπήλαια παρουσιάζουν συγκεντρώσεις μεγαλύτερες των επιτρεπτών ορίων στο εσωτερικό τους. Η μετατόπιση της κατανομής οφείλεται στο γεγονός πως οι έρευνες που έχουν ως στόχο να ερευνήσουν διεξοδικά αυτά τα ιδιαίτερα σπήλαια, δίνουν τελικά αυξημένες τιμές συγκέντρωσης.

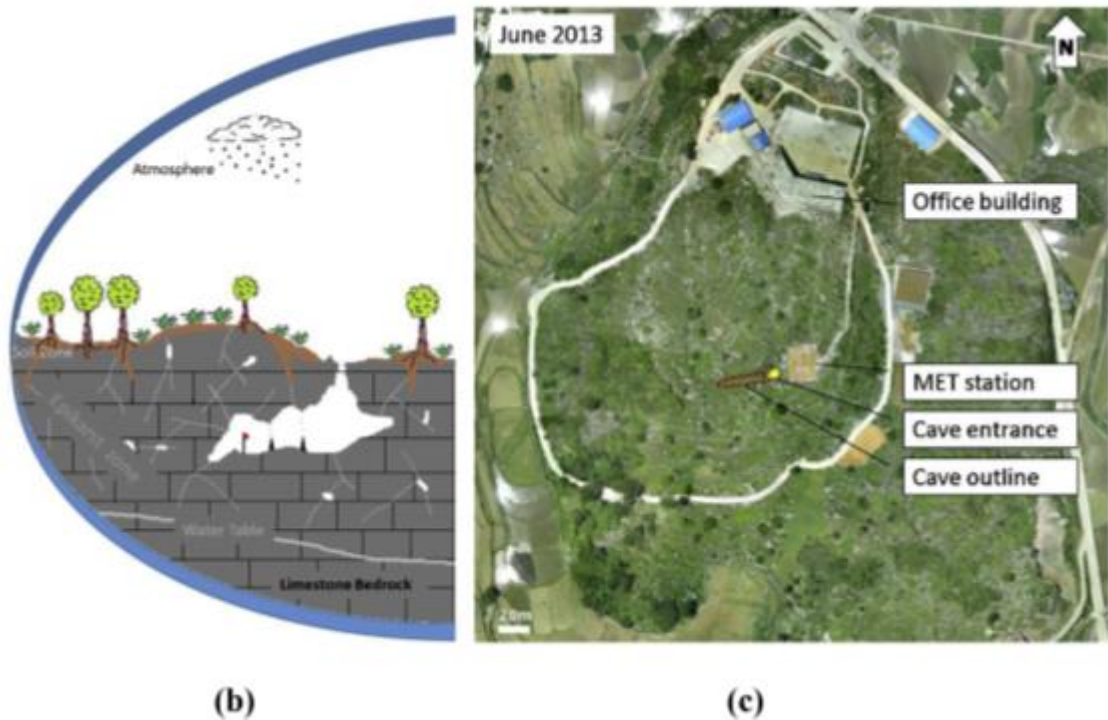
Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο είναι πως η κατανομή των μέγιστων συγκεντρώσεων (Πίνακας 16 & 35) έχει διαφορά μια τάξη μεγέθους από την κατανομή των ελάχιστων συγκεντρώσεων (Πίνακας 15). Οι μέγιστες τιμές συγκέντρωσης έχουν το μεγαλύτερο εύρος στα 3200 Bq/m<sup>3</sup>, οι ελάχιστες τιμές συγκέντρωσης το παρουσιάζουν στα 320 Bq/m<sup>3</sup>.

## 4.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4.1.1, οι τιμές στο υπό έρευνα σπήλαιο Shawan, της Puding County, Guizhou Province στην Νοτιοδυτική Κίνα, παρουσιάζονται αρκετά υψηλές τιμές συγκέντρωσης ραδονίου. Ο κυριότερος λόγος είναι η μορφολογία του σπηλαίου, όπως

αυτό εμφανίζεται στην Εικόνα 3. Όπως φαίνεται, το σπήλαιο έχει μόνο ένα σημείο εισόδου, ενώ δεν παρατηρούνται μεγάλα ρήγματα ή ρηγματώσεις. Για τον λόγο αυτό, η ανακύκλωση του αέρα καθίσταται αδύνατη, με αποτέλεσμα ο φρέσκος αέρας να μην μπορεί να κυκλοφορήσει στο σπήλαιο (ιδιαίτερα στο βαθύτερό του σημείο όπου έγιναν και οι μετρήσεις συγκέντρωσης) και η συγκέντρωση του ραδονίου να είναι υψηλή.

Από την βιβλιογραφική ανασκόπηση, η ανακύκλωση του αέρα παίζει τον σημαντικότερο ρόλο στην συγκέντρωση του ραδονίου. Οι ροές του αέρα χρειάζονται εντός του σπηλαίου προκειμένου ο φρέσκος αέρας να εισέρχεται στο σπήλαιο και να «απομακρύνει» τον αέρα με τις συγκεντρώσεις ραδονίου. Οι ροές αυτές μπορεί να γίνονται είτε από την είσοδο και έξοδο του σπηλαίου, είτε από τα ρήγματα στο κέλυφος του σπηλαίου. Τα σπήλαια που εμφάνιζαν περισσότερες από μια εισόδους/εξόδους ή αρκετές ρηγματώσεις, παρουσίαζαν μικρότερες συγκεντρώσεις ραδονίου.



Εικόνα 3: Απεικόνιση και αεροφωτογραφία του σπηλαίου Shawan, στην νοτιοδυτική Κίνα.

### 4.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Για την καλύτερη ανάλυση και σύγκριση των σπηλαίων σε σχέση με την συγκέντρωση του ραδονίου ώστε να εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα, προτείνεται αρχικά η αναφορά/μέτρηση στις νέες εργασίες των εξής:

- Περιβαλλοντικές συνθήκες κατά την διάρκεια των μετρήσεων: θερμοκρασία και πίεση εντός και εκτός του σπηλαίου
- Γεωλογία του σπηλαίου: πετρώματα (είδος και ηλικία), τυχόν ρήγματα

Παρ' όλο που το μεγαλύτερο ποσοστό των σπηλαίων παρουσιάζει την μέγιστη τιμή συγκέντρωσης ραδονίου το καλοκαίρι, θα πρέπει να καταγράφονται οι μεταβολές στις συγκεντρώσεις του ραδονίου εντός του σπηλαίου καθ' όλο το έτος. Έτσι θα γίνει αντιληπτό σε ποια εποχή η συγκέντρωση έχει την υψηλότερη τιμή της και θα λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα προστασίας των επισκεπτών. Ως εκ τούτου, οι συνεχείς μετρήσεις ή οι ολοκληρωτικές ανά μήνα για έναν χρόνο θα πρέπει να προτιμώνται ως τεχνικές μέτρησης. Η γεωλογία του σπηλαίου μπορεί να καθοριστεί από γεωλογικούς χάρτες και ταυτόχρονη επί τόπου έρευνα.

Ο Gillmore είχε μια ενδιαφέρουσα ιδέα προκειμένου να επαληθεύσει τα δεδομένα από τους σταθερούς καταγραφείς του σπηλαίου. Έδωσε μετρητές σε αρχαιολόγους που έκαναν την δική τους επιστημονική έρευνα εντός του σπηλαίου, οι οποίοι κατέγραψαν μια στιγμιαία συγκέντρωση ραδονίου. Είναι μια ιδέα η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί εκτενέστερα είτε σε συνεργασία με επιστήμονες-μελετητές του εκάστοτε σπηλαίου ή με ομάδες που ασχολούνται και επισκέπτονται σπήλαια ως δραστηριότητα.

Ένα πρόβλημα που παρατηρήθηκε σε αρκετές έρευνες ήταν η κλοπή μηχανημάτων καταγραφής. Το πρόβλημα της κλοπής μπορεί να αντιμετωπιστεί με την τοποθέτηση πινακίδας που να αναγράφει πως πρόκειται για μηχανήμα επιστημονικής έρευνας ώστε να καταλαβαίνει το κοινό την χρησιμότητά τους, αλλά και να υπάρχει μηχανισμός ασφαλείας με κλειδαριά ώστε να μην είναι εύκολη η απομάκρυνσή του από το σπήλαιο.

## **Βιβλιογραφία**

- Ανωγειανάκης Γ. (2009) Ραδόνιο και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Πτυχιακή Εργασία. Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος.
- Γιαννόπουλος Β. (2000). Συμβολή στη μελέτη σύγχρονων και παλιών περιβαλλόντων των πλέον σημαντικών ελληνικών σπηλαίων. Καποδίστριο Πανεπιστήμιο, Αθήνα.
- Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας. (2005) Ραδόνιο [Εγχειρίδιο]. — Αθήνα 2005. Ανακτήθηκε από: [https://www.hellenic-granite.gr/uploads/EEAE\\_radonio.pdf](https://www.hellenic-granite.gr/uploads/EEAE_radonio.pdf) [Πρόσβαση 27 Νοεμβρίου 2019]
- Κασινάλης Χ. (2008). Μέθοδος in situ μέτρησης ραδονίου στο νερό – Αξιολόγηση της μεθόδου και εφαρμογή της στη μέτρηση ραδονίου σε πηγή μεταλλικού νερού. Διπλωματική Εργασία. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Μισαηλίδη Π. (2017). 13 Μαθήματα Ραδιοχημείας και Πυρηνικής Χημείας – Κεφάλαιο 8: Τα ραδιενεργά στοιχεία' σ. 10. Βιβλίο Ραδιοχημείας. Διαθέσιμο στο: <https://eclass.uoa.gr/modules/document/index.php?course=CHEM199&openDir=/59ca2285JzWI> [Πρόσβαση: 18 Νοεμβρίου 2019]
- Νικολόπουλος, Δ., Γιαννακόπουλος, Π., και Κόττου, Σ. (2015). Ακτινοβολίες περιβάλλοντος και άνθρωπος: ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ. Κεφάλαιο 3: Φυσικό περιβάλλον ακτινοβολιών - Ιοντίζουσες ακτινοβολίες - Ραδόνιο και θυγατρικά παράγωγα, σ. 75-89. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Ανακτήθηκε από : <http://hdl.handle.net/11419/5355> [Πρόσβαση: 26 Σεπτεμβρίου 2019]
- Οικονομόπουλος Ε. (2008). Μελέτη των περιβαλλοντικών συνθηκών έκλυσης του χημικού στοιχείου  $^{222}\text{Rn}$  και η πιθανή συσχέτισή της με τη σεισμικότητα της περιοχής Μεγάρων. Διατριβή. Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Θετικών Επιστημών.
- Πατήρης Δ. (2009). Μελέτη της συμπεριφοράς των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα. Διδακτορική Διατριβή. Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Φυσικής.
- Παυλίδης Σ. (2010) «Εισαγωγή στη Γεωλογία», Σημειώσεις Α' εξαμήνου. ΑΠΘ, Τμήμα Γεωλογίας
- Χαραλάμπου Θ. Μ. (2008) Γεωστατική Απεικόνιση Συγκέντρωση Ραδονίου στο Εσωτερικό Κατοικιών στην περιοχή της Πελοποννήσου. Διπλωματική Εργασία, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Πολυτεχνείο.
- Al-Mustafa H., M. I. Al-Jarallah, F. ur-Rehman, F. Abu-Jarad (2005) *Radon concentration measurements in the desert caves of Saudi Arabia*. Radiation Measurements 40, pp. 707-710.



Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135044870500154X>  
[Downloaded: 06/05/2019]

- Alvarez-Galledo M., E. Garcia-Anton, A. Fernandez-Cortes, S. Cuezva, S. Sanchez-Moral (2015) High radon levels in subterranean environments: monitoring and technical criteria to ensure human safety (case of Castanar cave, Spain). *Journal of Environmental Radioactivity* 145, pp. 19-29. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X15000958>  
[Downloaded: 11/05/2019]
- Batiot-Guilhe C., J.L. Seidel, H. Jourde, O. Hebrard, V. Bailly-Comte (2007) *Seasonal variations of CO<sub>2</sub> and <sup>222</sup>Rn in a mediterranean sinkhole-spring (Causse d'Aumelas, SE France)*. *International Journal of Speleology*, 36 (1), pp. 51-56.
- British caving Association Radon Working Party (2012). 'Radon underground – Radon Exposure during underground trips: A set of guidelines for caving and mine exploration'. 2<sup>nd</sup> edition. British Caving Association. Διαθέσιμο στο: [https://british-caving.org.uk/wiki3/lib/exe/fetch.php?media=publications\\_information:bca\\_radon\\_underground\\_2nd\\_ed.pdf](https://british-caving.org.uk/wiki3/lib/exe/fetch.php?media=publications_information:bca_radon_underground_2nd_ed.pdf)
- Canoba A. C. (2012) *NORM survey in Argentina*. *Annals of ICRP*, Vol. 41, Issues 3-4, pp. 352-367, October-December 2012. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146645312000206> [Downloaded: 11/05/2019]
- Cevik U., A. Kara, N. Celik, M. Karabidak, A. Celik (2011) Radon survey and exposure assessment in Karaca and Cal caves, Turkey, *Water Air and Soil Pollution*. 214, pp. 461-469.
- Cigna A.A. (2005). Radon in Caves. *International Journal of Speleology*, v. 34 (1-2), 1-18. Bologna (Italy)
- Duenas C., M. C. Fernandez, S. Canete, M. Perez, E. Gordo (2011) *Seasonal variations of radon and the radiation exposure levels in Nerja cave, Spain*. *Radiation Measurements* 46, pp. 1181-1186. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350448711002976>  
[Do Duenas C., M. C. Fernandez, S. Canete (2005) *<sup>222</sup>Rn concentrations and the radiation exposure levels in the Nerja Cave*. *Radiation Measurements* 40, pp. 630-632. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350448705001162> [Downloaded: 11/05/2019]
- Duenas C., M. C. Fernandez, S. Canete, J. Carretero, E. Liger (1999) *<sup>222</sup>Rn concentrations, natural flow rate and the radiation exposure levels in the Nerja Cave*. *Atmospheric Environment* 33, pp. 501-510. Available at:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231098002672> [Downloaded: 07/05/2019]

- Dumitru O. A., B. P. Onac, J. J. Fornos, C. Cosma, A. Gines, J. Gines, A. Merino (2015) Radon survey in caves from Mallorca island, Spain, *Science of the Total Environment* 526, pp. 196-203. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715300127> [Downloaded: 06/05/2019]
- Eff-Darwich A., R. Vinas, V. Soler, J. de la Nuez, M. L. Quesada (2008) *Natural air ventilation in underground galleries as a tool to increase radon sampling volumes for geologic monitoring*. *Radiation Measurements*, vol. 43, pp. 1429-1436.
- Faimon J., J. Stelcl, D. Sas (2006) Anthropogenic CO<sub>2</sub>-flux into cave atmosphere and its environmental impact: A case study in the Cisarska Cave (Moravian Karst, Czech Republic). *Science of the Total Environment* 369, pp. 231-245. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969706002932> [Downloaded: 08/05/2019]
- Field M. S. (2007). Risks to cavers and cave workers from exposures to low level ionizing a radiation 222Rn decay in caves. *Journal of cave and Karsts Studies*, April 2007, v.69, no 1, p. 207-228.
- Friend C.R.L., T.D. Gooding (2002) Variations in the concentration of radon in parts of the Ogof Ffynnon Ddu system, Penwyllt, South Wales and estimates of doses to recreational cavers. *Journal of Environmental Radioactivity* 58, pp. 45-47. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X01000297> [Downloaded: 07/05/2019]
- Font L., C. Baixeras, V. Moreno (2008) *Indoor radon levels in underground workplaces of Catalonia, Spain*. *Radiation Measurements*, 43, pp. S467-470. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350448708002072> [Downloaded: 12/05/2019]
- Gerasimovskii V. I. (1957) 'On the modes of occurrence of uranium in rocks'. *The Soviet Journal of Atomic Energy* December 1957, Volume 3, Issue 6, pp 1407–1411
- Gillmore G., D. Gilbertson, J. Grattan, C. Hunt, S. McLaren, B. Pyatt, R. mani Banda, G. Barker, A. Denman, P. Phillips, T. Reynolds (2005) *The potential risk from 222radon posed to archaeologists and earth scientists: reconnaissance study of radon concentrations, excavations, and archaeological shelters in the Great Cave of Niah, Sarawak, Malaysia*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 60, pp. 213-227.

- Gillmore G. K., P.S. Phillips, A. R Denman, D.D. Gilbertson (2002) *Radon in the Creswell Crags Permian limestone caves*. Journal of Environmental Radioactivity 62, pp. 165-179. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X0100159X> [Downloaded: 06/05/2019]
- Gleeson Tom, Leslie Smith, Nils Moosdorf, Jens Hartmann, Hans H. Durr, Andrew Manning, Ludovicus van Beek, Mark Jellinek (2011) Mapping permeability over the surface of the Earth, Geophysikal Research Letters, vol.38, issue 2. Available at <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2010GL045565>
- Gregoric A., A. Zidansek, J. Vaupotic (2011) *Dependence of radon levels in Postojna cave on outside air temperature*. Natural Hazards Earth System Sciences, 11, pp. 1523-1528.
- Gunn J. (2004) *Radon in caves*. Σε: Encyclopedia of Caves and Karst Science. Taylor and Francis, London, UK, pp. 617-619. ISBN 978-1-57958-399-6
- Gunn J. (2004) Climate in Caves. Σε: Encyclopedia of Caves and Karst Science. Taylor and Francis, London, UK, pp. 467-474. ISBN 978-1-57958-399-6
- Hakl J., Hunyadi I. & Várhegyi A. (1997). Radon monitoring in caves. In Durrani S.A. & Ilic R. (Eds.) Radon measurements by etched track detectors. World Scientific: 261-283.
- Ilic R. & Sutey T. (1997). Radon monitoring devices based on etched track detectors. In Durrani S.A. & Ilic R. (Eds.) Radon measurements by etched track detectors. World Scientific: 103-128.
- Ishimori Y., Lange K., Martin P., Mayya Y.S. and Phaneuf M. (2013) Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues, Technical Reports Series No. 474. Vienna: IAEA - p.6
- Kavasi N., J. Somlai, G. Szeiler, B. Szabo, I. Schafer, T. Kovacs (2010) Estimation of effective doses to cavers based on radon measurements carried out in seven caves of the Bakony Mountains in Hungary. Radiation Measurements, 45, pp. 1068-1071. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135044871000288X> [Downloaded: 08/05/2019]
- Langridge D., R.P. Strokes, C.P. Jackson (2010) *Monitoring of radon gas in caves of the Yorkshire Dales, United Kingdom*. Journal of radiological protection, 30, pp. 545-556.
- Lario J., S. Sanchez-Moral, J.C. Canaveras, S. Cuezva, V. Soler (2005) *Radon continuous monitoring in Altamira Cave (northern Spain) to assess user's annual effective dose*. Journal of Environmental Radioactivity 80 161-174. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X0400284X> [Downloaded: 09/05/2019]

- Lario J., S. Sanchez-Moral, S. Cuezva, M. Taborda, V. Soler (2006) High  $^{222}\text{Rn}$  levels in a show cave (Castanar de Ibor, Spain): Proposal and application of management measures to minimize the effects on guides and visitors. *Atmospheric Environment*, 40, pp. 7395-7400. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231006007011> [Downloaded: 08/05/2019]
- Mihailovic D.T., M. Krmar, G. Mimic, E. Nikolic-Doric, I. Smetanova, K. Holy, J. Zelinka, J. Omelka (2015) A complexity analysis of  $^{222}\text{Rn}$  concentration variation. A case study of Domica cave, Slovakia for the period June 2010-June 2011. *Radiation Physics and Chemistry* 106, pp. 88-94. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969806X14002643> [Downloaded: 07/05/2019]
- Monroy-Ríos E. (2017). 'Speleogenesis: How were caves and cenotes formed?', *Environmental Biogeochemistry*, 26 Δεκεμβρίου. Διαθέσιμο στο: <https://sites.northwestern.edu/monroyrios/category/speleology/speleogenesis/> [Πρόσβαση: 26 Σεπτεμβρίου 2019]
- Nagy H. E., Z. Szabo, G. Jordan, C. Szabo, A. Horvath, A. Kiss (2012) *Time variations of  $^{222}\text{Rn}$  concentration and air exchange rates in a Hungarian cave*. *Isotopes in Environmental and Health studies*, 48:3, pp. 646-472.
- Nazaroff, W.W., & Nero, A.V. (1988). *Radon and its Decay Products in Indoor Air*. John Wiley & Sons, Inc.: USA. ISBN 0-471-62810-7, 518 pp.
- NCRP (1984) *Evaluation of Occupational and Environmental Exposures to Radon and Radon Daughters in the United States*. National Council on Radiation Protection and Measurements, Report No 78. ISBN 0-913392-68-5
- Oishimaya S.N. (2017). 'The Different Types Of Caves And Cave Systems'. *WorldAtlas*, (1 Αυγούστου). Διαθέσιμο στο: <https://www.worldatlas.com/articles/the-different-types-of-caves-and-cave-systems.html>
- OSHA (1988). *Health*, in Code of Federal Regulations: 41 CFR Part 57, Washington, D.C., U.S. Government
- Otton J. K. (1992) 'The geology of radon', USA: US Department of the Interior/ US Geological Survey. Ανακτήθηκε από: <https://pubs.usgs.gov/gip/7000018/report.pdf> [Πρόσβαση: 17 Οκτωβρίου 2019]
- PAHA SAPA GROTTTO (n.d.) - A Subchapter of the National Speleological Society. *Cave Air Dynamics and Geochemistry*. Διαθέσιμο στο: <https://www.pahasapagrotto.org/cave-air-dynamics--geochemistry.html> [Πρόσβαση: 8 Οκτωβρίου 2019]

- Papastefanou C., M. Manolopoulou, S. Stoulos, A. Ioannidou, E. Gerasopoulos (2005) *Elevated radon concentrations in a Pleistocenic cave operating as a show cave*. International Congress Series 1276, pp. 204-205. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0531513104018060> [Downloaded: 05/03/2020]
- Rowberry M. D., X. Marti, C. Frontera, M. J. VD Wiel, M. Briestensky (2016) *Calculating flux to predict future cave radon concentrations*. Journal of Environmental Radioactivity 157, pp.16-26.
- Sainz C., D. Rabago, S. Celaya, E. Fernandez, J. Quindos, L. Quindos, A. Fernandez, I. Fuente, J. L. Arteché, L.S. Quindos (2018) *Continuous monitoring of radon gas as a tool to understand air dynamics in the cave of Altamira (Cantabria, Spain)*. Journal of Science of the Total Environment 624, pp. 416-423. Available at : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717335726> [Downloaded: 06/05/2019]
- Sainz C., L. S. Quindos, I. Fuente, J. Nicolas, L. Quindos (2007) *Analysis of the main factors affecting the evaluation of the radon dose in workplaces: The case of tourist caves*. Journal of Hazardous Materials, 145, pp. 368-371.
- Schery, S.D., Whittlestone, S., Hart, K.P. & Hill, S.E. (1989). The flux of radon and thoron from Australian soils. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 94(D6):8567-8576. <https://dx.doi.org/10.1029/JD094iD06p08567>.
- Solomon S.B., R. Langroo, R.G. Lyons, J.M. James (1996) *Radon exposure to tour guides in Australian tourist caves*. Environmental International, Vol. 22, Suppl. 1, pp. S409-413. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412096001390> [Downloaded: 07/05/2019]
- Susoeff Al Jr., Radon-Nuclear Fallout in Your Home (2009), Digital Developments
- Tommasino L., National Agency for Environmental Protection and Technical Services, Rome, Italy, 2005
- Tsvetkova T., T. A. Przylibski, I. Nevinsky, V. Nevinsky (2005) *Measurement of radon in the East Europe under the ground*. Radiation Measurements 40, pp. 98-105. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350448704001271> [Downloaded: 07/05/2019]
- Wang Y., Luo W., Zeng G., Wang Y., Yang H., Wang M., Zhang L., Cai X., Chen J., Cheng A., Wang S. (2019) *High <sup>222</sup>Rn concentrations and dynamics in Shawan Cave, southwest China*. Journal of Environmental Radioactivity, 199-200, pp. 16-24. Available at:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X18303552>

[Downloaded:

09/05/2019]

- Whittlestone S., James J., Barnes C. (2003). 'The relationship between local climate and radon concentrations in the Temple of Baal, Jenolan Caves, Australia'. Journal of Australasian Speleological Research Helictite, 38(2): p. 39-44
- World Health Organization (2000). Air Quality Guidelines for Europe 2<sup>nd</sup> Edition, Chapter 8.3 'Radon'. Copenhagen: WHO Regional Publications, European Series, No. 91. Ανακτήθηκε από [http://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0005/123089/AQG2ndEd\\_8\\_3Radon.pdf?ua=1](http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/123089/AQG2ndEd_8_3Radon.pdf?ua=1) [Πρόσβαση: 27 Νοεμβρίου 2019]
- Wysocka M. (2011) *Radon in Jurassic caves of the Krakow-Czestochowa Upland*. Geochemical Journal, 45, pp. 447-453.
- United States Environmental Protection Agency U.S. EPA, (2003) 'EPA Assessment of Risks from Radon in Homes' EPA 402-R-03-003
- United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (1993). Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with scientific annexes. 1993 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations sales publication E.94.IX.2. New York: Author.
- United Nations. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2008). Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations sales publication E.10.XI.3. New York: Author.
- Ziegler J. T. & Biersak J. P. (1985). The stopping and range of ions in solids. New York: Pergamon Press

### Ηλεκτρονικές πηγές

[1] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128053782099915>

[2] [http://nuclearsafety.gc.ca/images/fact-sheet-images/half-life\\_e.gif](http://nuclearsafety.gc.ca/images/fact-sheet-images/half-life_e.gif)

[3] [http://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0005/123089/AQG2ndEd\\_8\\_3Radon.pdf?ua=1](http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/123089/AQG2ndEd_8_3Radon.pdf?ua=1)

[4] [https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/5352/1/chapter\\_03\\_15168.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/5352/1/chapter_03_15168.pdf)

[5] Ishimori Y., Lange K., Martin P., Mayya Y.S. and Phaneuf M. (2013) Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues, Technical Reports Series No. 474. Vienna: IAEA - p.6

[6] <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>

[7] <http://omega.physics.uoi.gr/radon/Greek/images/inhalation.jpg>

[8] V. I. Gerasimovskii (1957) 'On the modes of occurrence of uranium in rocks'. The Soviet Journal of Atomic Energy December 1957, Volume 3, Issue 6, pp 1407–1411

[9] <https://sites.northwestern.edu/monroyrios/category/speleology/speleogenesis/>

[10] <http://cambrianfoundation.org/speleogenesis/>

## Παράρτημα 1-Πίνακας συγκεντρώσεων σπηλαίων Dales (Yorkshire, UK)

Σπήλαιο	Συγκέντρωση (Bq/m <sup>3</sup> )	
Birkwith	470 (Χειμώνας)	1690 (καλοκαίρι)
Borrins Moor	60 (Χειμώνας)	300 (καλοκαίρι)
Calf Holes & Browgill	70 (χειμώνας)	2820 (καλοκαίρι)
Crackpot	2120 (φθινόπωρο)	3040(καλοκαίρι)
Dismal Hill	120 (χειμώνας)	3140 (καλοκαίρι)
Dow	200 (χειμώνας)	1720 (καλοκαίρι)
Dowkabottom	110 (χειμώνας)	3470 (καλοκαίρι)
Eglins Hole	910 (άνοιξη, καλοκαίρι)	1640 (καλοκαίρι)
Goyden Pot	980 (φθινόπωρο)	3370 (καλοκαίρι)



## Παράρτημα 2-Σπήλαια Αυστραλίας

	Location	Name of cave	ANNUAL	Radon Bq/m3	Lithologie		Age	
New South Wales	Abercrombie Mountain	Archway	20/5/94 - 19/6/95	51	μάρμαρα	Ανώτερο Σιλούριο	Ανώτερο Σιλούριο	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Abercrombie_Caves">https://en.wikipedia.org/wiki/Abercrombie_Caves</a>
	Abercrombie	Bush Ranger	20/5/94 - 19/6/95	105	μάρμαρα	Ανώτερο Σιλούριο	Ανώτερο Σιλούριο	<a href="https://www.nationalparks.nsw.gov.au/things-to-do/guided-tours/bushrangers-cave-tour">https://www.nationalparks.nsw.gov.au/things-to-do/guided-tours/bushrangers-cave-tour</a>
	Abercrombie	Grove Creek	20/5/94 - 19/6/95	94	μάρμαρα	Ανώτερο Σιλούριο	Ανώτερο Σιλούριο	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Abercrombie_Caves">https://en.wikipedia.org/wiki/Abercrombie_Caves</a>
	Abercrombie	King Solomons Temple	20/5/94 - 19/6/95	48	μάρμαρα	Ανώτερο Σιλούριο	Ανώτερο Σιλούριο	
	Jenolan	Temple of Baal	20/5/94 - 19/6/95	2134	μάρμαρα	Δεβόνιο εως Πέρμιο	Jenolan Caves yielded ages from 394 Ma (Early Devonian) to 258 Ma (Late Permian) (18 dates of individual size fractions). There were two distinct clusters among the dates. Seven dates ranged from 342 to 335 Ma (Carboniferous, Visean)	<a href="https://www.jenolancaves.org.au/the-caves/show-cave-tours*1/temple-of-baal-cave/">https://www.jenolancaves.org.au/the-caves/show-cave-tours*1/temple-of-baal-cave/</a>
	Jenolan	Cerebus	20/5/94 - 19/6/95	770	μάρμαρα	Δεβόνιο εως Πέρμιο		
	Jenolan	Chifley	20/5/94 - 19/6/95	838	μάρμαρα	Δεβόνιο εως Πέρμιο		
	Jenolan	Extbaal	20/5/94 - 19/6/95	1769	μάρμαρα	Δεβόνιο εως Πέρμιο		
	Jenolan	Extorient	20/5/94 - 19/6/95	854	μάρμαρα	Δεβόνιο εως Πέρμιο		
	Jenolan	Imperial	20/5/94 - 19/6/95	819	μάρμαρα	Δεβόνιο εως Πέρμιο		
	Jenolan	Jersey	20/5/94 - 19/6/95	337	μάρμαρα	Δεβόνιο εως Πέρμιο		
	Jenolan	Jubilee	20/5/94 - 19/6/95	1282	μάρμαρα	Δεβόνιο εως Πέρμιο		
	Jenolan	Lucas	20/5/94 - 19/6/95	628	μάρμαρα	Δεβόνιο εως Πέρμιο		
	Jenolan	Orient	20/5/94 - 19/6/95	915	μάρμαρα	Δεβόνιο εως Πέρμιο		
	Jenolan	Ribbon	20/5/94 - 19/6/95	1013	μάρμαρα	Δεβόνιο εως Πέρμιο		
	Jenolan	River	20/5/94 - 19/6/95	891	μάρμαρα	Δεβόνιο εως Πέρμιο		
	Wee Jasper	Careys	27/5/94-14/7/95	412	ασβεστόλιθοι	Δεβόνιο	The predominantly sedimentary rocks at Wee Jasper have been folded significantly. Wee Jasper has two different types of limestone: Taemas Limestone, overlying non-carbonate rock units, and Cavan Limestone. Both of these formed about 400-415 million years ago in the Devonian period, when they were laid down in shallow marine waters populated by species of lungfish, predatory fish and an abundance of trilobites (extinct arthropods) and molluscs. Some of the world's most significant and best preserved Devonian fossils have come from the Wee Jasper limestones. The area's best known cave is Careys, with its seven decorated chambers	<a href="http://www.geomaps.com.au/scripts/weejaspercaves.php">http://www.geomaps.com.au/scripts/weejaspercaves.php</a>
	Wellington	Cathedral	20/5/94-3/10/95	330	ασβεστόλιθοι	Δεβόνιο	The caves at Wellington have formed in a bed of north-south-trending limestone that, along with mudstones and other rocks, make up the Garra Formation, which originated 350-400 million years ago in the Devonian period. Wellington's limestone beds and strata of the adjoining Garra Formation are internationally significant. Rich in Devonian marine fossils, these rocks provide a standard from which the age of other rocks can be compared or identified.	<a href="http://www.geomaps.com.au/scripts/wellingtoncaves.php">http://www.geomaps.com.au/scripts/wellingtoncaves.php</a>
	Wellington	Gaden	20/5/94-3/10/95	276	ασβεστόλιθοι	Δεβόνιο		
	Wombeyan	Figtree	18/5/94-25/7/95	97	ασβεστόλιθοι	Κατώτερο Δεβόνιο	The limestone caves of Wombeyan Karst Conservation Reserve are between 400 and 430 million years old. The geological processes that have created the magnificent cave system you see today continue to work their magic; you'll notice the impressive cave decorations including stalactites and stalagmites that are created by the infiltration of water into the caves.	<a href="https://www.nationalparks.nsw.gov.au/things-to-do/show-caves/fig-tree-cave?p=1&amp;pdfprint=true">https://www.nationalparks.nsw.gov.au/things-to-do/show-caves/fig-tree-cave?p=1&amp;pdfprint=true</a>
	Wombeyan	Junction	18/5/94-25/7/95	228	ασβεστόλιθοι	Κατώτερο Δεβόνιο		
	Wombeyan	Kooringa	18/5/94-25/7/95	371	ασβεστόλιθοι	Κατώτερο Δεβόνιο		
	Wombeyan	Mulwaree	18/5/94-25/7/95	268	ασβεστόλιθοι	Κατώτερο Δεβόνιο		
	Wombeyan	Wollondilly	18/5/94-25/7/95	220	ασβεστόλιθοι	Κατώτερο Δεβόνιο		
	Yarrangobilly	Castle	28/5/94-16/6/95	1295	ασβεστόλιθοι	Σιλούριο	Explore six caves created from a belt of limestone laid down about 440 million years ago	<a href="https://www.visitnsw.com/destinations/snowy-mountains/tumut-area/talbingo/attractions/yarrangobilly-caves">https://www.visitnsw.com/destinations/snowy-mountains/tumut-area/talbingo/attractions/yarrangobilly-caves</a>
	Yarrangobilly	Harry Woods	28/5/94-16/6/95	337	ασβεστόλιθοι	Σιλούριο		
	Yarrangobilly	Jersey	28/5/94-16/6/95	917	ασβεστόλιθοι	Σιλούριο	<a href="#">The limestone at Yarrangobilly is of Late Silurian age and formed approximately 440 million years ago. The limestone occurs in a belt that is approximately 14 kilometres long and 1.5km wide and is overlain by slates, shales, sandstone and conglomerates of the Ravine Beds.</a>	<a href="http://www.geomaps.com.au/scripts/yarrangobillycaves.php">http://www.geomaps.com.au/scripts/yarrangobillycaves.php</a>
	Yarrangobilly	Jillabanean	28/5/94-16/6/95	824	ασβεστόλιθοι	Σιλούριο		
	Yarrangobilly	North Glory	28/5/94-16/6/95	1213	ασβεστόλιθοι	Σιλούριο		
	Yarrangobilly	South Glory	28/5/94-16/6/95		ασβεστόλιθοι	Σιλούριο		

Παράρτημα 3- Γενικός πίνακας

Α/Α	Συγγραφέας -είς	Τίτλος εργασίας	Τίτλος περιοδικού- χρονολογία έκδοσης	Όνομα σπηλαίου	Χώρα	Αριθμός σπηλαίων	Τύπος μετρήσεων/αποτελεσμάτ ων	Σημεία μέτρησης	Όργανο μέτρησης-1	Μέθοδος μέτρησης-1	Συγκεντρώσεις ραδονίου Bq/m3				Γεωλογική περίοδος	Παρατηρήσεις	Ρήγμα ρηγματογόν ο ζώνη																	
											Χαμηλότερη	Υψηλότερη	Μέσ η																					
1	Lario J., S. Sanchez-Moral, J.C. Canaveras, S. Cuezva, V. Soler	Radon continuous monitoring in Altamira Cave (northern Spain) to assess user's annual effective dose	Journal of Environmental Radioactivity 80 161-174, 2005	Altamira	Ισπανία	ένα σπήλαιο, τουριστικά αξιοποιημένο	Ωριαία	1 (polychrome s room)	Continuous Passive Radon Detector (CPRD) Pylon AB5 scintillometer	Παθητική	Συνεχής-ωριαία μέτρηση για ένα έτος	186 (Ιούνιος)	7120 (Μάρτιος)	3562	Ασβεστόλιθοι	Κρητιδικό	Οι τιμές των etched track detectors είναι ελαφρά χαμηλότερες από την συνεχή μέθοδο. Υπάρχουν εποχιακές μεταβολές στην συγκέντρωση που συμπίπτουν με προηγούμενη έρευνα (Fernandez et al. 1986) και αποδεικνύουν την σταθερότητα του μικρο-περιβάλλοντος του καρστικού συστήματος.																	
2	Sainz C., D. Rabago, S. Celaya, E. Fernandez, J. Quindos, L. Quindos, A. Fernandez, I. Fuente, J. L. Arteche, L.S. Quindos	Continuous monitoring of radon gas as a tool to understand air dynamics in tha cave of Altamira (Cantabria, Spain)	Journal of Science of the Total Environment 624, pp. 416-423, 2018	Altamira	Ισπανία	ένα σπήλαιο, (ίδιο με ανωτέρω) τουριστικά αξιοποιημένο	Μέση μηνιαία	Hall	RadonScout monitors (SARAD GmbH)	Ενεργητική	Συνεχής-ωριαία μέτρηση για 42 μήνες	216 (Ιούλιος)	5282 (Απρίλιος)		Ασβεστόλιθοι	Κρητιδικό	Οι τιμές είναι και από τους 2 ανιχνευτές. 2 τοποθεσίες ήταν υπό μελέτη με μικρή διαφορά μεταξύ τους (Μ.Σ.1=2855, Μ.Σ.2=3151). Η μικρότερη τιμή παρουσιάστηκ ε στην Τ.1 ενώ η μεγαλύτερη στην Τ.2.																	
							Μέση μηνιαία	Polychromes	RadonScout monitors (SARAD GmbH)	Ενεργητική		636 (Αύγουστος)	5793 (Δεκέμβριος)																					
3	Canoba A. C.	Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) survey in Argentina	Annals of ICRP, Vol. 41, Issues 3-4, pp. 352-367, October-December 2012		Αργεντινή	ένα σπήλαιο, τουριστικά αξιοποιημένο	Σημειακή	14 σημεία (πλην της εισόδου)	Activated charcoal	Παθητική		219	2831		Ανθρακικές αποθέσεις	Ιουρασικό - Κρητιδικό	15 σημεία του σπηλαίου ήταν υπό μελέτη. Οι διαφορές μεταξύ των 2 μεθόδων είναι σημαντικές (20%) και όχι ίδια για κάποια από τις δυο.																	

4	Solomon S.B., R. Langroo, J.R. Peggie, R.G. Lyons, J.M. James	Occupational exposure to radon in Australian tourist caves. An Australia-wide study of radon levels.	Australian Radiation Laboratory, Final Report of Worksafe Australia Research Grant, February 1996	52 σπήλαια σε 24 τοποθεσίες	Αυστραλία	52 σπήλαια, τουριστικά αξιοποιημένα	Εποχική(άνοιξη-χειμώνας) & μέση 6μηνη		CR39	Παθητική	Τρίμηνη, εποχική και δωδεκάμηνη (Μάιος 1994 - Ιούνιος 1995)					Παλαιοζωικό	Ο μεγαλύτερος και μικρότερος εποχικός μέσος όρος παρατηρείται την άνοιξη σε διαφορετικά όμως σημεία του σπηλαίου. Στα σημεία αυτά παρατηρείται αντίστοιχα και ο μεγαλύτερος και μικρότερος ετήσιος μέσος όρος.	
5	Kavasi N., J. Somlai, G. Szeiler, B. Szabo, I. Schafer, T. Kovacs	Estimation of effective doses to cavers based on radon measurements carried out in seven caves of the Bakony Mountains in Hungary	Radiation Measurements , 45, pp. 1068-1071, 2010	Szengtal kolik	Ουγγαρία	τουριστικά αξιοποιημένο	Μέση 6ημερη-35ημερη		Alphaguard PRO2000 &RADIM 5-WP	ενεργητική	Συνεχής	6996 (Μάιος-Ιούνιος)	19291 (Δεκέμβριος)		Δολομίτες	Τριαδικό & Ιουρασικό	Σε ένα σπήλαιο η εποχική διακύμανση ήταν 80 (χειμώνας) εως 24000 (καλοκαίρι). Σε άλλο η διακύμανση ήταν 7000 εως 19000. Σε άλλο η χαμηλότερη συγκέντρωση ήταν την άνοιξη (4300), ενώ η συγκέντρωση τον χειμώνα ήταν η υψηλότερη (11000)	Ρηξιτέμαχος (Fault block mountain)
			Csatarhegy i	τουριστικά αξιοποιημένο		Μέση 8μηνη	3	CR-39 TASTRAK	παθητική	Ολοκληρωτική (3 σημεία)			3076	Δολομίτες				
			M1	τουριστικά αξιοποιημένο		Μέση 7ημερη		Alphaguard PRO2000 &RADIM 5-WP	ενεργητική	Συνεχής, για 7 ημέρες, για 2 μήνες (Φεβρουάριος και Αύγουστος)		80 (Φεβρουάριος)	23712 (Αύγουστος)		Ασβεστόλιθοι			
			MiklowPal roka	τουριστικά αξιοποιημένο		Μέση 20ημερη		Alphaguard PRO2000 &RADIM 5-WP	ενεργητική	Συνεχής για 20 ημέρες τον Σεπτέμβριο				9539	Δολομίτες			
			Zsofia	τουριστικά αξιοποιημένο		Μέση 23ημερη		Alphaguard PRO2000 &RADIM 5-WP	ενεργητική	Συνεχής για 23 ημέρες τον Σεπτέμβριο				8989	Ασβεστόλιθοι			
			Somhegy roka	τουριστικά αξιοποιημένο		Μέση 6ημερη		Alphaguard PRO2000 &RADIM 5-WP	ενεργητική	Συνεχής για 6 ημέρες, για 2 μήνες (Ιανουάριος & Αύγουστος)		46 (Ιανουάριος)	419 (Αύγουστος)		Ασβεστόλιθοι			
			Kabhegy baglyas	τουριστικά αξιοποιημένο		Μέση 7ημερη		Alphaguard PRO2000 &RADIM 5-WP	ενεργητική	Συνεχής για 7 ημέρες, για 2 μήνες (Μάρτιος & Νοέμβριος)		4282 (Μάρτιος)	11126 (Νοέμβριος)		Δολομίτες			