



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

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

Συγκριτική Αξιολόγηση και Αξιοποίηση Μεθοδολογιών Μέτρησης Συγκέντρωσης
Ραδονίου σε Σπήλαια

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τομέ Δημήτριος

Εξεταστική Επιτροπή :

Εμμανουήλ Μανούτσογλου

Καθηγητής Π.Κ (επιβλέπων)

**Νικόλαος Καλλίθρακας-
Κόντος**

Καθηγητής Π.Κ

Κωνσταντίνος Ποτηριάδης

Δρ., Ειδικός Λειτουργός Επιστήμονας βαθμίδας Α΄,
Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας

Χανιά
Μάιος 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το ραδόνιο (Rn), ένα άχρωμο και άοσμο φυσικό ραδιενεργό αέριο που εκλύεται από πετρώματα, εδάφη ακόμα και από ύδατα. Θεωρείται ακίνδυνο σε ανοιχτούς χώρους και κλειστούς - επαρκώς αεριζόμενους χώρους. Ωστόσο, σε περιοχές που λόγω κυρίως του γεωλογικού υποβάθρου παρουσιάζεται αυξημένο ποσοστό έκλυσης αυτού του αερίου, ανεπαρκώς αεριζόμενοι οικιστικοί χώροι, αλλά πολύ περισσότερο υπόγειοι χώροι κάθε χρήσης μπορούν να δημιουργήσουν ένα επικίνδυνο περιβάλλον για την ανθρώπινη υγεία.

Για την μέτρηση της συγκέντρωσης του ραδονίου χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι που ταξινομούνται ανάλογα με τον αν καταγράφουν το ραδόνιο ή τα θυγατρικά του, τον απαιτούμενο χρόνο μέτρησης και την ύπαρξη ή όχι συνεχούς πηγής ενέργειας του οργάνου μέτρησης. Για την αποτελεσματική σύγκριση και αξιολόγηση των μετρητικών οργάνων και μεθοδολογιών έγινε στην εργασία αυτή, με τη χρήση δεδομένων από την διεθνή βιβλιογραφία μία ανασκόπηση, καταγραφή και παρουσίαση των οργάνων και μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση ραδονίου σε κλειστούς χώρους και ειδικά σε φυσικά περιορισμένους χώρους, τα σπήλαια. Συνολικά μελετήθηκαν και ταξινομήθηκαν οι μέθοδοι μέτρησης της συγκέντρωσης του ραδονίου από εκατό διαφορετικές/τυχαίες δημοσιευμένες εργασίες σε σπήλαια ανά τον κόσμο. Όπως προκύπτει οι ανιχνευτές πυρηνικών ιχνών είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος παγκοσμίως αγγίζοντας το 50,41%. Με διαφορά ακολουθούν οι ανιχνευτές θαλάμων ημιαγωγών με 23,14% επί των υπό επεξεργασία δημοσιευμάτων, ακολουθούν με 16, 53% οι κυψελίδες σπινθηρισμού, με 11,57% οι ανιχνευτές θαλάμων ιονισμού και τέλος οι ανιχνευτές ενεργοποιημένου άνθρακα κατέχουν την τελευταία θέση με 1,65%.

Εκτός της ανωτέρω κατάταξης καταγράφηκαν ιδιομορφίες, ακραίες και μέσες τιμές και επιπροσθέτως αξιολογήθηκαν και ταξινομήθηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου μέτρησης στα σπήλαια, που αποτελούν πόλο έλξης και επίσκεψης για πολλά εκατομμύρια φυσιολατρών παγκοσμίως, αποτελώντας για διάφορες χώρες, συμπεριλαμβανομένης και της δικής μας, ένα σταθερά αυξανόμενο εθνικό κεφάλαιο: η συσχέτιση των υψηλών συγκεντρώσεων ραδονίου με την παρουσία ή απουσία αερισμού, η σημαντικότητα των εποχικών διακυμάνσεων των συγκεντρώσεων του ραδονίου, η βαρύνουσα σημασία των χρονικά ολοκληρωμένων μεθόδων καθώς και αναγκαιότητα σε πολλές περιπτώσεις ταυτόχρονης χρήσης πολλαπλών μεθόδων για την εξαγωγή έγκυρων αποτελεσμάτων.

ABSTRACT

Radon (Rn), is a colorless odorless natural radioactive gas which is released from rocks, soils and even water. It is considered harmless in open spaces and in properly vented confined spaces. However, in areas that mainly due to geological bedrock is reported elevated emission levels of that gas, such as poorly vented residential areas, but mostly underground spaces of any use, it can create a dangerous environment for human health.

In order to measure the concentration of radon various methods are used which are classified depending to whether they record the radon or its daughters, depending the required time of measurement and depending on whether a constant power source is needed for the equipment. In order to effectively compare and evaluate the measurement equipment and techniques, it was realized in the current dissertation, with the use of data from the international literature, a review, listing and presentation of the equipment and techniques that are used to measure radon in confined spaces and especially in natural occurred confined space, such as the caves. In total there was reviewed and classified the techniques for the measurement of radon concentration from one hundred different random published dissertations about caves globally. The result that comes up is that nuclear track detectors is the most commonly techniques used globally with a percentage of 50.41%. It is followed with big margin by semi-conductor chamber detectors with a percentage of 23,14% on the reviewed published dissertation, and are followed by scintillation cell detectors with a percentage of 16,53% , by ionization chamber detectors with 11,57% and by activated coal detectors ranked last with 1,65%.

Apart the above ranking there was recorded peculiar, extreme and mean values and furthermore there was evaluated the factors that affect the choice of the proper measurement method in caves, which consist a hub of attraction and visitation for millions of naturists globally ,constituting for most countries including Greece a steadily rising capital : the correlation of high radon concentration with the presence or absence of ventilation, the importance of seasonal variation and the great importance of time integrated methods as well as the necessity in many cases of simultaneously use of multiple methods to extract valid results.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση των μετρητικών οργάνων και μεθόδων για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του ραδονίου σε σπήλαια. Η εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Στο **1^ο κεφάλαιο** γίνεται μία γενική αναφορά για το ραδόνιο, τις ιδιότητες του και την προέλευσή του, ενώ, στο **2^ο κεφάλαιο** γίνεται μία αναδρομή στις μεθοδολογίες και στις μετρητικές διατάξεις. Στο **3^ο κεφάλαιο** περιγράφεται η παρουσία ραδονίου σε σπήλαια και σε άλλους γεωλογικούς σχηματισμούς και στο **4^ο κεφάλαιο** παρουσιάζονται, αναλύονται και ταξινομούνται το σύνολο των συγκρινόμενων διεθνών ερευνών. Στο **5^ο κεφάλαιο** παρατίθενται τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης, ακολουθούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν, καθώς και προοπτικές για μελλοντικές έρευνες. Στο **παράρτημα** δίνονται τα ισχύοντα νομοθετικά μέτρα για τις οριακές τιμές.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή, κ. Εμμανουήλ Μανούτσογλου, για τη στήριξη, αλλά και για την ευκαιρία που μου έδωσε καθώς και για την απεριόριστη υπομονή και επιμονή του για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Ένα ευχαριστώ στους καταξιωμένους επιστήμονες του αντικειμένου Καθ. Ν. Καλλίθρακα Κόντο και Δρ. Κ. Ποτηριάδη. Δεν θα μπορούσα να παραλείψω να αναφέρω τη στήριξη που είχα όλα αυτά τα χρόνια από τους γονείς και την οικογένειά μου, τους ευχαριστώ θερμά.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 6

1.1 Γενικά για το Ραδόνιο 7

1.2 Φυσικές και χημικές ιδιότητες Ραδονίου..... 8

1.2.1 Μονάδες μέτρησης συγκέντρωσης ραδονίου8

1.3 Σχηματισμός, Εκροή και Διαφυγή Ραδονίου 9

1.4. Επιπτώσεις στην υγεία 12

2. ΜΕΤΡΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ 13

2.1 Ταξινόμηση μεθόδων μέτρησης του ραδονίου. 13

2.1.1 Ταξινόμηση μεθόδων σε άμεσες και έμμεσες. 13

2.1.2 Ταξινόμηση βάσει του απαιτούμενου χρόνου μέτρησης..... 14

2.1.3 Ταξινόμηση βάσει των απαιτήσεων τροφοδοσίας 16

2.2 Παρουσίαση των σημαντικότερων μεθόδων 17

3. ΡΑΔΟΝΙΟ ΣΕ ΣΠΗΛΑΙΑ..... 23

3.1 Δημιουργία των σπηλαίων 23

3.1.1 Αιτίες και μορφές σπηλαιογένεσης 26

3.1.2 Καρστικές περιοχές..... 29

3.1.2.1 Χαρακτηριστικά 29

3.1.2.2 Ο όρος καρστ, μια περιεκτική έννοια 30

3.2 Η αναγκαιότητα ερευνών στα σπήλαια..... 33

3.3 Ταξινόμηση των σπηλαίων βάση της ραδιενέργειας τους [Fhulufhelo Nemangwele, 2005] 35

3.4 Μεταφορά του ραδονίου στα εσωτερικά των σπηλαίων 36

4. ΕΡΕΥΝΕΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΕ ΣΠΗΛΑΙΑ 40

4.1 Στόχοι των μελετών μέτρησης συγκεντρώσεως ραδονίου 41

4.2 Παράμετροι προσδιορισμού μεθόδων μέτρησης..... 46

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 50

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 56

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΑ: ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΕΙΣ 69

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ 71

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Φυσικές ιδιότητες του ραδονίου.....2

Πίνακας3.1: Απεικόνιση αποτελεσμάτων της κατανομής συγκέντρωσης του ραδονίου σε σχέση με τη λογαριθμική κατανομή περιεκτικότητας ραδονίου σε 220 σπήλαια παγκόσμιας κλίμακας.....23

Πίνακας4.1: Εκτιμώμενη ετήσια ενεργή δόση σε επισκέπτες σπηλαίων29

Πίνακας4.2: Εποχιακή μεταβολή της συγκέντρωσης του ραδονίου σε συνάρτηση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας σπηλαίων31

Πίνακας4.3: Μετρήσεις ραδονίου σε εγκαταλελειμμένο ορυχείο υδραργύρου στο San Joaquín, Μεξικό.....33

Πίνακας4.4: Καταγεγραμμένο και προσομοιωμένο σήμα της συγκέντρωσης ραδονίου στον αέρα σπηλαίου σε συσχέτιση με την ενεργή υγραποίηση σε έναν ετήσιο κύκλο.....34

Πίνακας5.1: Μεθοδολογία μέτρησης ραδονίου σε 100 διαφορετικές μελέτες διεθνώς.....38

Πίνακας Α: Οι περιοχές με τη μεγαλύτερη συσσώρευση ραδονίου στην Ελλάδα.....

Πίνακας Β: Όρια συγκέντρωσης στον εσωτερικό αέρα των κατοικιών.....

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Ενεργητικός ανιχνευτής AlphaGUARD.....16

Εικόνα 2.2: Παθητικοί ανιχνευτές καταγραφή ιχνών17

Εικόνα 2.3: Τυπική εικόνα ιχνών διασπάσεων ραδονίου σε ανιχνευτή CR-3.....18

Εικόνα 2.4:Ανιχνευτής Electret (E-PERM).....21

Εικόνα 3.1 Κατανομή των ασβεστολιθικών σχηματισμών και των μεγαλύτερων σπηλαίων στον Ελλαδικό χώρο

Εικόνα 3.2: Αναπαράσταση του ρεύματος αέρα λόγω του φαινομένου της καμινάδας σε ένα απλό σπήλαιο.....39

Εικόνα 4.1: Χωροταξική κατανομή της μέσης συγκέντρωσης του ραδονίου37

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Σχηματισμός, εκροή και διαφυγή ραδονίου από γεωλογικούς σχηματισμούς - Έξοδος ραδονίου από το έδαφος.....10

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρόλο που το ευρύ κοινό αναγνωρίζει το μονοξείδιο του άνθρακα και τους αέριους καύσιμους υδρογονάνθρακες ως τα πιο επικίνδυνα και θανατηφόρα αέρια, υπάρχει ένα αέριο, το ραδόνιο, στο οποίο, στην πραγματικότητα, οφείλονται πολλοί περισσότεροι θάνατοι ετησίως λόγω καρκίνου του πνεύμονα. Το ραδόνιο (Rn), ένα άχρωμο και άοσμο φυσικό ραδιενεργό αέριο, που εκλύεται από το έδαφος, θεωρείται ακίνδυνο σε ανοιχτούς χώρους και κλειστούς χώρους επαρκώς αεριζόμενους. Ωστόσο, σε περιοχές που λόγω του γεωλογικού υποβάθρου παρουσιάζεται αυξημένο ποσοστό έκλυσης αερίου ραδονίου, ανεπαρκώς αεριζόμενοι οικιστικοί χώροι, αλλά και πολύ περισσότερο υπόγειοι χώροι κάθε χρήσης μπορούν να δημιουργήσουν ένα επικίνδυνο περιβάλλον για την ανθρώπινη υγεία.

Τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότεροι οργανισμοί και κράτη ευαισθητοποιούνται απέναντι στον κίνδυνο του ραδονίου, επενδύοντας στην πρόληψη μέσω τις καταγραφής και αποτύπωσης των επικίνδυνων γεωλογικών περιοχών και την εφαρμογή περιοδικών μετρήσεων στους χώρους αυξημένης επικινδυνότητας. Παράλληλα, τα τελευταία χρόνια έχει δημοσιευθεί ένας μεγάλος αριθμός εργασιών με στόχο την ανάλυση των μηχανισμών και των παραμέτρων που επηρεάζουν την έκλυση, μεταφορά και συγκέντρωση του ραδονίου.

Αντίστοιχα έχουν αυξηθεί τα τελευταία χρόνια και τα διαθέσιμα όργανα μέτρησης ραδονίου, προσφέροντας επιλογές τόσο για ερευνητικούς σκοπούς όσο και για οικιακή χρήση, ενώ, η εξέλιξη της τεχνολογίας αυξάνει τις δυνατότητες εντοπισμού, καταγραφής και αποθήκευσης των μετρήσεων των συγκεντρώσεων του ραδονίου. Δεδομένου δε και του μεγάλου αριθμού μεθοδολογιών που εκμεταλλεύονται για τη λειτουργία τους τα παραπάνω όργανα απαιτούνται εξειδικευμένες γνώσεις για την σωστή επιλογή των οργάνων ανάλογα και με τις παραμέτρους της χρήσης που προβλέπεται να γίνει.

Σημείο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, όσον αφορά την παρουσία του ραδονίου, αποτελούν, αναπόφευκτα, τα σπήλαια. Η έλλειψη αερισμού, αλλά και η έλλειψη

δυνατότητας επέμβασης στο φυσικό περιβάλλον ενός σπηλαίου καθιστά την πρόληψη μέσω μέτρησης της συγκέντρωσης του αερίου μοναδική επιλογή. Εκτός της πρόληψης για την προστασία της ανθρώπινης υγείας, η μέτρηση της συγκέντρωσης του ραδονίου χρησιμοποιείται συστηματικά για τον εντοπισμό πρώτων υλών όπως το ουράνιο και το πετρέλαιο, τον καθορισμό γεωθερμικών πηγών ενέργειας, την χαρτογράφηση ρηγμάτων, την πρόγνωση σεισμών, αλλά και τη μελέτη ηφαιστειακής δραστηριότητας.

1.1 Γενικά για το Ραδόνιο

Το ραδόνιο είναι ένα φυσικό, άχρωμο, άοσμο, ραδιενεργό αέριο. Το ραδόνιο διαφοροποιείται από τα υπόλοιπα φυσικά ραδιενεργά στοιχεία καθώς είναι χημικά αδρανές, δεν επηρεάζεται δηλαδή η συμπεριφορά του από χημικές διεργασίες. Τα πρώτα ισότοπα (^{220}Rn και ^{222}Rn) ανακαλύφθηκαν το 1900 από τους E. Rutherford και E. Dorn αντίστοιχα (Duranni&Ilic, 1996). Το ραδόνιο είναι το τρίτο κατά σειρά ραδιενεργό στοιχείο που βρέθηκε μετά το ράδιο και το πολώνιο. Οι χρόνοι ημιζωής των ισοτόπων του ραδονίου είναι μικρότεροι από μία ώρα με εξαίρεση το ^{210}Rn (2.5h), το ^{211}Rn (14,7h) και το ^{222}Rn (3,8 ημέρες) (Cothorn, 1987).

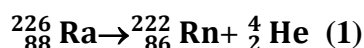
Πίνακας 1.1: Φυσικές ιδιότητες του ραδονίου(UNSCEAR, 1982).

<i>Πυκνότητα σε κανονικές συνθήκες</i>	<i>9.96 Kgr/m³</i>
<i>Σημείο εξάτμισης σε πίεση 1 atm</i>	<i>-61,8 °C</i>
<i>Σημείο τήξης</i>	<i>-71° C</i>
<i>Κρίσιμη θερμοκρασία</i>	<i>104° C</i>
<i>Κρίσιμη πίεση</i>	<i>62atm</i>
<i>Ιξώδες σε πίεση 1 atm και θερμοκρασία 20° C</i>	<i>0.229poise</i>
<i>Διαλυτότητα σε υγρά υπό πίεση 1 atm και θερμοκρασία 18° C</i>	
<i>-Νερό</i>	<i>230cm³/Kgr</i>
<i>-Αιθυλική αλκοόλη</i>	<i>7,4 cm³/Kgr</i>
<i>-Υγρή παραφίνη</i>	<i>9,2 cm³/Kgr</i>
<i>-Λάδι ελιάς</i>	<i>29 cm³/Kgr</i>

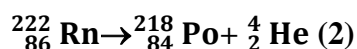
1.2 Φυσικές και χημικές ιδιότητες Ραδονίου

Το ραδόνιο (^{222}Rn) αποτελεί φυσική ραδιενέργεια ως μέλος της σειράς της ραδιενεργού σειράς του Ουρανίου (^{238}U), το οποίο συναντάται στη γη με τη μορφή UO_2 και η συγκέντρωσή του διαφέρει σημαντικά από τόπο σε τόπο, με τη μέγιστη να παρατηρείται στα κοιτάσματα φυσικού ουρανίου, όπου το UO_2 είναι περίπου το 0.1 μέχρι 0.5% της μάζας του ορυκτού.

Το ραδόνιο (^{222}Rn) παράγεται με α-διάσπαση του ασταθούς ισοτόπου ^{226}Ra και δίνει ένα σύνολο ισοτόπων που είναι γνωστά ως θυγατρικά του ραδονίου.



Το ραδόνιο (^{222}Rn) διασπάται σε Πολώνιο-218 (^{218}Po) ως εξής:



1.2.1 Μονάδες μέτρησης συγκέντρωσης ραδονίου

Η ενεργότητα ή ραδιενεργότητα των πυρήνων του ραδονίου, η συχνότητα δηλαδή των πυρηνικών διασπάσεων ανά μονάδα χρόνου μετριέται σε Bq (Μπεκερέλ). 1 Bq σημαίνει ότι λαμβάνει χώρα μία πυρηνική διάσπαση (ή μετασχηματισμός) ανά δευτερόλεπτο.

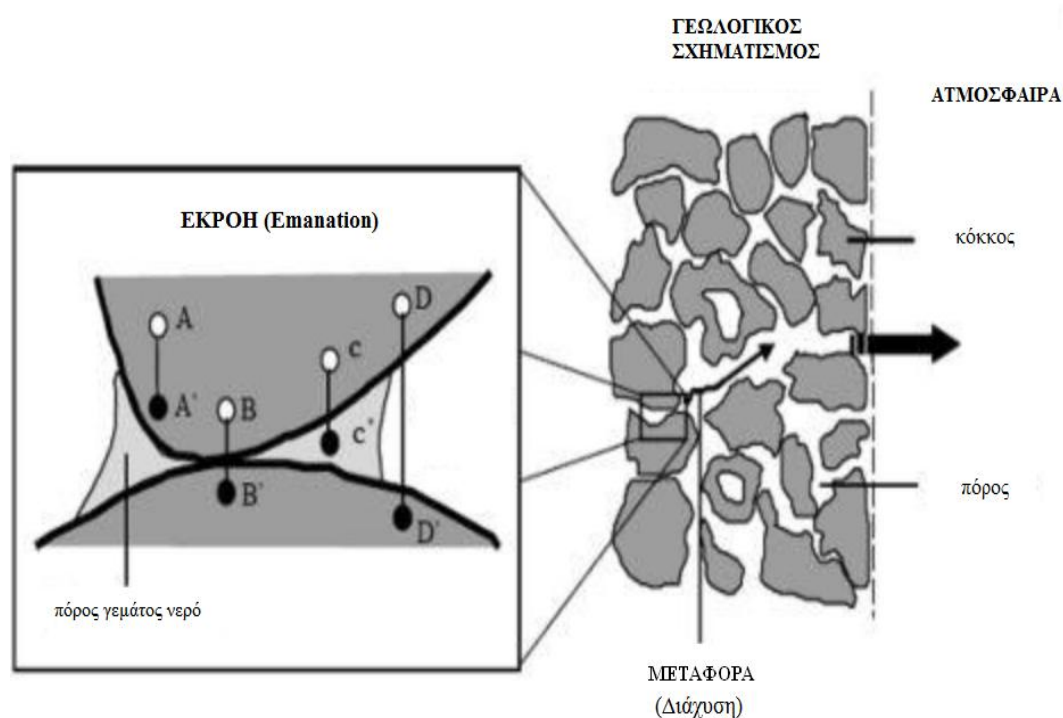
Το αποτέλεσμα μίας μέτρησης της συγκέντρωσης Ραδονίου (^{222}Rn) εκφράζεται σε Bq/m^3 . Δηλαδή, 1 Bq/m^3 σημαίνει ότι κατά μέσο όρο σε κάθε κυβικό μέτρο αέρα, συμβαίνει μία διάσπαση ενός ατόμου ραδονίου ανά δευτερόλεπτο.

Το τελικό ζητούμενο μέγεθος σε μία μελέτη είναι η επίδραση της συγκέντρωσης του ραδονίου στον άνθρωπο και εκφράζεται με τα παρακάτω μεγέθη:

- **Απορροφούμενη δόση** δηλαδή η ενέργεια που εναποθέτει οποιαδήποτε ραδιενεργή ακτινοβολία συμπεριλαμβανομένης της γ και X σε οποιοδήποτε υλικό. Μονάδα της απορροφούμενης δόσης ορίζεται στο διεθνές σύστημα το Gray (Gy) και ισχύει $1\text{Gy}=1\text{Joule/Kgr}$.
- **Ισοδύναμη ή βιολογική δόση** που ορίζεται ως το γινόμενο της απορροφούμενης δόσης με έναν συντελεστή ποιότητας Q , ο οποίος λαμβάνεται κατά περίπτωση από πίνακα ανάλογα με την ενέργεια της ακτινοβολίας. Μονάδα της ισοδύναμης δόσης στο διεθνές σύστημα είναι το Sievert (Sv) και ισχύει ότι: $\text{Ισοδύναμη δόση (Sv)} = \text{απορροφούμενη δόση (Gray)} \times Q$ (Κασινάλης, 2008)

1.3 Σχηματισμός, Εκροή και Διαφυγή Ραδονίου

Το ραδόνιο προκύπτει από τη διάσπαση του ουρανίου. Σε αντίθεση όμως με το ουράνιο και το ράδιο που είναι στερεά στοιχεία και παραμένουν στα πετρώματα και στο έδαφος, το ραδόνιο είναι αέριο και μπορεί να διαφύγει. Η δυνατότητα σχηματισμού αέριου ραδονίου στα πετρώματα εξαρτάται από την περιεκτικότητα των κόκκων του πετρώματος σε ουράνιο, αλλά και από τον συντελεστή εκροής, το ποσοστό, δηλαδή, του ραδονίου των κόκκων ενός πετρώματος που εν τέλει εισέρχεται στους πόρους (Nazaroff et al).



Σχήμα 1.1: Σχηματισμός, εκροή και διαφυγή ραδονίου από γεωλογικούς σχηματισμούς - Έξοδος ραδονίου από το έδαφος (Πιθανές περιπτώσεις τερματισμού της ανάκρουσης του θυγατρικού πυρήνα μετά την μεταστοιχείωση του ραδίου. A: ο σχηματισμός του ραδονίου γίνεται σε απαγορευτικό για την απελευθέρωση του βάθος, εντός του κόκκου του υλικού, B και D: η κινητική του ενέργεια επαρκεί ώστε να μεταφερθεί σε γειτονικό κόκκο όπου και εγκλωβίζεται, C: το ραδόνιο σταματά στον γειτονικό πόρο (που περιέχει συνήθως νερό) από όπου εύκολα διαχέεται προς το περιβάλλον) (Knutson, 1988).

Γενικά ισχύει ότι εάν το άτομο του 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 παραμένει στους κόκκους και διασπάται (Duranni and Illic, 1997).

Η έξοδος του ^{222}Rn από τους γεωλογικούς σχηματισμούς ολοκληρώνεται σε δύο φάσεις:

- **Εκροή (emanation)** ραδονίου από τους κόκκους καλείται το φαινόμενο κατά το οποίο το ραδόνιο που παράγεται από την α - διάσπαση του εγκλωβισμένου σ' αυτούς ^{226}Ra , διαφεύγει από εκεί και εισέρχεται στους πόρους.

- **Διαφυγή** ραδονίου καλείται το φαινόμενο κατά το οποίο ένα ποσοστό του ραδονίου που κινείται εντός των πόρων του ενεργού πορώδους, διαφεύγει τελικά προς την επιφάνεια της Γης και πριν διασπαστεί στα θυγατρικά του εισέρχεται στην ατμόσφαιρα.

Οι μηχανισμοί διαφυγής μπορεί να είναι:

- **Διάχυση** (*diffusion*), η κίνηση οφείλεται στις διαφορές συγκέντρωσης που έχει το ραδόνιο μέσα στο πέτρωμα με αποτέλεσμα να κινείται προς περιοχές με χαμηλότερη συγκέντρωση.
- **Ροή Αέριας Μάζας** (*advective flow*), εξαρτάται από τις διαφορές πιέσεων στο εσωτερικό του εδάφους με αποτέλεσμα το ραδόνιο που εμπεριέχεται στις μάζες αυτές να κινείται προς περιοχές με χαμηλή πίεση. Έτσι, λοιπόν, η έξοδος του ^{222}Rn από το έδαφος ολοκληρώνεται σε δύο φάσεις, με την απορροή και την εκροή (**Κασινάλης, 2008**).

Ο ρυθμός διαφυγής του ραδονίου μπορεί να επηρεαστεί από τη βαρομετρική πίεση, το ύψος της βροχόπτωσης και την υγρασία, τη θερμοκρασία και τον άνεμο. Ειδικότερα, η υγρασία μπορεί να επηρεάσει τόσο θετικά όσο και αρνητικά τον ρυθμό διαφυγής του ραδονίου. Η ύπαρξη νερού στους πόρους μειώνει τη διάχυση του αερίου ραδονίου, αυξάνει όμως την πιθανότητα το ανακρουόμενο άτομο ραδονίου να παραμείνει στους πόρους και να μην εισέλθει σε νέο κόκκο.

Η συγκέντρωση ^{222}Ra στο έδαφος κυμαίνεται παγκοσμίως μεταξύ 10 και 50 Bq kg^{-1} . Μπορεί να φθάσει και σε αρκετές εκατοντάδες Bq.kg^{-1} μέση συγκέντρωση παγκόσμια είναι 40 Bq.kg^{-1} (UNSCEAR, 1993).

1.4. Επιπτώσεις στην υγεία

Ο άνθρωπος εκτίθεται κατά μέσο όρο σε ετήσια δόση ακτινοβολίας ίση με 2.5 mSv. Το 87% από αυτό το ποσό εκλύεται από φυσικές πηγές το, 12% οφείλεται σε ιατρικές εφαρμογές και το υπόλοιπο ποσοστό αφορά ακτινοβολία που σχετίζεται με ειδικά επαγγέλματα και τεχνητές πηγές ακτινοβολίας (Ates et al 2013). Παρά τη σχετικά μεγάλη ενέργεια που σχετίζεται με την έκλυση ενός σωματιδίου α από το Rn222 το ραδόνιο δεν αποτελεί τόσο σημαντικό κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία όσο τα θυγατρικά του ραδονίου. Τα τέσσερα θυγατρικά του ραδονίου (218Po, 214Pb, 214Bi, και 214Po) σε αντίθεση με το ραδόνιο έχουν μικρό χρόνο ημιζωής και εκπέμπουν σωματίδια α με σχετικά υψηλή ενέργεια και σωματίδια β με σχετικά χαμηλή ενέργεια. Καθένα από τα παραπάνω βασικά θυγατρικά είναι αρκετά ενεργά, με αποτέλεσμα να επικάθονται στον πνεύμονα και να αυξάνεται η ικανότητα του να απορροφώνται σε σωματίδια καπνού και σκόνης. Ο κίνδυνος καρκίνου του πνεύμονα αυξάνεται από την παρουσία σωματιδίων καπνού και σκόνης καθώς τα μεταλλικά και μεταλλοειδή θυγατρικά του ραδονίου αντιδρούν με ευκολία με αυτά τα σωματίδια, τα οποία στη συνέχεια μπορούν να εισπνευσθούν με ευκολία (Malcom S. Field, 2007).

2. ΜΕΤΡΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ

2.1 Ταξινόμηση μεθόδων μέτρησης του ραδονίου.

Όλες οι τεχνικές ανίχνευσης του ραδονίου που χρησιμοποιούνται βασίζονται στην ανίχνευση και καταγραφή της ραδιενεργούς ενέργειας, ταξινομούνται όμως με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τα αέρια που ανιχνεύονται (ραδόνιο ή θυγατρικά του), τον απαιτούμενο χρόνο μέτρησης και τις απαιτήσεις τους για τροφοδοσία ενέργειας.

2.1.1 Ταξινόμηση μεθόδων σε άμεσες και έμμεσες.

Άμεση ανίχνευση των ραδιοϊσοτόπων του ραδονίου.

Στη φύση απαντώνται τρία ραδιοϊσότοπα του ραδονίου, τα ^{222}Rn , ^{220}Rn (θωρόνιο) και ^{219}Rn . Συχνά σε μετρήσεις ραδονίου το ποσοστό του θωρόνιου ^{220}Rn θεωρείται αμελητέο, αν και η υιοθέτηση της παραδοχής αυτής μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση της συγκέντρωσης του ραδονίου ^{222}Rn σε έναν χώρο σύμφωνα με σχετικά πρόσφατες εργασίες [Nikezić and Yu, (1998)]. Για το διαχωρισμό της μέτρησης των συγκεντρώσεων του ραδονίου από το θωρόνιο, αξιοποιείται πειραματικά ο μικρός χρόνος ημιζώης του δεύτερου ισοτόπου. Ως παράδειγμα αναφέρεται η ευρεία πειραματική χρήση ηθμών διαμέσου των οποίων διέρχονται τα ισότοπα ^{222}Rn και ^{220}Rn πριν φθάσουν στην περιοχή ανίχνευσης. ([Fleischer, 1977], [Ward, 1977], [Ramachandran et al., 1987], [Nikalaev and Ilic, 1999], [Fleischer et al., 2000], [Sharaf and Abo-Elmagd, 2005]). Η μέτρηση της συγκέντρωσης του ^{222}Rn , δίχως την παρουσία του ^{220}Rn , είναι δυνατή με άμεσο πειραματικό τρόπο. Δεν ισχύει το ίδιο και στην περίπτωση προσδιορισμού της συγκέντρωσης του ^{220}Rn . Κάθε προσπάθεια αποκλεισμού από τον χώρο μέτρησης ενός ανιχνευτικού συστήματος του ^{222}Rn έχει ως αποτέλεσμα τον ταυτόχρονο αποκλεισμό του ^{220}Rn . Έτσι, η απευθείας πειραματική μέτρηση του ^{220}Rn είναι πολύ δυσκολότερη. Συνήθως πραγματοποιείται έμμεση

εκτίμηση της συγκέντρωσής του. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος είναι η τοποθέτηση δύο ανιχνευτικών συστημάτων στον προς μέτρηση χώρο. Το ένα θα επιτρέπει την ανίχνευση και των δύο ραδιοϊσοτόπων, ενώ το δεύτερο θα αποκλείει τη μέτρηση του ^{220}Rn . Από τη διαφορά των μετρήσεων στα δυο συστήματα προκύπτει έμμεση μέτρηση της συγκέντρωσης του ^{220}Rn (Πατήρης, 2009).

Έμμεση ανίχνευση των ραδιοϊσοτόπων του ραδονίου.

Ο άμεσος πειραματικός προσδιορισμός της συγκέντρωσης των ραδιοϊσοτόπων του ραδονίου επιτυγχάνεται εύκολα μόνο για το ^{222}Rn . Επίσης, είναι δυνατή η έμμεση εκτίμηση της συγκέντρωσης ραδιενέργειας τόσο του ^{222}Rn όσο και του ^{220}Rn . Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στην άμεση μέτρηση και την εκτίμηση των συγκεντρώσεων των θυγατρικών τους προϊόντων. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ο έμμεσος προσδιορισμός των συγκεντρώσεων των μητρικών ισοτόπων ^{222}Rn και ^{220}Rn . Η συνηθέστερη μέθοδος στηρίζεται στη συλλογή και προσρόφηση των θυγατρικών προϊόντων του ραδονίου σε ειδικούς ηθμούς. Διαμέσου των ηθμών αυτών διοχετεύονται με μηχανικό τρόπο ποσότητες αέρα. Κατά τη διέλευσή τους κατακρατείται από τους ηθμούς ένα ποσοστό των θυγατρικών προϊόντων. Στη συνέχεια, η ραδιενέργεια των ηθμών καταμετράται συνήθως με ανιχνευτικά συστήματα ακτινοβολίας άλφα ή γάμα και προσδιορίζεται έμμεσα η συγκέντρωση του μητρικού ραδονίου καθώς και η αναλογία μεταξύ των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του. Μία ακόμη μέθοδος έμμεσου προσδιορισμού συγκεκριμένα του ^{220}Rn στηρίζεται στον πολύ μικρό χρόνο ημιζωής του πρώτου θυγατρικού του ισοτόπου του ^{216}Po . Το πολώνιο ^{216}Po έχει χρόνο ημιζωής μόλις 145ms και μεταστοιχειώνεται σε μόλυβδο ^{212}Pb εκπέμποντας σωματίδια άλφα, ενέργειας 6.78 MeV . Στη μέθοδο αυτή [Limoto and Kurosawa, 1996] χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της ακτινοβολίας άλφα των ^{220}Rn και ^{216}Po οι κυψελίδες σπινθηρισμών (scintillation cells) (Πατήρης, 2009).

2.1.2 Ταξινόμηση βάσει του απαιτούμενου χρόνου μέτρησης

Μέθοδοι αρπαγής (grab sampling): Στις τεχνικές της συγκεκριμένης κατηγορίας που ονομάζονται και μέθοδοι στιγμιαίας δειγματοληψίας, λαμβάνεται σχετικά μικρός όγκος αέρα ($250 - 1000\text{ cm}^3$), ο οποίος οδηγείται σε έναν ενεργητικό

ανιχνευτή, όπου και μετριέται (Νικολόπουλος, 2000). Το χρονικό διάστημα συλλογής του αέρα συνήθως κυμαίνεται από μερικά λεπτά έως κάποιες ώρες. Η ανιχνευόμενη ραδιενέργεια αντιπροσωπεύει τη μέση συγκέντρωση των ραδιοϊσοτόπων του αέρα κατά τη στιγμή της συλλογής του και ελαχιστοποιώντας το διάστημα δειγματοληψίας, η τιμή αυτή πρακτικά αντιστοιχεί στην τιμή της συγκέντρωσης του ραδονίου κατά τη στιγμή έναρξης της μέτρησης. *Οι συγκεκριμένες μέθοδοι χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται μία γρήγορη εκτίμηση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας, όπως επίσης και στην περίπτωση που ενδιαφέρει η χρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεων σε έναν χώρο. Η συλλογή του αέριου δείγματος γίνεται συνήθως με ηθμούς και στη συνέχεια η ραδιενέργεια των ηθμών καταμετράται με κατάλληλα ανιχνευτικά συστήματα ακτινοβολίας άλφα ή γάμα και προσδιορίζονται οι συγκεντρώσεις των ραδιοϊσοτόπων με φασματοσκοπικές ή μη τεχνικές. Στις περισσότερες περιπτώσεις τόσο το σύστημα συλλογής (κυρίως αντλίες αέρα) όσο και το σύστημα ανίχνευσης και καταγραφής των δεδομένων (συνήθως ανιχνευτές αερίου ή ημιαγωγών) απαιτούν ηλεκτρική τροφοδοσία (Πατήρης, 2009). Με τις μεθόδους δειγματοληψίας μπορεί να γίνει άμεσος, αλλά και έμμεσος προσδιορισμός της συγκέντρωσης του ραδονίου. Απαραίτητη προϋπόθεση για τον έμμεσο προσδιορισμό είναι η επίτευξη ισορροπίας μεταξύ του ραδονίου και των θυγατρικών του (Baskaran, 2016).*

Μέθοδοι συνεχούς καταγραφής (continuous measurements): Πρόκειται για μεθόδους που ανιχνεύουν και καταγράφουν ανά τακτά χρονικά διαστήματα τη συγκέντρωση ραδιενέργειας σε ένα χώρο. Οι διαδικασίες τόσο της μέτρησης όσο και της καταγραφής είναι συνήθως πλήρως αυτοματοποιημένες. Αν και η διάρκεια καταγραφής αφορά μεγάλα χρονικά διαστήματα (εβδομάδων ή μηνών), καθεμία από τις επιμέρους μετρήσεις πραγματοποιείται σε μικρό χρονικό διάστημα συνήθως των λίγων λεπτών. Για το λόγο αυτό οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται (συνήθως ανιχνευτές αερίου) έχουν την ικανότητα να καταγράφουν γρήγορα τις συγκεντρώσεις ραδιενέργειας. Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η χρονική διακύμανση των συγκεντρώσεων ραδιενέργειας αποτελεί το αντικείμενο μελέτης, ή όταν πραγματοποιούνται συσχετίσεις με μεγέθη που μεταβάλλονται συνέχεια με το χρόνο (π.χ. υγρασία, θερμοκρασία, ρυθμός έκλυσης ραδονίου κ.λπ.). Και στις μεθόδους αυτές τα χρησιμοποιούμενα συστήματα απαιτούν τροφοδοσία είτε από εξωτερική είτε από εσωτερική πηγή ενέργειας (Πατήρης, 2009).

Μέθοδοι χρονικά ολοκληρωμένων μετρήσεων (time-integrated measurements): Πρόκειται για μεθόδους που χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση της μέσης τιμής της συγκέντρωσης ραδιενέργειας σε ένα χώρο στη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος. Ο χρόνος έκθεσης μπορεί να κυμαίνεται από λίγες ημέρες έως αρκετούς μήνες. Οι μέθοδοι αυτές εφαρμόζονται για την εκτίμηση της μέσης ραδιενεργού έκθεσης και έτσι χρησιμοποιούνται ευρέως για υπολογισμούς δοσιμετρίας. Από τα πιο διαδεδομένα ανιχνευτικά μέσα είναι: οι ανιχνευτές πυρηνικών ιχνών (nuclear tracks detectors), οι ανιχνευτές ενεργού άνθρακα (activated carbon), οι ανιχνευτές θερμό - φωταύγειας (thermo-luminance detectors), οι κυψελίδες σπινθηρισμών (scintillation cells) και οι ανιχνευτές φορτισμένων επιφανειών (charged electrets). Αν και η λειτουργία τους διαφέρει σημαντικά ο τρόπος χρήσης τους είναι παρόμοιος. Το ανιχνευτικό σύστημα αφήνεται για ένα χρονικό διάστημα στο χώρο μέτρησης, χωρίς να απαιτείται τροφοδοσία του. Μετά το πέρας της έκθεσης εκτιμάται με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών η μέση τιμή της συγκέντρωσης του ραδονίου ή (και) των θυγατρικών του στο χώρο (Πατήρης, 2009).

2.1.3 Ταξινόμηση βάσει των απαιτήσεων τροφοδοσίας

Σύμφωνα με το κριτήριο της τροφοδοσίας οι μέθοδοι ανίχνευσης διακρίνονται σε:

Ενεργές μεθόδους (active methods): Οι μέθοδοι αυτοί χρησιμοποιούν ανιχνευτικά συστήματα, τα οποία απαιτούν τροφοδοσία ενέργειας για την λειτουργία τους. Οι κυριότερες μέθοδοι είναι: α) Οι θάλαμοι σπινθηρισμών, β) Οι θάλαμοι ιοντισμού, γ) Οι θάλαμοι ημιαγώγιμων υλικών.

Παθητικές μεθόδους (passive methods): Πρόκειται για μεθόδους, η λειτουργία των οποίων δεν απαιτεί τροφοδοσία ενέργειας. Οι κυριότερες παθητικοί μέθοδοι είναι οι: α) ανιχνευτές καταγραφής ιχνών, β) ανιχνευτές ενεργοποιημένου ξυλάνθρακα και γ) ανιχνευτές ηλεκτρίσιμων υλικών (Νικολόπουλος, 2000).

2.2 Παρουσίαση των σημαντικότερων μεθόδων

Θάλαμοι σπινθηρισμού: Η μέθοδος των θαλάμων σπινθηρισμού είναι μία από τις παλαιότερες και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη για συλλογή δείγματος του ραδονίου και προϊόντων της διάσπασης του στο πεδίο. Οι θάλαμοι σπινθηρισμού ποικίλλουν σε μέγεθος από 0,09 έως 3,0 λίτρα και κατασκευάζονται από μεταλλικά, γυάλινα ή πλαστικά δοχεία επενδυμένα εσωτερικά από ενεργοποιημένη σκόνη ZnS(Ag). Ο κυλινδρικός πάτος του δοχείου είναι συνήθως διαφανής για να επιτρέπει την ανίχνευση των φωτονίων που παράγονται στον σπινθηριστή. Αν η εσωτερική επίστρωση είναι αρκετά λεπτή, ο πάτος του δοχείου μπορεί επίσης να επικαλυφθεί χωρίς σημαντική απώλεια φωτονίων. Για τη μέτρηση των φωτονίων, ο θάλαμος σπινθηρισμού συνδυάζεται με μια διάταξη φωτοπολλαπλασιαστή. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου ανίχνευσης είναι η μέτρηση του αριθμού των φωτονίων που παράγονται από την αλληλεπίδραση των σωματιδίων ραδονίου και των προϊόντων της διάσπασής του με τον ZnS(Ag). Σφάλματα μετρήσεων κατά τη χρήση θαλάμων σπινθηρισμού μπορούν να προέλθουν από λανθασμένη βαθμονόμηση, διαρροή στον θάλαμο και βλάβη ή εσφαλμένη βαθμονόμηση της διάταξης του φωτοπολλαπλασιαστή (Παπαστεφάνου, 2007).



Εικόνα 2.1: Ενεργητικός ανιχνευτής Alpha GUARD (Κασινάλης, 2008).

Παθητικές ενσωματωμένες μέθοδοι μέτρησης ραδονίου με ανιχνευτές πυρηνικών ιχνών (SSNTDs): Η αρχή του εντοπισμού του ραδονίου από ανιχνευτές πυρηνικών

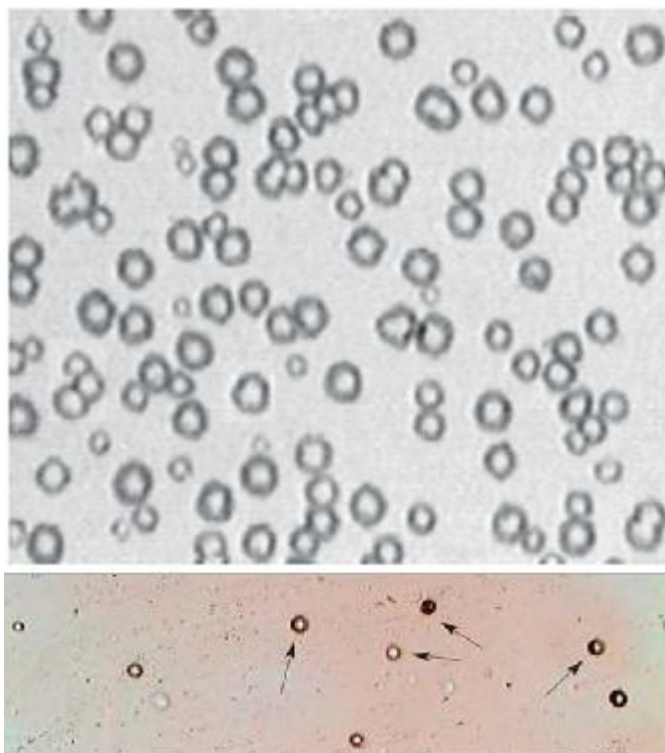
ιχνών βασίζεται στην παραγωγή μόνιμων ιχνών από τα σωματίδια άλφα σε πολυμερή υλικά. Τα πιο συνηθισμένα από αυτά τα υλικά είναι τα πολυμερή LR-115, CR-39, το Makrofoil και το SR-86 (Νικολόπουλος, 2000).



Εικόνα 2.2: Παθητικοί ανιχνευτές καταγραφής ιχνών και ενεργοποιημένου άνθρακα (Ε.Ε.Α.Ε, 2005).

Ο πλαστικός ανιχνευτής τοποθετείται συνήθως σε κυλινδρικό σωλήνα εσωτερικής διαμέτρου 44mm, εξωτερικής διαμέτρου 50 mm και μήκους 300mm. Ο ανιχνευτής τοποθετείται στο άνω μέρος του σωλήνα και συγκρατείται από έναν συρμάτινο συνδετήρα. Αυτή η διάταξη εμποδίζει τα θυγατρικά του ραδονίου και το Rn220 να εισέλθουν στον θάλαμο του ανιχνευτή και έτσι καταγράφονται ίχνη μόνο από το Rn222 που διαχέεται στον θάλαμο. (Carlos Sainz et al, 2007). Ο πλαστικός σωλήνας μαζί με τον πλαστικό ανιχνευτή τοποθετείται εντός ενός μεγαλύτερου σωλήνα ύψους 1000mm και εσωτερικής διαμέτρου 70mm. Ο κενός χώρος μεταξύ των σωλήνων πληρώνεται με σφαιρικούς κόκκους αφρού πολυεστερίνης για να απομονώσει θερμικά τον θάλαμο του ανιχνευτή. Για την αποφυγή της επίδρασης της υγρασίας στις καταγραφές των σωματιδίων άλφα στην επιφάνεια του ανιχνευτή (Papastefanou

et al., 2002), ένα φίλτρο από γυάλινη ίνα τοποθετείται μπροστά από τον πλαστικό ανιχνευτή, το οποίο επίσης εμποδίζει τα σωματίδια άλφα που προέρχονται από τα προϊόντα διάσπασης του ραδονίου να φτάσουν στην επιφάνεια του ανιχνευτή. Τα σωματίδια άλφα που παράγονται από ραδόνιο εντός του όγκου του εσωτερικού σωλήνα (θαλάμου) ακτινοβολούν προς τον πλαστικό ανιχνευτή και παράγουν ίχνη. Μετά από έκθεση 7 έως 9 ημερών τα ίχνη γίνονται ορατά μετά από χημική ή ηλεκτροχημική διέγερση, συνήθως σε διάλυμα NaOH ή KOH . Η ηλεκτροχημική διέγερση είναι προτιμότερη επειδή παράγει ίχνη μεγάλης διαμέτρου και απλοποιεί την διαδικασία μέτρησης. Η πυκνότητα των ιχνών καθορίζεται είτε από απευθείας οπτικό έλεγχο και καταμέτρηση (jumping spark counter) ή από αυτόματο οπτικό σύστημα σάρωσης (αναλυτή οπτικής εικόνας) (Παπαστεφάνου, 2007).



Εικόνα 2.3: Τυπική εικόνα ιχνών διασπάσεων ραδονίου σε ανιχνευτή CR-39.
[Link:3]

Η ευαισθησία των ανιχνευτών ιχνών σωματιδίων άλφα κυμαίνεται από 0,03 (για τον LR-115) έως 0,09 (για τον CR39) ίχνη ανά cm^{-2} ανά Bq ανά m^3 . Το μικρότερο όριο ανίχνευσης είναι από 2 μέχρι 8 Bq/ m^3 ανάλογα με το μέγεθος της περιοχής του ανιχνευτή που σαρώνεται. Μερικοί παράγοντες που επηρεάζουν της απόδοση αυτών των ανιχνευτών είναι η μεταβλητότητα της απόκρισης διαφορετικών παρτίδων και από ανομοιόμορφη επίδραση των προϊόντων της διάσπασης του ραδονίου εντός του σωλήνα (του δοχείου ή θαλάμου). Εξαιτίας της μεταβλητότητας των ανιχνευτών ιχνών σωματιδίων άλφα π.χ. του πάχους του πλαστικού, του ιστορικού απόκτησης του και τη θερμοκρασία κατά την προετοιμασία απαιτείται αυστηρός ποιοτικός έλεγχος προϊόντος. Επίσης, πρέπει να λαμβάνονται μέτρα διασφάλισης ποιότητας των μετρήσεων που περιλαμβάνουν συχνή βαθμονόμηση και αναπαραγωγή των συνθηκών έκθεσης για εκτίμηση της ακρίβειας. Σε έρευνες που απαιτείται ο προσδιορισμός του συντελεστή ισορροπίας F χρησιμοποιούνται 2 διατάξεις ανιχνευτών, ανιχνευτές τοποθετημένοι σε πλαστικό σωλήνα που καλύπτεται με φίλτρο χαρτιού, ώστε να εμποδίζεται η μέτρηση των θυγατρικών και ανιχνευτές «ανοιχτού τύπου» που καταγράφουν την ενέργεια των βραχύβιων σωματιδίων α από τα θυγατρικά Po218 και Po214. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να έχουμε καλύτερη εκτίμηση της ενεργής δόσης (Radolić et al) (Παπαστεφάνου, 2007).

Ανιχνευτές Barasol: Οι ανιχνευτές Barasol πραγματοποιούν στατικές σε αέριο δείγμα ραδονίου (Abbad et al., 1995, Pinault and Baubron, 1996, Trique et al., 1999). Οι μετρήσεις παρέχονται από έναν ανιχνευτή πυριτίου, ο οποίος καταγράφει τις εκπομπές των σωματιδίων άλφα του υπάρχοντος ραδονίου σε έναν βελτιστοποιημένο θάλαμο μετρήσεων. Οι διαστάσεις του θαλάμου είναι 60mm διάμετρος, 570mm μήκος και 0,7m με 0,8m βάθος. Ο ανιχνευτής αθροίζει τις εκπομπές των σωματιδίων άλφα που παράγονται σε προκαθορισμένα διαστήματα από 15 έως 240 λεπτά. Ένας μικροεπεξεργαστής χρησιμοποιείται για να αποθηκεύσει τις μετρούμενες τιμές. Οι μετρήσεις λαμβάνονται απευθείας από την οθόνη του οργάνου ή με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή (Παπαστεφάνου, 2007).

Ανιχνευτής Clipperton: Η συνεχής μέτρηση της συγκέντρωσης του ραδονίου σε

υπόγεια νερά γίνεται με τη χρήση μίας αυτόματης ηλεκτρονικής ράβδου που ονομάζεται ανιχνευτής Clipperton (CNRSURA 1767, Universite Montpellier II, F-34095 Montpellier, France) (Pane et al., 1995). Βασίζεται σε έναν ανιχνευτή διόδου πυριτίου σε συνδυασμό με μια ηλεκτρονική μονάδα επεξεργασίας και αποθήκευσης δεδομένων χαμηλής κατανάλωσης (επαρκής χρήση για 6 μήνες με χρήση 4 αλκαλικών μπαταριών LR20). Η ράβδος αποτελείται από μία σωλήνα διαμέτρου 5cm και μήκους 50cm που περιέχει τον ανιχνευτή μαζί με έναν προενισχυτή, έναν ενισχυτή και μία μονάδα διαχωρισμού, επεξεργασίας και αποθήκευσης δεδομένων. Η δίοδος και τα ηλεκτρονικά κυκλώματα έχουν ειδική προστασία από την υγρασία. Ο σωλήνας είναι εξοπλισμένη με μία μεμβράνη διάθλασης στο άνοιγμα της ώστε να αποφεύγεται η συνεισφορά του θορίου στις μετρήσεις και η υγραποίηση πάνω στη δίοδο. Οι μπαταρίες τοποθετούνται σε εξωτερική αδιάβροχη θήκη. Η ευαισθησία του μετρητή είναι 1 μέτρηση $h^{-1} = 362 \text{ Bq} \cdot m^{-3}$. Η περίοδος μέτρησης μπορεί να ρυθμιστεί από τον χειριστή του οργάνου από 1 λεπτό έως 48 ώρες (Παπαστεφάνου, 2007).

Ανιχνευτής ραδονίου/θορίου: Ο ανιχνευτής ραδονίου/θορίου (SARAD GmbH, Wiesbadener Str. 20, D-01159 Dresden, Germany) είναι ένα μικροσύστημα μέτρησης ραδονίου και θορίου σε εδαφικά αέρια και υπόγεια ύδατα. Το σύστημα του μετρητή ραδονίου/θορίου αποτελείται από έναν μετρητικό θάλαμο όπου τα ηλεκτροστατικά κύματα από τα προϊόντα διάσπασης του ραδονίου/θορίου καταγράφονται από το αισθητήριο όργανο. Η λειτουργία του μετρητή είναι συνεχής και μεταβλητή από 1 λεπτό έως 24 ώρες. Το μετρητικό όργανο αντλεί αέριο από το έδαφος με ροή από 0,4 έως 3 λίτρα ανά λεπτό, το οποίο διαχέει στη μετρητική διάταξη, όπου συλλέγονται τα προϊόντα διάσπασης του ραδονίου και του θορίου σε ένα έλασμα άνωθεν ενός ανιχνευτή πυριτίου. Στη συνέχεια, αναλύει τη χρονική εξάρτηση και τα σπεκτρομετρικά δεδομένα των συγκεντρώσεων των προϊόντων διάσπασης του ραδονίου και του θορίου. Τα διαστήματα μέτρησης επιλέγονται από ένα λεπτό μέχρι 24 ώρες με τυπική επιλογή τα 6 λεπτά. Ο όγκος ευαισθησίας του μετρητή είναι 0,27 λίτρα και η ευαισθησία του από 0.01 cpm ανά Bq/m^3 . Το σύστημα ανίχνευσης/παρακολούθησης μπορεί να καταγράψει συγκεκριμένες δραστηριότητες των ευγενών αερίων ^{222}Rn και ^{220}Rn σε εδαφικά αέρια, σε συνεχόμενα ή διακεκομμένα χρονικά διαστήματα (Παπαστεφάνου, 2007).

Ανιχνευτές ενεργοποιημένου ξυλάνθρακα: Η προσρόφηση του ραδονίου από

ενεργοποιημένο ξυλάνθρακα χρησιμοποιείται εδώ και αρκετά χρόνια ως τεχνική μέτρησης ραδονίου. Για τη μέτρηση του ραδονίου στον αέρα, κατάλληλη ποσότητα ενεργοποιημένου άνθρακα κλείνεται σε επίπεδο μεταλλικό δοχείο όγκου περίπου 400cm^3 . Η διάταξη που δημιουργείται καλείται κάνιστρο άνθρακα (charcoal canister). Κατά τη διάρκεια της έκθεσης, το ραδόνιο προσροφάται στην επιφάνεια του ενεργοποιημένου ξυλάνθρακα. Ο ρυθμός προσρόφησης του ραδονίου είναι ανάλογος της συγκέντρωσης του τελευταίου στην ατμόσφαιρα και του χρόνου έκθεσης. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι ο ολοκληρωτικός της χρόνος περιορίζεται σε μερικές μόνο ημέρες διότι ο ξυλάνθρακας προσροφά υγρασία, η οποία τον εμποδίζει να προσροφήσει επιπλέον ραδόνιο (Νικολόπουλος, 2000). Συγκεκριμένα έχει υπολογιστεί ότι σε υγρασία 90% στους 20°C προκύπτει μείωση της ευαισθησίας των ανιχνευτών κατά 15% για περίοδο δειγματοληψίας 24 ωρών. (Iomoto et al., 2004)

Ανιχνευτές electret

Το electrets είναι ένα κομμάτι διηλεκτρικού υλικού, το οποίο, αν δεν υποστεί κάποια μεταβολή, παρουσιάζει σχετικά μόνιμο φορτίο δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό ένα ισχυρό ηλεκτροστατικό πεδίο. Το εν λόγω υλικό τοποθετείται μέσα σε ένα κατάλληλα κατασκευασμένο δοχείο που ανοιγοκλείνει με τη βοήθεια ενός περιστροφικού πώματος. Έτσι, όταν το πώμα είναι ανοιχτό το ραδόνιο εισέρχεται στον ανιχνευτή, ενώ όταν κλείνει παύει πλέον να εισέρχεται. Το ραδόνιο διασπώμενο, ιονίζει τον αέρα μέσα στο δοχείο και παράγει ιόντα τα οποία χτυπούν την επιφάνεια του διηλεκτρικού υλικού μεταβάλλοντας το φορτίο του. Η μεταβολή του δυναμικού στον χρόνο μέτρησης, μέσω κατάλληλων υπολογισμών, δίνει την συγκέντρωση του ραδονίου (Κοντάκου 2011).



Εικόνα 2.4: Ανιχνευτής Electret (E-PERM) (Κοντάκου, 2011)

3. ΡΑΔΟΝΙΟ ΣΕ ΣΠΗΛΑΙΑ

3.1 Δημιουργία των σπηλαίων

Τα κατ' εξοχήν πετρώματα μέσα στα οποία δημιουργούνται το 95% των σπηλαίων είναι τα ανθρακικά. Μπορούν γενικά να γίνουν τουλάχιστον τρεις διακρίσεις ανθρακικών πετρωμάτων, που αφορούν (Ανδρεαδάκης 2003):

- **Τη σύστασή τους.** Μπορεί να γίνει διάκριση ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής και το μέγεθος των κόκκων ανθρακικών και μη ανθρακικών υλικών (αργιλικών και μη) και ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής του μαγνησίου (και συνεπώς την παρουσία δολομίτη) στο πέτρωμα. Η συμμετοχή των κλαστών στο πέτρωμα έχει επίδραση στο πρωτογενές πορώδες του, αλλά και στην επιδεκτικότητά του στη χημική προσβολή, όπως και στη μηχανική αποσάθρωση, που συνδυάζονται μεταξύ τους κατά την καρστικοποίηση.
- **Τη γενετική τους προέλευση.** Μπορεί να γίνει διάκριση μεταξύ των ίδιων των ανθρακικών ανάλογα με την οργανική ή ανόργανη προέλευσή τους, ανάλογα με τη φύση και τον τύπο των βιογενών συστατικών, ή ανάλογα με τις διεργασίες

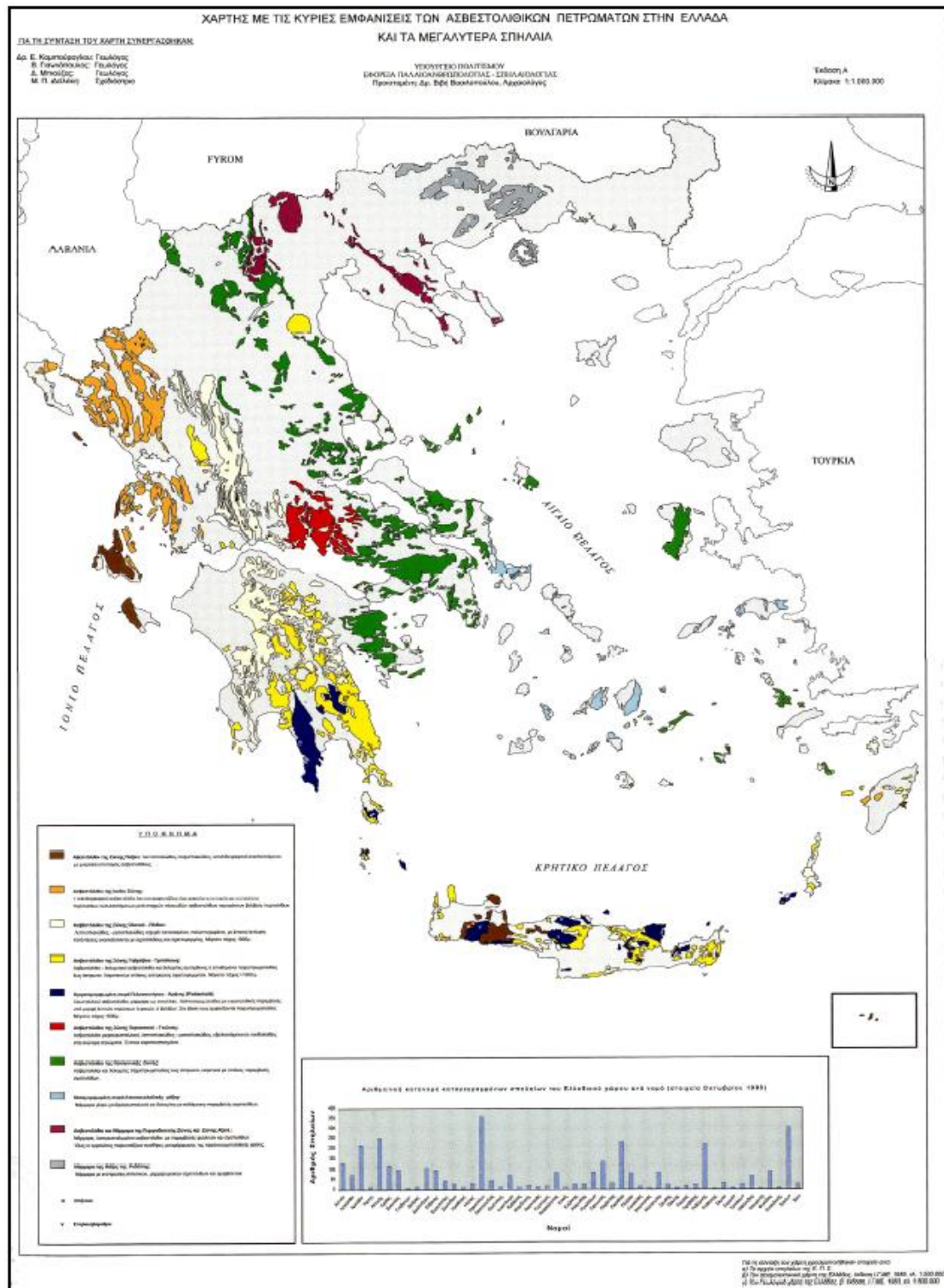
που έχουν υποστεί (ιζηματολογικές, επιγενετικές, μεταμορφικές). Η μεταμόρφωση, η δολομιτίωση, οι ιζηματοδομές κ.λπ. έχουν επίδραση στα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος, και κατά συνέπεια στην αντοχή του, αλλά και στη χημική του συμπεριφορά.

- **Τη στρωματογραφία τους.** Η ηλικία και η φάση που αντιστοιχούν και σε συγκεκριμένο γεωτεκτονικό, κλιματικό και βιολογικό περιβάλλον απόθεσης είναι χαρακτηριστικές και καθοριστικές κάθε ανθρακικού πετρώματος. Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι υποστηρίζεται από διάφορους ερευνητές, ότι οι αρχικές προτιμητέες επιφάνειες κυκλοφορίας του νερού σε ένα ανθρακικό πέτρωμα σχετίζονται με στρωματογραφικά χαρακτηριστικά, όπως μια μικρή αλλαγή στη σύσταση του ιζήματος, επιφάνειες στρώσης κ.λπ., και σχηματίζονται διακριτά στρωματογραφικά επίπεδα καρστικοποίησης σε συγκεκριμένους ορίζοντες του πετρώματος.

Με βάση το περιεχόμενό τους στο ορυκτό δολομίτη, τα ανθρακικά πετρώματα διακρίνονται σε:

- Ασβεστόλιθους (0-10% δολομίτης)
- Δολομιτικούς ασβεστόλιθους (10-50% δολομίτης)
- Ασβεστιτικούς δολομίτες (50-90% δολομίτης)
- Δολομίτες (90-100% δολομίτης)

Στον ελληνικό χώρο υπάρχει μια πληθώρα ασβεστολιθικών σχηματισμών διαφόρου ηλικίας και προέλευσης που φιλοξενούν εκατοντάδες μικρά και μεγάλα σπήλαια (Εικ. 3.1). Όπως φαίνεται και από την κατανομή των μεγαλύτερων σπηλαίων ανά νομό στους τέσσερις νομούς της Κρήτης εμφανίζεται ο μεγαλύτερος αριθμός σπηλαίων στην Ελλάδα.



Εικ. 3.1 Κατανομή των ασβεστολιθικών σχηματισμών και των μεγαλύτερων σπηλαιών στον ελλαδικό χώρο (Ανδρεαδάκης 2003)

3.1.1 Αιτίες και μορφές σπηλαιογένεσης

Με τον όρο σπηλαιογένεση εννοείται 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. Ήδη από το 1726 άρχισαν να διατυπώνονται οι πρώτες σπηλαιογενετικές θεωρίες. Σκοπός όλων αυτών των θεωριών ήταν να δώσουν μια εξήγηση για τη γένεση και την εξέλιξη **κυρίως του καρστικού φαινομένου**. Μερικές από τις βασικότερες θεωρίες ανάπτυξης των σπηλαίων και κατ' επέκταση και της καρστικοποίησης είναι οι ακόλουθες:

Η θεωρία του A.C. Swinnerton (1932), σύμφωνα με την οποία η μέγιστη διάλυση λαμβάνει χώρα στο ύψος του υδροφόρου ορίζοντα ή ακριβώς κάτω απ' αυτόν (Γιαννόπουλος 2000).

Η θεωρία των δύο κύκλων του W. Davis (1930), σύμφωνα με την οποία οι βαθιές διαδρομές στη ζώνη κορεσμού είναι δυνατόν να δημιουργήσουν σπήλαια πολύ βαθύτερα ακόμη και από την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα (Γιαννόπουλος 2000).

Η θεωρία του A. Bogli (1964), σύμφωνα με την οποία η ύπαρξη μιας διάβρωσης από ανάμειξη υδάτων με διαφορετική διαλυτότητα για πρώτη φορά μας δίνει τη λύση στο πρόβλημα της δημιουργίας των σπηλαίων στον ασβεστόλιθο.

Η διάβρωση μπορεί να προέλθει επίσης από ανάμειξη δύο υδάτων με διαφορετική θερμοκρασία. Κατόπιν μετρήσεων, παρατηρήθηκε ότι η διαβρωτική ικανότητα σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ μικρότερη από την πρώτη (διαφορετική συγκέντρωση CO_2). Στην κορεσμένη ζώνη αυτό το φαινόμενο μπορεί να συμβάλει στην δημιουργία αρχικών αιθουσών. Στις ρωγμές που υπάρχει ροή νερού καθορίζεται μία σταθερά συγκεντρώσεως του CO_2 αντιθέτως ανάλογη από τη σταθερά της ταχύτητας. Όταν δημιουργούνται οι πρώτες αίθουσες, η ανάπτυξη του σπηλαίου συνεχίζεται λόγω της διάβρωσης από ανάμειξη (χημική) και λόγω της μηχανικής διάβρωσης (Γιαννόπουλος 2000).

Στην δεκαετία του '80, ο καθηγητής P. Forti διατυπώνει τις μοντέρνες θεωρίες σπηλαιογένεσης του καρστικού φαινομένου, κάνοντας έναν σπηλαιογενετικό

διαχωρισμό με βάση την στιγμή δημιουργίας του σπηλαίου σε σχέση με τη στιγμή δημιουργίας του περιβάλλοντος πετρώματος.

- 1) Πέτρωμα νεότερο του σπηλαίου - Σπήλαια σε Τραβερτίνη.
- 2) Πέτρωμα ίδιας ηλικίας με το σπήλαιο - Γαιώδες, ορισμένα σπήλαια σε λάβες.
- 3) Πέτρωμα παλαιότερο του σπηλαίου - Όλα τα άλλα σπήλαια.

Κατά τον ίδιο ερευνητή, όλες οι θεωρίες σπηλαιογένεσης βασίζονταν μόνο στο υδρολογικό φαινόμενο, το οποίο θεωρούσαν απαραίτητο και σημαντικό για τη δημιουργία και εξέλιξη των σπηλαίων. Αυτές οι θεωρίες προσπαθούσαν να εξηγήσουν όλα μαζί τα σπηλαιογενετικά φαινόμενα, με αποτέλεσμα να συγκρούονται πολλές φορές μεταξύ τους. Το υδρολογικό φαινόμενο, αν και σημαντικό, δεν ήταν όμως το μοναδικό και απαραίτητο για τη δημιουργία των σπηλαίων. Για να εξαχθούν τελικά συμπεράσματα για επιμέρους έστω μορφές σπηλαιογένεσης χρειάστηκε να γίνει ανάλυση των γενετικών μηχανισμών που κυρίως επιδρούν στην σπηλαιογένεση, και αυτοί δεν ήταν υδρολογικοί, αλλά κυρίως μηχανικοί και φυσικό-μηχανικοί (Γιαννόπουλος 2000).

Η δημιουργία των κενών ή η εναπόθεση των υλικών μπορεί να γίνει από μηχανική ή τεκτονική ενέργεια και μεταφορά ή από φυσικοχημική ενέργεια δηλ. διάβρωση, διάλυση και εναπόθεση. Όλοι οι άλλοι παράγοντες μαζί και ο υδρολογικός μπορούν να επιδράσουν στην εξέλιξη ή την ταχύτητα των μηχανικών ή φυσικοχημικών μηχανισμών. Για την καλύτερη κατανόηση των διαδικασιών σπηλαιογένεσης κρίνεται σκόπιμο να χωριστεί σε δύο στάδια. Στο στάδιο της γένεσης του εγκοίλου, που είναι η δημιουργία του πρώτου κενού, και στο στάδιο της εξέλιξης, κατά το οποίο το έγκοιλο παίρνει την "τελική" του μορφή.

Εκτός από τα σπήλαια σε λάβες και εκείνα σε πάγους, στις άλλες περιπτώσεις οι γενετικοί μηχανισμοί είναι σχεδόν πάντα μηχανικοί. Ειδικότερα, στα σπήλαια τεκτονικής προελεύσεως είναι μηχανικοί και οι μηχανισμοί εξέλιξης του σπηλαίου. Πράγματι, επειδή το πορώδες δεν είναι σημαντικό για τη διαπερατότητα του καρστικοποιημένου πετρώματος, οι γενετικοί μηχανισμοί οφείλονται κυρίως στη δομή των πετρωμάτων, λόγω του επικρατήσαντος τεκτονισμού.

Οι μηχανισμοί εξέλιξης των σπηλαίων, εκτός των τεκτονικών και αυτών που

προέρχονται από διάβρωση, οφείλονται κυρίως στη διάλυση του πετρώματος, είναι δηλαδή φυσικοχημικοί. Επειδή λοιπόν η μορφολογία ενός σπηλαίου εξαρτάται από τους μηχανισμούς της εξέλιξης του, οι νέες μελέτες και θεωρίες ασχολούνται με τους φυσικοχημικούς μηχανισμούς. Η πρώτη γενική κατάταξη των σπηλαιογενετικών μηχανισμών βασίστηκε στα φυσικοχημικά φαινόμενα. Με αυτόν τον τρόπο έγινε δυνατό να υποδιαιρεθούν οι διάφοροι σπηλαιογενετικοί μηχανισμοί ανάλογα με τον αριθμό των ελεύθερων συστατικών (παραμέτρων) που ενυπήρχαν την στιγμή που ο ίδιος μηχανισμός ήταν σε ισορροπία.

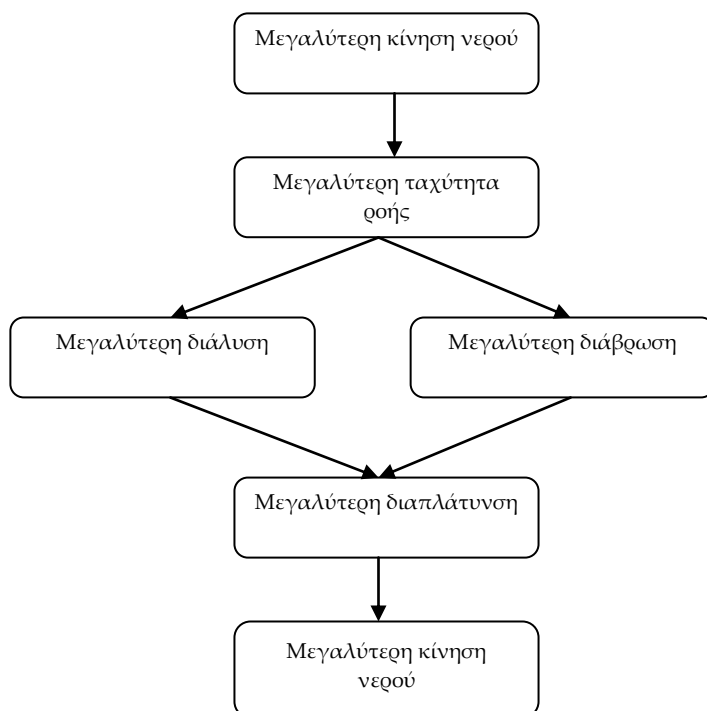
Όσο ακριβής και να είναι η περιγραφή ενός μηχανισμού σπηλαιογένεσης δεν μπορούμε να γνωρίζουμε τι θα συμβεί όταν σταματήσει η επίδραση του μηχανισμού. Δεν είναι δυνατόν να υπάρξουν ίδιες μορφολογίες με διαφορετικούς εξελικτικούς μηχανισμούς. Αντίθετα, βρίσκουμε διαφορετικές μορφολογίες που έχουν προέλθει από τον ίδιο εξελικτικό μηχανισμό. Σε γενικές γραμμές μια θεωρία δεν μπορεί να εξηγήσει όλα τα σπηλαιογενετικά φαινόμενα, δεδομένου ότι υπεισέρχονται παρά πολλοί παράγοντες διαφορετικής φύσης και οι οποίοι δεν είναι σταθεροί κατά την διάρκεια του χρόνου, επηρεάζοντας κατά ανώμαλο τρόπο την καρστική μορφογένεση.

Μερικοί από αυτούς τους παράγοντες είναι η ατμόσφαιρα, η επιφανειακή βλάστηση, το είδος του πετρώματος, το νερό κ.λπ. Στη φύση βεβαίως τα πράγματα είναι πολύ πιο πολύπλοκα, διότι εκτός από τους παράγοντες και τις μεταβολές τους κατά τη διάρκεια του χρόνου, υπάρχει και μια αλληλοεπίδραση μεταξύ τους, που κάνει όλη τη σπηλαιογενετική διαδικασία τρομερά πολύπλοκη. Κυριότερος από αυτούς τους παράγοντες είναι ο τεκτονισμός, όχι μόνο γιατί οι σπηλαιογενετικοί μηχανισμοί είναι κυρίως τεκτονικοί, αλλά διότι ο τεκτονισμός, άσχετα αν αρχικά το σπήλαιο έχει προέλθει από άλλους μηχανισμούς, επιδρά άμεσα στην εξέλιξη του. Η μορφή ενός σπηλαίου και η διεύθυνση του ακολουθούν και εξαρτώνται από τις τεκτονικές διαταραχές. Μετά από μελέτες ετών διαπιστώθηκε ότι η γεωγραφική θέση και γενικότερα το κλίμα, τόσο σε μεγάλη όσο και σε μικρή κλίμακα (μικροκλίμα) επιδρά άμεσα στη σπηλαιογένεση. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την σπηλαιογένεση είναι και η επιφανειακή βλάστηση. Το νερό ανάλογα με την βλάστηση συγκρατείται περισσότερο χρόνο με αποτέλεσμα να αλλάζει η δυναμική συμπεριφορά του (Γιαννόπουλος 2000).

Εκτός όμως από την υδροδυναμική μεταβολή, η βλάστηση επιδρά και στη γεωχημική.

Λόγω των φυτικών οργανισμών το H_2O εμπλουτίζεται CO_2 με αποτέλεσμα τη διάλυση του αμέσως υποκειμένου πετρώματος (βιοκαρστικό φαινόμενο) και σε συνέχεια την εναπόθεση κρυσταλλικού $CaCO_3$ σε μεγαλύτερο βάθος. Έχει διαπιστωθεί ότι στους υπόγειους χώρους εδαφών που έχουν απογυμνωθεί, εύκολα δημιουργούνται κυρίως σωληνοειδείς ομοκεντρικοί σταλακτίτες.

Πρωταρχικό ρόλο, εξάλλου, διαδραματίζει το νερό: Η επίδραση του είναι πολύ σημαντική στην εξέλιξη ενός σπηλαίου.



Στο παραπάνω σχεδιάγραμμα είναι εμφανής ο ρόλος της ποσότητας και της ταχύτητας του νερού στη διαπλάτυνση των καρστικών αγωγών. Η υδροδυναμική παίζει ρόλο και στη δημιουργία του τύπου των σταλακτιτών. Από την ταχύτητα της σταγονοροής εξαρτάται η δημιουργία "σταλακτιτών".

3.1.2 Καρστικές περιοχές

3.1.2.1 Χαρακτηριστικά

Η γνώση των χαρακτηριστικών, αλλά και των συνθηκών, που πρέπει να επικρατούν σε μια περιοχή προκειμένου να δημιουργηθεί το κάρστ είναι πολύ σημαντική και απαραίτητη για την περαιτέρω μελέτη αυτού του φαινομένου. Τα κυριότερα

χαρακτηριστικά μιας καρστικής περιοχής είναι οι κλειστές λεκάνες και τα λιγοστά επιφανειακά τρεχούμενα νερά. Τα νερά στις περιοχές αυτές κινούνται μέσω υπογείων αγωγών, των οποίων ο σχηματισμός έχει άμεση σχέση με τη διαλυτότητα του πετρώματος, την καθαρότητα αυτού καθώς και τη συνεκτικότητα του. Όλα αυτά συνθέτουν ένα τοπίο που χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη δολινών, καταβόθρων, βαράθρων. Σε προχωρημένες μορφές διάλυσης του πετρώματος παρατηρούνται απομονωμένα εναπομείναντα τεμάχια του αρχικού πετρώματος. Οι κυριότεροι παράγοντες που επιδρούν στην διαμόρφωση της καρστικής περιοχής είναι οι εξής: το κλίμα, η λιθολογία, η τεκτονική παραμόρφωση, το υψόμετρο (ανάγλυφο) και η ανθρωπογενής επίδραση (Ανδρεαδάκης 2003).

1.3.2.2 Ο όρος καρστ, μια περιεκτική έννοια

Ο όρος καρστ (karst) προέρχεται από το γεωγραφικό όνομα της βορειοδυτικής περιοχής της μεταπολεμικά ενιαίας Γιουγκοσλαβίας (σήμερα Σλοβενίας), κοντά στα Ιταλικά σύνορα, μεταξύ Ιστρία και Λιουμπλιάνα. Πάνω από 700 χρόνια πριν, οι κάτοικοι της περιοχής χρησιμοποιούσαν τη σλαβική λέξη karst και την ιταλική λέξη carso (ρωμαϊκή carsus). Και οι δυο εκφράσεις είναι ινδοευρωπαϊκής προέλευσης από τη λέξη kar, που σημαίνει πέτρα, βράχος. Η λέξη kras προέρχεται από τη λέξη kars, η οποία εκγερμανιζόμενη έγινε karst. Η λέξη kras αναφέρεται για πρώτη φορά γραμμένη στο νησί KrK. Η πρώτη γραπτή αναφορά στη λέξη karso χρονολογείται από το 1292, ενώ ο όρος karst αναφέρθηκε για πρώτη φορά σε αυστριακό κείμενο του 1423 (Ανδρεαδάκης 2003).

Σε πολλές περιοχές των Διναρικών Ορέων ο όρος krš χρησιμοποιούνταν συχνά από παλιά, και σήμερα αποτελεί λέξη της καθομιλουμένης εκεί, ενώ με την έννοια του karst για πρώτη φορά εμφανίστηκε εκεί το 1894. Σαν τεχνικός όρος έχει καθιερωθεί με πρωτοβουλία των σχολών Γεωγραφίας και Γεωλογίας της Βιέννης στην τότε αυτοκρατορία της Αυστροουγγαρίας από το μέσο του 19ου αιώνα, ενώ στην πορεία του χρόνου καθιερώθηκε και ως διεθνής τεχνικός όρος. Ανάλογη έννοια με αυτήν του karst είναι αυτή της καρστικοποίησης (karstification), που δείχνει το σύνολο των γεωλογικών διεργασιών που καταστρέφουν ευδιάλυτα πετρώματα, δημιουργώντας έτσι μοναδικά μορφολογικά χαρακτηριστικά, ειδικό τύπο πορώδους, ή συγκεκριμένο υδρογεωλογικό περιβάλλον (Milanovic, 1981).

Η λέξη καρστ είναι ένας όρος που ενσωματώνει πλήθος γεωλογικών, μορφολογικών, υδρολογικών, υδροχημικών, παλαιογεωγραφικών και άλλων εννοιών, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται ευρύτατα μεν, αλλά να μην εννοούν όλοι οι επιστήμονες που τον χρησιμοποιούν ακριβώς το ίδιο πράγμα.

Ο Milanovic (1981) ορίζει το καρστ ως «ένα σύνθετο γεωλογικό χαρακτηριστικό, που σχετίζεται με πεδία πολύ συγκεκριμένων υδρολογικών χαρακτηριστικών. Τα πεδία αυτά συντίθενται από ασβεστόλιθους, δολομίτες, γύψους, αλίτη και άλλα ευδιάλυτα πετρώματα. Ως αποτέλεσμα της διαλυτότητας των πετρωμάτων και ποικίλων γεωλογικών διεργασιών που δρουν μέσα στο χρόνο, σχηματίζονται φαινόμενα και γεωμορφές που τα χαρακτηρίζουν (karren, δολίνες, πόλγες, κ.λπ.)».

Ο Bonacci (1987) αναφέρει ότι «το καρστ αντιπροσωπεύει μια συγκεκριμένη περιοχή που συνίσταται από ανάγλυφο και επιφανειακό – υπόγειο υδρογραφικό δίκτυο που είναι αποτέλεσμα της κυκλοφορίας του νερού και της προσβολής του σε διακλάσεις, διαρρήξεις και ρωγμές κατά μήκος των στρωμάτων ευδιάλυτων πετρωμάτων, όπως ο ασβεστόλιθος, η κρητίδα και ο δολομίτης, όπως και ο γύψος και το άλας».

Η Παπαπέτρου - Ζαμάνη (1988) προτείνει ότι «ως καρστ εννοούμε περιοχές με καθορισμένα χαρακτηριστικά ανάγλυφου και αποστράγγισης, οι οποίες συνήθως αναπτύσσονται σε πετρώματα υψηλής διαλυτότητας στο νερό», ενώ η Παπαδοπούλου - Βρυνιώτη (2000) με τον όρο καρστ χαρακτηρίζει «περιοχές δομούμενες από ευδιάλυτα ανθρακικά πετρώματα, κύρια ασβεστολιθικά, οπότε το ανάγλυφό τους δημιουργείται όχι μόνο από τη μηχανική δράση του νερού αλλά ουσιαστικά από τη χημική δράση αυτού σύμφωνα με την απλουστευμένη αμφίδρομη αντίδραση $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ».

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή μέσω του COST action 65 (1995) χρησιμοποιεί τον ακόλουθο ορισμό: «Καρστ είναι πρωτίστως ένα τοπίο, με ιδιότυπες γεωμορφές και χαρακτήρες διάλυσης, που αναπτύσσονται κυρίως σε ανθρακικά πετρώματα. Οι καρστικές περιοχές χαρακτηρίζονται από τη γενική απουσία μόνιμης επιφανειακής ροής και την παρουσία ρηχών οπών και κλειστών ταπεινώσεων, την κοινή εμφάνιση σπηλαίων και γενικότερα μεγάλων υπογείων περασμάτων και την ύπαρξη μεγάλων πηγών, συχνά ευρισκόμενων στη βάση της ανθρακικής ακολουθίας. Έτσι, το καρστ είναι ένα επιφανειακό τοπίο, αλλά επίσης και υπόγειο τοπίο, και υδροφόρος ορίζοντας».

Ο Φουντούλης (2003) χρησιμοποιεί τον ορισμό του καρστ ως «το τμήμα της γης που

παρουσιάζει χαρακτηριστική υδρολογία και γεωμορφές που προκύπτουν από τον συνδυασμό της μεγάλης διαλυτότητας και του πολύ καλά εξελιγμένου δευτερογενούς πορώδους των πετρωμάτων», ενώ προσθέτει ότι «δεν είναι σαφές αν από μόνη της η διαλυτότητα των πετρωμάτων μπορεί να δημιουργήσει καρστ» (Ανδρεαδάκης 2003).

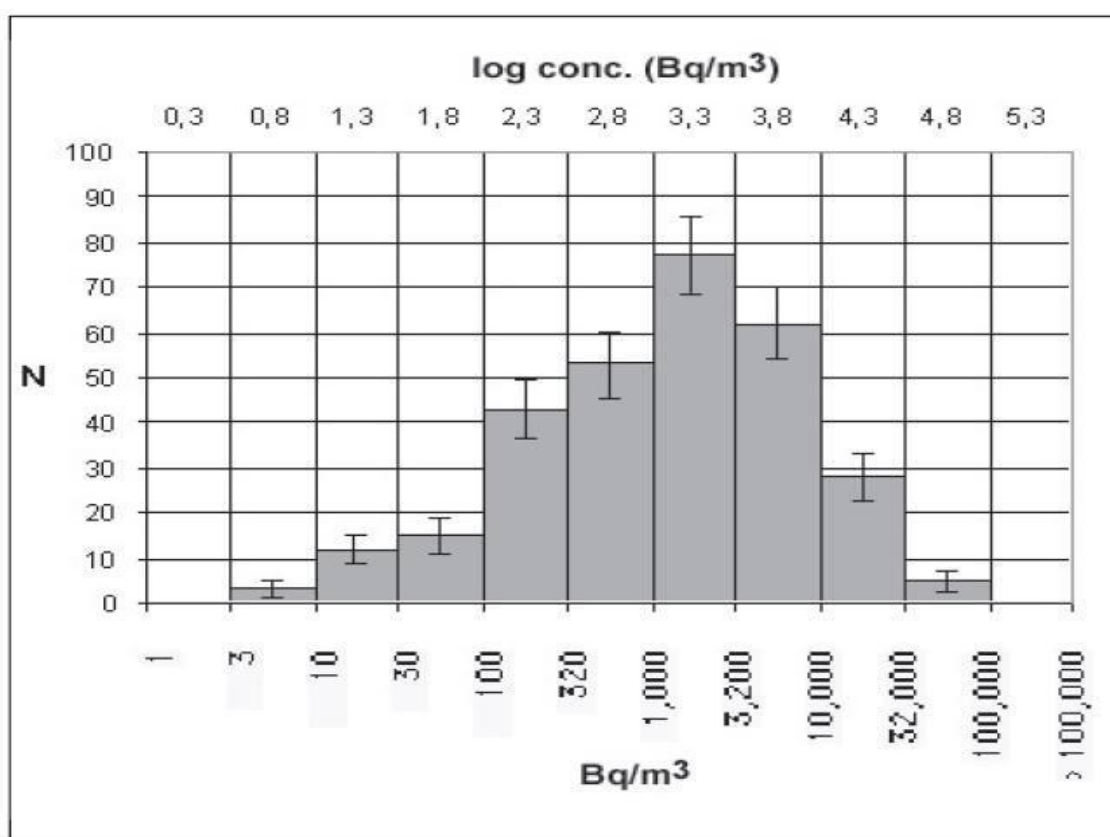
Από τα παραπάνω γίνεται προφανές ότι ο όρος καρστ είναι τόσο περίπλοκος και περιεκτικός, που δημιουργεί μεν στους ερευνητές μία πολύ συγκεκριμένη εικόνα του τι περιγράφει, αλλά πολύ δύσκολα περικλείεται σε έναν ολιγόλογο ορισμό. Σε αντίθεση με τα άλλα μικροπερατά ή αδιαπέρατα πετρώματα, τα ανθρακικά πετρώματα, λόγω της διαλυτότητάς τους, αποτυπώνουν μέσα στη μάζα τους, εκτός από τις γεωλογικές διεργασίες που έχουν επιδράσει πάνω τους στο παρελθόν, και τις κλιματικές, υδρολογικές και υδρογεωλογικές μεταβολές του παρελθόντος τους.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, η διαδικασία της καρστικοποίησης είναι μία δυναμική διεργασία, χαρακτηριστικά εγγενής των ανθρακικών πετρωμάτων, εξελισσόμενη στο χρόνο μόνο υπό τις κατάλληλες συνθήκες. Αυτή η διαδικασία εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, από την ιστορία του ιζήματος από το οποίο προέρχεται το πέτρωμα και την τεκτονική εξέλιξη του περιβάλλοντος χώρου και του ίδιου του πετρώματος αργότερα, μέχρι τις κλιματικές μεταβολές και τις σύγχρονες ανθρωπογενείς επιδράσεις. Αυτό σημαίνει απλά ότι κάθε ανθρακικό πέτρωμα είναι «δυνάμει» καρστικό, και ακριβώς η καρστικοποίησή του δείχνει ποιες συνθήκες και με ποιο τρόπο επέδρασαν πάνω του πριν κατά την έκθεσή του στον υδρολογικό κύκλο, αλλά και μετά από αυτήν (Ανδρεαδάκης 2003).

3.2 Η αναγκαιότητα ερευνών στα σπήλαια

Παρόλο που η επιστημονική κοινότητα έχει εστιάσει την προσοχή της κυρίως στην έρευνα της επίδρασης του ραδονίου στους εσωτερικούς οικιστικούς χώρους λόγω της μεγάλης πληθυσμιακής εξάρτησης, τα υπόγεια περιβάλλοντα των σπηλαίων και των ορυχείων αποτελούν ένα ιδιαίτερο πεδίο έρευνας για την επίδραση του ραδονίου λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων ραδονίου που εκτιμάται μία κλίμακα παραπάνω από τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στις κατοικίες. Ένας αρκετά μεγάλος αριθμός ερευνών έχει πραγματοποιηθεί τόσο σχετικά με τη συμπεριφορά του ραδονίου σε υπόγεια περιβάλλοντα όσο και σχετικά με την επίδραση του ραδονίου στην υγεία.

Τα σπήλαια έχουν ενδιαφέρον διότι η συγκέντρωση ραδονίου σε αυτά μπορεί μερικές φορές να φτάσει υψηλές τιμές. Ένας πολύ μεγάλος αριθμός ερευνών έχει πραγματοποιηθεί σε όλο τον κόσμο, σχετικά με τη συμπεριφορά του ραδονίου σε ένα περιβάλλον, την ακτινοβολία και την προστασία από αυτήν. Η συγκέντρωση του θορονίου στα σπήλαια συνήθως κυμαίνεται από το 5 έως το 15 % των τιμών του ραδονίου, δηλαδή εντός του σφάλματος που επηρεάζει συνήθως τις μετρήσεις ραδονίου. Για το λόγο αυτό και προκειμένου να απλοποιηθεί αυτό το πρόβλημα, λαμβάνεται υπόψη μόνο το ραδόνιο. Τα σπήλαια θεωρούνται στατικά περιβάλλοντα όπου παράμετροι όπως η θερμοκρασία και η υγρασία παραμένουν σταθερές. Άλλοι παράμετροι μπορούν να υποστούν μεγάλες διαφοροποιήσεις λόγω του ρυθμού εναλλαγής του εσωτερικού με τον εξωτερικό αέρα του περιβάλλοντος, το σύστημα των ρηγματώσεων, τον τύπο των πετρωμάτων που περιβάλλουν το σπήλαιο και την ποιότητα του νερού. Η συγκέντρωση του ραδονίου είναι μία από τις παραμέτρους που εμφανίζει δυναμικές αλλαγές ανταποκρινόμενη στις αλλαγές των παραπάνω περιβαντολογικών παραγόντων (Anjosetal 2010).



Πίνακας 3.1: Απεικόνιση αποτελεσμάτων της κατανομής της συγκέντρωσης του ραδονίου σε σχέση με τη λογαριθμική κατανομή περιεκτικότητας ραδονίου σε 220 σπήλαια παγκόσμιας κλίμακας (Cigna, 2005).

3.3 Ταξινόμηση των σπηλαίων βάση της ραδιενέργειας τους [Fhulufhelo Nemangwele, 2005]

Η συγκέντρωση του ραδονίου είναι μια πολύπλοκη συνάρτηση της γεωλογίας, της γεωμετρίας του σπηλαίου και των μικροκλιματικών συνθηκών που επικρατούν στο σπήλαιο. Οι πηγές του ραδονίου είναι το υπόστρωμα και τα διάφορα κοιτάσματα. Πρωτίστως το περιεχόμενο ουράνιο των πετρωμάτων επηρεάζει τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του ραδονίου στα σπηλαία. Έχει διαπιστωθεί ότι ο ασβεστόλιθος και άλλα ιζηματογενή πετρώματα περιέχουν κατά μέσο όρο $1,3 - 1,5 \text{ ppm}^{238}\text{U}$ (Hakl et al, 1997). Διάφοροι τύποι γρανιτών παρουσιάζουν μέσες συγκεντρώσεις $4,8 \text{ ppm}^{238}\text{U}$ κατατάσσοντάς τα στα πετρώματα με μερικές από τις υψηλότερες συγκεντρώσεις (Gillmore et al, 1999).

Ο Gunderson το 1992 και ο Brill το 1994 σημειώνουν πως παρόλο που τα περισσότερα ανθρακούχα πετρώματα περιέχουν χαμηλές συγκεντρώσεις ραδονίου, τα εδάφη και τα υπολειμματικά ιζήματα που προκύπτουν από αυτά παρουσιάζουν συχνά υψηλές συγκεντρώσεις ουρανίου και ραδονίου. Οι McAulay και Marsh σε μελέτη τους το 1992 τονίζουν ότι στην Ιρλανδία, ασβεστολιθικοί σχηματισμοί με υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου χρήζουν περαιτέρω μελέτης καθώς κάποιοι ασβεστολιθικοί τύποι παρουσιάζουν υψηλή περατότητα στο αέριο ραδόνιο (Duffy et al, 1996).

Παρόλο που οι υψηλές συγκεντρώσεις ραδονίου σχετίζονται με πετρώματα με υψηλό ποσοστό περιεχόμενου ουρανίου, ένα μεγαλύτερο ποσοστό από το ραδόνιο που δημιουργείται εκλύεται από δευτερογενή ορυκτά, τα οποία συναντώνται σε ρηγματωμένα πετρώματα. Οι ρηγματώσεις αυτές τείνουν να επιτρέπουν το ραδόνιο να διαφύγει ταχύτερα προς την επιφάνεια (Gillmore et al 2000).

Τα σπήλαια μπορούν να διαιρεθούν σε περιοχές ανάλογα με τη ραδιενεργότητα στα πετρώματα και το έδαφος. Μία προτεινόμενη κατάταξη των διαφόρων περιοχών ενός σπηλαίου είναι η εξής: αμελητέα, φυσιολογική, υψηλή και πολύ υψηλή.

Αμελητέα μπορεί να χαρακτηριστεί μια περιοχή σπηλαίου αν αποτελείται από έδαφος ή πετρώματα με περιεχόμενη συγκέντρωση ραδονίου μικρότερη από 35 Bq.kg^{-1} . Ειδικότερα:

i) Όταν αποτελείται από πετρώματα όπως ο διορίτης ο διάβασης ή άλλος

τύπος πετρώματος όπως ο ψαμμίτης, ο αργιλικός σχιστόλιθος και μεταμορφωμένα πετρώματα που προέρχονται από αυτά.

ii) Ασβεστόλιθο όταν δεν υπάρχει υποκείμενος ραδιενεργός σχηματισμός.

Φυσιολογική μπορεί να θεωρηθεί όταν περιέχει σε μεγάλο βαθμό:

i) Έδαφος ή πετρώματα με περιεκτικότητα ραδονίου από 35 έως 100 Bq.Kg⁻¹.

ii) Σχηματισμός sand and silt με περιεκτικότητα των πόρων σε ραδόνιο από 10 έως 50 kobo.m⁻³.

ii) Ρωγμές και κατακερματισμένες περιοχές στο πέτρωμα που καλύπτονται από στρώμα εδάφους πάχους τουλάχιστον 2 m.

Υψηλή θεωρείται μία περιοχή όταν περιέχει σε μεγάλο βαθμό:

iii) Έδαφος και πετρώματα με περιεκτικότητα ραδονίου μεταξύ 100 έως 500 Bq.kg⁻¹ ii)

iv) Εδάφη με περιεκτικότητα ραδονίου στους πόρους από 50 – 250 kBq.m⁻³ και υψηλή διαπερατότητα.

v) Γενικές εμφανίσεις στο υπόστρωμα γρανίτη και πηγματίτη που παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις ουρανίου.

Πολύ υψηλή θεωρείται μία περιοχή όταν περιέχει σε μεγάλο βαθμό:

i) Εδάφη και πετρώματα με πολύ υψηλή περιεκτικότητα ραδονίου >500 Bq.kg⁻¹.

ii) Εδάφη με περιεκτικότητα ραδονίου στους πόρους μεγαλύτερη από >250 Bq.m⁻³ και πολύ υψηλή διαπερατότητα.

iii) Ρωγμές και κατακερματισμένες ζώνες σε πετρώματα με υψηλή περιεκτικότητα σε ραδόνιο

3.4 Μεταφορά του ραδονίου στα εσωτερικά των σπηλαίων

Τόσο η διάχυση όσο και η μεταφορά μέσω των ρευστών παίζουν σημαντικό ρόλο στη

μεταφορά του ραδονίου στο έδαφος. Γενικά, η διάχυση είναι ο ισχυρότερος μηχανισμός στα περικρυσταλλικά κανάλια, στους τριχοειδείς και τους μικρούς πόρους, σε πετρώματα όμως με μεγαλύτερο πορώδες και παρουσίας ρηγματώσεων η μεταφορά μέσω ρευστών μπορεί να καταστεί εξίσου σημαντικός παράγοντας ή ακόμα και ο πρωταρχικός μηχανισμός μεταφοράς του ραδονίου. Η ετερογένεια του γεωλογικού υλικού είναι πηγή μεγάλων αποκλίσεων του εύρους της διάχυσης του ραδονίου σε ένα πορώδες μέσο αναλογικά με τις θεωρητικές εκτιμήσεις, ο μαρμαρυγίας και ο βερμικουλίτης, τα οποία είναι φυλλοειδή ορυκτά, έχουν συντελεστή σχήματος που αντιστοιχεί σε συντελεστή διάχυσης ίσο με το $\frac{1}{2}$ έως $\frac{1}{3}$ της θεωρητικής τιμής. Η άργιλος και ο αργιλικός σχιστόλιθος περιέχουν σημαντικές ποσότητες από φυλλοειδή ορυκτά συχνά διατεταγμένα με τέτοιο τρόπο, ώστε να παρεμποδίζουν την κάθετη κίνηση, καθυστερώντας τη διάχυση σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με πορώδη μέσα που αποτελούνται από σφαιρικούς κόκκους.

Το ποσοστό του ραδονίου που αποδρά στον αέρα εξαρτάται από το έδαφος -πέτρωμα στο οποίο δημιουργείται και την διαπερατότητα του. Σύμφωνα με το NCRP (National Council for Radiation Protection - 1984) περίπου το 10% του ραδονίου που σχηματίζεται στο πρώτο ανώτερο μέτρο του εδάφους φτάνει στην ατμόσφαιρα. Ωστόσο, στα υπόγεια περιβάλλοντα ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει τη ροή του ραδονίου είναι η μεταφορά μέσω των υπόγειων νερών μέσω αρμών και των ρηγματώσεων. Η μετανάστευση αυτή ωστόσο προς τις υπόγειες κοιλότητες δεν επιδέχεται γενικής μαθηματικής ανάλυσης λόγω της διαφορετικότητας των ανοιχτών χώρων σε κάθε περιοχή.

Στα σπήλαια ο αέρας είναι γενικά καθαρός, υπάρχουν λιγότερα σωματίδια σε σχέση με τις εξωτερικές ή κατοικήσιμες περιοχές. Η συγκέντρωση του ραδονίου στην ατμόσφαιρα ενός σπηλαίου επηρεάζεται από έναν ευρύ αριθμό παραγόντων όπως η συγκέντρωση του ραδονίου στα πετρώματα, το πορώδες, η ροή του νερού και του αέρα, η ατμοσφαιρική πίεση και η σεισμικότητα. Γενικά παρουσιάζεται μία εποχιακή διακύμανση με τις υψηλότερες τιμές να παρουσιάζονται το καλοκαίρι και τις χαμηλότερες τον χειμώνα. Ένα μεγάλο εύρος μετρήσεων δείχνει ότι εκτός από τις εποχιακές διακυμάνσεις, υπάρχουν περαιτέρω παράγοντες που προκαλούν ακανόνιστες διακυμάνσεις που δεν μπορούν να συσχετιστούν ξεκάθαρα με άλλες περιβαλλοντολογικές παραμέτρους.

Όπως όλα τα αέρια, το ραδόνιο μετακινείται διαμέσου των πετρωμάτων και του εδάφους λόγω της διαφοράς πίεσης και της διαφοράς συγκεντρώσεων του ίδιου του αερίου (Standen et al, 1985). Το ραδόνιο έτσι μετακινείται από περιοχές υψηλότερων συγκεντρώσεων σε περιοχές με χαμηλότερη συγκέντρωση. Όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο του ραδονίου στα υποκείμενα πετρώματα και εδάφη τόσο υψηλότερη είναι η πιθανότητα υψηλών συγκεντρώσεων σε ένα σπήλαιο. Το ραδόνιο μετακινείται με μεγάλη ταχύτητα διαμέσου πετρωμάτων και εδάφους με μεγάλη διαπερατότητα και εισέρχεται έτσι σε υπόγειους χώρους όπως τα σπήλαια και τα ορυχεία στα οποία λόγω ανεπαρκή αερισμού μπορούν να εμφανισθούν υψηλές συγκεντρώσεις.

Εξωγενείς παράγοντες

Η κίνηση του αέρα προκαλείται από τις παρακάτω διαδικασίες:

1. Διαφορές πίεσης μεταξύ του αέρα εντός του σπηλαίου και της εξωτερικής ατμόσφαιρας, οι οποίες με τη σειρά τους είναι αποτέλεσμα συνεχών αλλαγών του συστήματος πίεσης.
2. Διαφορές πίεσης που προκαλούνται από τη διαφορετική διεύθυνση των ανοιγμάτων σε σχέση με την πραγματική κατεύθυνση ροής αέρα.
3. Διαφορές θερμοκρασίας που προκαλούνται από διαφορές πίεσης εντός και εκτός του σπηλαίου.
4. Κατά τη διάρκεια της μέρας ή του καλοκαιριού ο αέρας που εισέρχεται στο σπήλαιο, ψύχεται με αποτέλεσμα να αποκτά μεγαλύτερο βάρος και εξέρχεται από ανοίγματα χαμηλότερου υψομέτρου. Το ποσό του αέρα που συμμετέχει σε αυτή τη διαδικασία είναι σχετικά μικρό, αλλά εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ του όγκου του σπηλαίου και της διαμέτρου των ανοιγμάτων.

Ενδογενείς παράγοντες

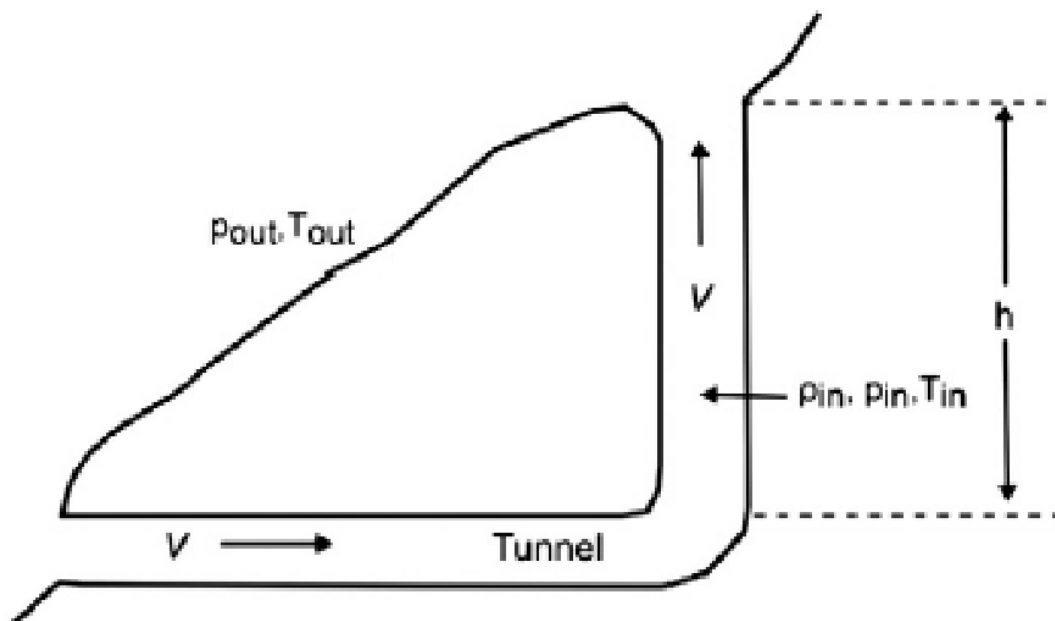
Όσον αφορά τους ενδογενείς παράγοντες, δεν παρατηρείται ανταλλαγή μάζας, αλλά μόνο μεταφορά ενέργειας σε κλειστό θερμοδυναμικό σύστημα. Οι διαδικασίες που προκαλούν κίνηση του αέρα είναι οι εξής:

1. Διαφορά πίεσης περιοχών εντός του σπηλαίου που προκαλείται από τη διαφορά πυκνότητας, η οποία με τη σειρά της προκαλεί διαφορά πίεσης,

υγρασίας και συγκέντρωσης του CO₂. Είναι προφανές ότι η διαφορά θερμοκρασίας αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα δημιουργίας ρευμάτων αέρα και επηρεάζεται άμεσα από τον αριθμό των επισκεπτών σε ένα σπήλαιο.

2. Θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των χώρων του ίδιου του σπηλαίου, αλλά και μεταξύ του σπηλαίου και της ατμόσφαιρας μπορεί να οδηγήσουν σε εξισορροπητικά ρεύματα αέρα με αυτά που οφείλονται στους εξωγενείς παράγοντες να είναι ισχυρότερα σε σχέση με αυτά που οφείλονται στους εσωτερικούς παράγοντες (Pflitsch and Plusecki, 2003).
3. Τη θερμοκρασία των πετρωμάτων, η οποία επηρεάζει τη θερμοκρασία του αέρα του σπηλαίου αντανakλώντας την ετήσια μέση θερμοκρασία του περιβάλλοντος.
4. Η θερμοκρασία του σπηλαίου μπορεί να υπολογιστεί γενικά σε σχέση με το γεωγραφικό πλάτος και το υψόμετρο του σπηλαίου σε σχέση με τη στάθμη της θάλασσας, ωστόσο, υπάρχουν επιπλέον παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τη θερμοκρασία όπως η φύση του σπηλαίου καθώς και τυχόν συσχετιζόμενα γεωθερμικά πεδία.
5. Η γεωμετρία του σπηλαίου και ιδιαίτερα τα κεκλιμένα επίπεδα μπορούν επίσης να επηρεάσουν τη θερμοκρασία.

Γενικά, λόγω των ενδογενών παραγόντων παρατηρούνται ρεύματα που σπάνια ξεπερνούν το 1 m/s.



Εικόνα 3.1: Αναπαράσταση του ρεύματος αέρα λόγω του φαινόμενου της καμινάδας σε ένα απλό σπήλαιο (Valladares et al 2014).

4. ΕΡΕΥΝΕΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΣΕ ΣΠΗΛΑΙΑ

Διεθνώς έχει πραγματοποιηθεί μια πληθώρα ερευνών σε σπήλαια για τη μέτρηση και τη συμπεριφορά του ραδονίου. Σε αυτές τις μελέτες χρησιμοποιήθηκε μία μεγάλη ποικιλία οργάνων και μεθόδων μελετώντας όμως προσεκτικά μπορούμε να διακρίνουμε κάποιες κοινές παραμέτρους, αλλά και διαφορετικές κατευθύνσεις ανάλογα με τους στόχους που είχαν τεθεί στις συγκεκριμένες έρευνες. Κοινός στόχος των περισσότερων ερευνών βέβαια είναι να εκτιμήσουν το ποσοστό απορρόφησης του ραδονίου από τα άτομα που εισέρχονται στα σπήλαια (τουρίστες, τουριστικοί οδηγοί και σπηλαιολόγοι).

4.1 Στόχοι των μελετών μέτρησης συγκεντρώσεως ραδονίου

Οι βασικοί λόγοι που οδήγησαν στην αναγκαιότητα να πραγματοποιηθούν οι σχετικές μελέτες, αλλά και τα άμεσα μεγέθη που μετρήθηκαν σε αυτές είναι τα παρακάτω:

Η μέση εκτιμώμενη απορροφούμενη δόση

Στις περισσότερες από αυτές τις μελέτες είναι επαρκής η μέτρηση της μέσης συγκεντρώσεως ραδονίου αφού στα σημεία που θεωρούνται ως πιο πιθανά για υψηλές συγκεντρώσεις (σημεία με φτωχό αερισμό, σημεία βαθύτερα εντός των σπηλαίων). Για την πραγματοποίηση των σχετικών μετρήσεων είναι επαρκής η χρήση ανιχνευτών πυρηνικών ιχνών και η συσχέτιση των μετρήσεων με τα δεδομένα χρονικής παραμονής των οδηγών και των τουριστών στο σπήλαιο.

Cave name	Estimated average radon concentration [Bq m ⁻³]	Estimated average time spent in the cave [h]	Calculated effective dose [mSv]
SK	7000	60 (research camp, 6 h/day)	2.0
CS	3100	60 (research camp, 6 h/day)	0.9
MI	11,900	112 (8 weekends, 7 h/day)	6.3
MR	9500	140 (10 weekends, 7 h/day)	6.3
ZS	9000	98 (7 weekends, 7 h/day)	4.2
Sum		470	19.7

Πίνακας 4.1: Εκτιμώμενη ετήσια ενεργή δόση σε επισκέπτες σπηλαίων (Kavasi et al, 2010).

Ένας άλλος λόγος που χρησιμοποιούνται κατά κόρον μετρητές πυρηνικών ιχνών είναι τα πολλαπλά σημεία στα οποία απαιτείται να γίνει καταγραφή συγκεντρώσεων του ραδονίου έτσι ώστε να προκύψει μία χαρτογράφηση των πιο «επικίνδυνων» περιοχών. Μια τέτοια έρευνα θα ήταν εξαιρετικά κοστοβόρα σε σχέση με κάποια με μετρητή άλλου τύπου, παραδείγματος χάρη με την μέθοδο θαλάμου σπινθηρισμών, λόγω των υψηλών απαιτήσεων σε εργατοώρες. Η χρήση μεθόδων μικρής διάρκειας δεν επιτρέπει τη σύγκριση των μετρήσεων των συγκεντρώσεων σε σπήλαια ίδιας

ηλικίας και πανομοιότυπων πετρωμάτων. Είναι σαφές από τα αποτελέσματα ερευνών ότι κάθε σπήλαιο χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες μεταβολές της συγκέντρωσης του ραδονίου που μπορούν να ληφθούν πλήρως υπόψη μόνο όταν μελετώνται μετρήσεις ετήσιας διάρκειας (Kavasi et al, 2010). Η μεγάλης διάρκειας παρουσία των ανιχνευτών σε περιβάλλον ακραίων συνθηκών απαιτεί ανθεκτικά και ταυτόχρονα χαμηλού κόστους όργανα, άλλωστε, δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις, στις οποίες έχει καταγραφεί απώλεια ή καταστροφή οργάνου μέτρησης.

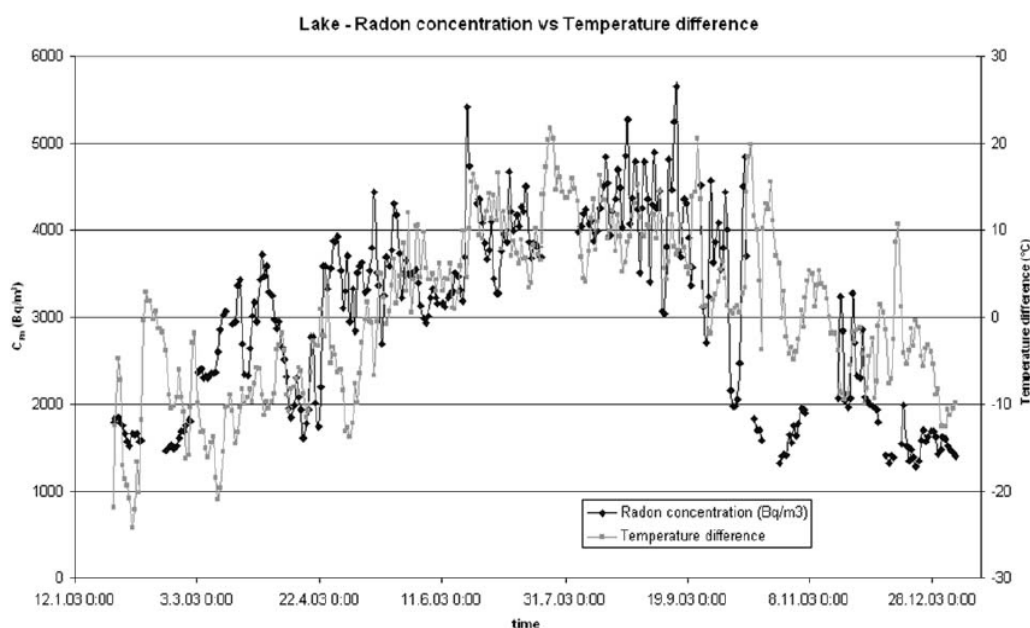
Σε όσες μελέτες πραγματοποιούνται μετρήσεις επί μεγάλα χρονικά διαστήματα, η εκτίμηση της μέσης έκθεσης ραδιενέργειας επιτυγχάνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια και κατ' επέκταση με μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογίζεται και η απορροφώμενη δόση. Όπως έχει πειραματικά αποδειχθεί, η χρήση μεθόδων με διάρκεια έκθεσης λίγων ωρών (μέθοδοι συλλογής αέρα) μπορεί να οδηγήσει σε σχετικό σφάλμα 33% κατά την εκτίμηση της ετήσιας δόσης. Επίσης, το σφάλμα μεθόδων έκθεσης από μία έως επτά ημέρες (μέθοδοι ενεργού άνθρακα) κυμαίνεται 20%-25%, των μεθόδων έκθεσης μίας έως τεσσάρων εβδομάδων (μέθοδοι φορτισμένων επιφανειών και θερμό-φωταύγειας) από 18%-20%, ενώ το σφάλμα από τη χρήση ανιχνευτών πυρηνικών ιχνών με διάρκεια έκθεσης τριών μηνών φθάνει έως 13%. Τέλος, το σφάλμα μεμονωμένων μετρήσεων διάρκειας λίγων λεπτών (μέθοδοι αδιάκοπης καταγραφής) είναι μεγαλύτερο του 33% (Πατήρης, 2009).

Συχνά συνδυαστικά με τους ανιχνευτές πυρηνικών ιχνών χρησιμοποιούνται ανιχνευτές ενεργοποιημένου άνθρακα καθώς λόγω του εξαιρετικά χαμηλού κόστους τους και της μικρής απαιτούμενης διάρκειας έκθεσης (48 ώρες) είναι ιδανικοί για τον προκαταρτικό εντοπισμό και επιλογή σημαντικών σημείων (hotspots) για περαιτέρω έρευνα και μελέτη (Martin Sanchez et al, 2011).

Η συσχέτιση της συγκέντρωσης του ραδονίου με τις εποχιακές περιόδους

Στις συγκεκριμένες μελέτες σκοπός είναι η καταγραφή των εποχιακών μεταβολών της μέσης συγκέντρωσης σε ένα σπήλαιο και η συσχέτιση των μετρήσεων με τις θερμοκρασιακές μεταβολές. Και σε αυτήν την περίπτωση προτιμάται η χρήση κάποιου τύπου ανιχνευτή χρονικά ολοκληρωμένων μετρήσεων λόγω του υψηλού

χρόνου παραμονής του στο σπήλαιο. Πρακτικά στις συγκεκριμένες περιπτώσεις επαρκούν μόνο δύο επισκέψεις στο σπήλαιο, για την τοποθέτηση και την αποκομιδή τους, κάτι το οποίο μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα οικονομικό σε περιπτώσεις σπηλαίων σε δύσβατες περιοχές.



Πίνακας 4.2: Εποχιακή μεταβολή της συγκέντρωσης του ραδονίου σε συνάρτηση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας (Rovenska et al 2010).

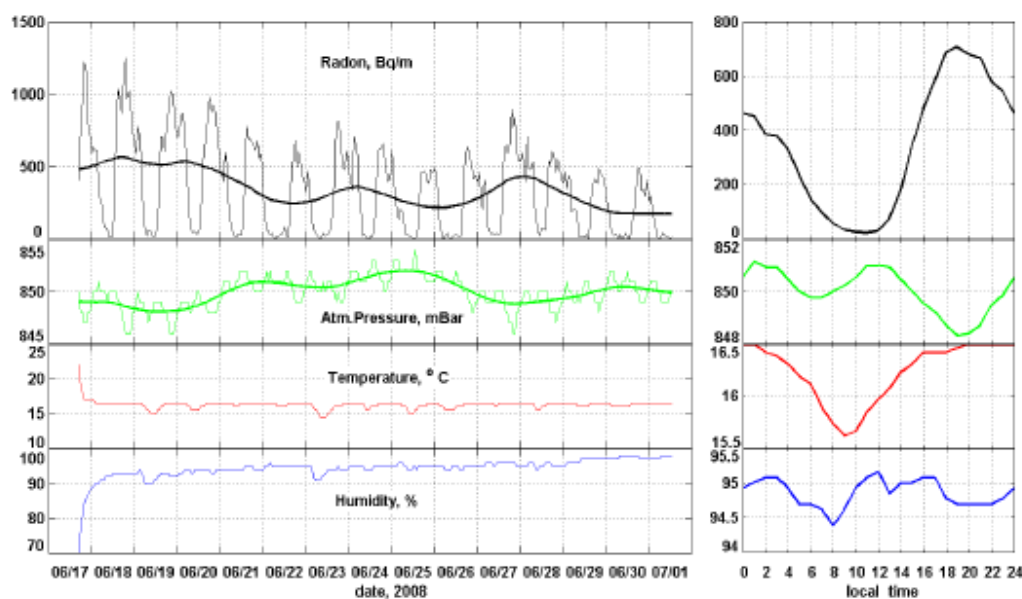
Κοινή παρατήρηση των ερευνών είναι οι αυξημένες τιμές της συγκέντρωσης του ραδονίου τους καλοκαιρινούς θερμούς μήνες καθώς λόγω της μεγαλύτερης θερμοκρασίας της εξωτερικής ατμόσφαιρας, ο ψυχρότερος και άρα βαρύτερος αέρας που εκλύεται από τα περιβάλλοντα πετρώματα των σπηλαίων, εμπλουτισμένος σε Rn παραμένει στο εσωτερικό των σπηλαίων. Αντίθετα τους ψυχρούς μήνες του χειμώνα ο θερμός αέρας των σπηλαίων εκρέει προς την ατμόσφαιρα μεταφέροντας το ραδόνιο, με αποτέλεσμα την μείωση της συγκέντρωσης του στο εσωτερικό των σπηλαίων (Dagmara Eulalia Tchorz-Trzeciakiewicz et al, 2015).

Η συσχέτιση της συγκέντρωσης του ραδονίου με την εναλλαγή ημέρας –νύκτας

Η καταγραφή των αλλαγών συγκεντρώσεων ραδονίου στο διάστημα μίας ημέρας σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις απαιτεί τη χρήση οργάνων με μεγαλύτερη χρονική ακρίβεια μετρήσεων και για αυτό τον λόγο προτιμώνται ενεργές μέθοδοι καταγραφής. Δύο τύποι οργάνων προτιμώνται σε αυτήν την περίπτωση: όργανα, τα οποία καταγράφουν μοναδιαίες μετρήσεις και η χρήση τους απαιτεί ανθρώπινη παρουσία και όργανα, τα οποία είναι μόνιμα εγκατεστημένα σε επιλεγμένο σημείο ενός σπηλαίου και καταγράφει συνεχώς ή σε ορισμένα χρονικά διαστήματα τη συγκέντρωση του ραδονίου και αποθηκεύει τις μετρήσεις σε μονάδα ηλεκτρονικής αποθήκευσης.

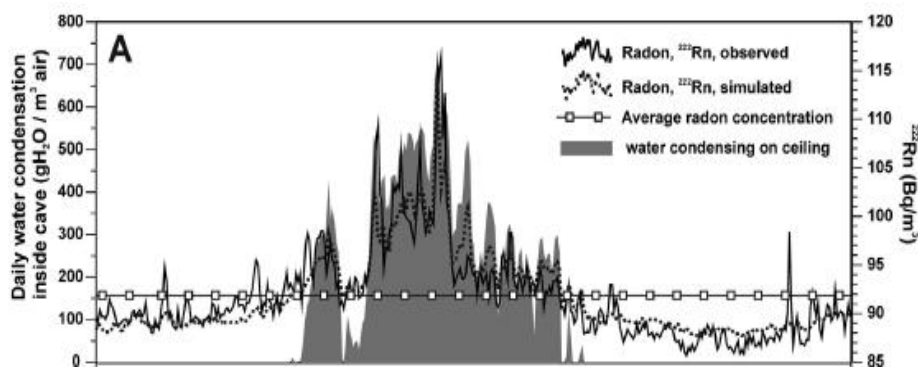
Η συσχέτιση της συγκέντρωσης του ραδονίου με άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους.

Συχνό αντικείμενο των ερευνών που περιλαμβάνουν μετρήσεις της συγκέντρωσης του ραδονίου είναι η συσχέτιση τους με μετεωρολογικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου. Σε αυτές τις μελέτες συνήθως χρησιμοποιούνται ενεργητικές συνεχείς μέθοδοι μέτρησης του ραδονίου σε συνδυασμό με όργανα μέτρησης των μετεωρολογικών παραμέτρων με δεδομένο ότι οι μεταβολές των παραπάνω παραμέτρων είναι συνήθως χρονικά ευαίσθητες.



Πίνακας 4.3: Μετρήσεις ραδονίου σε εγκαταλελειμμένο ορυχείο υδραργύρου στο San Joaquin, Μεξικό (Kotsarenko et al, 2009).

Ειδικότερα, για την υγρασία μελέτες έχουν δείξει ότι η αύξηση της υγρασίας στα σπήλαια συνδέεται άμεσα με την αύξηση της συγκέντρωσης του ραδονίου λόγω της απορρόφησης νερού από τις πορώδεις επιφάνειες των πετρωμάτων και της απομόνωσης της ατμόσφαιρας του σπηλαίου λόγω της μείωσης του περιεχόμενου αέρα στο πορώδες των τοιχωμάτων και της οροφής των σπηλαίων. Αυτή η ανωμαλία στη συγκέντρωση του ραδονίου φαίνεται να εμφανίζεται όταν το ποσοστό της σχετικής υγρασίας ξεπερνά το 70 – 75% (Fernandez Cortez A. Et al, 2013). Για την καταγραφή των δεδομένων των σχετικών μελετών απαιτούνται όργανα ανίχνευσης πολλαπλών παραμέτρων (συγκέντρωση ραδονίου, θερμοκρασία, υγρασία) και ιδιαίτερα για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του ραδονίου απαιτούνται ενεργά όργανα συνεχής καταγραφής,



Πίνακας 4.4: Καταγεγραμμένο και προσομοιωμένο σήμα της συγκέντρωσης ραδονίου στον αέρα σπηλαίου σε συσχέτιση με την ενεργή υγραποίηση σε έναν ετήσιο κύκλο (Fernandez Cortez et al, 2013).

Λοιπών τύπων έρευνες

Ένας μικρός, αλλά σημαντικός, αριθμός ερευνών εστιάζει στη μελέτη πιο πολύπλοκων μηχανισμών που συσχετίζονται με την συγκέντρωση του ραδονίου όπως η ηφαιστειακή δραστηριότητα (Vinas et al, 2007) και η σεισμική δραστηριότητα. Επίσης, η παρουσία του ραδονίου σε όλους τους τύπους των εδαφών και πετρωμάτων το καθιστά ιδανικό ως αέριο δείκτη σε συνδυασμό με τη σχετικά εύκολη εφαρμογή των μεθοδολογιών μέτρησής του. Επιπλέον, η μελέτη ενός χημικά αδρανούς αερίου όπως τα ραδόνιο μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση της δυναμικής του φυσικού CO₂ (C. Loisy et al, 2012).

4.2 Παράμετροι προσδιορισμού μεθόδων μέτρησης

Σε όλες τις έρευνες μπορούμε να εντοπίσουμε κάποιες βασικές παραμέτρους, οι οποίες λαμβάνονται υπόψη κατά την υλοποίηση μίας έρευνας σε σπήλαιο για τη συγκέντρωση του ραδονίου. Οι παράμετροι αυτές εντέλει επηρεάζουν και καθορίζουν τα αποτελέσματα της έρευνας.

Γεωλογικό υπόβαθρο του σπηλαίου. Η βασική παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη σε μία έρευνα σε σπήλαιο είναι το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής στην οποία βρίσκεται στο σπήλαιο, καθώς είναι σαφής ο συσχετισμός της συγκέντρωσης του ραδονίου τόσο με το περιεχόμενο ραδόνιο στα πετρώματα όσο και το πορώδες. Γενικά, η απουσία απότομων μεταβολών της συγκέντρωσης του ραδονίου υποδηλώνει ότι το σπήλαιο βρίσκεται σε υπόστρωμα συμπαγών πετρωμάτων καθώς και την απουσία μεγάλων ρωγμών και ρηγμάτων που θα μπορούσαν να προκαλέσουν τη διάλυση ή τη συσσώρευση αέριου ραδονίου ανάλογα με τις εξωτερικές ατμοσφαιρικές παραμέτρους (Papachristodoulou et al, 2004).

Χρονική – εποχική περίοδος μετρήσεων. Εξίσου σημαντική είναι η επιλογή της χρονικής διάρκειας της καταγραφής της συγκέντρωσης του ραδονίου έτσι ώστε να αναγνωριστούν οι συστηματικές μεταβολές που προκύπτουν κατά το διάστημα της διάρκειας αυτής και να ληφθούν υπόψη στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

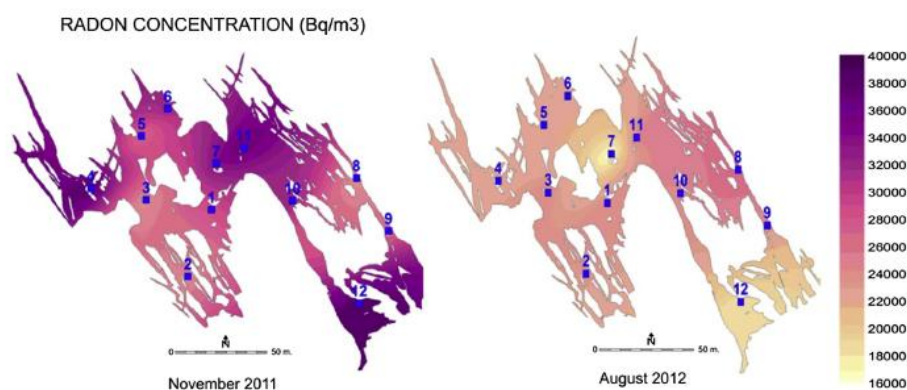
Τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες του σπηλαίου. Η συγκέντρωση του ραδονίου σε ένα σπήλαιο είναι σε κάθε περίπτωση συνυφασμένη με τις σημαντικότερες μετεωρολογικές παραμέτρους ενός σπηλαίου, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων της έρευνας. Μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης και της θερμοκρασίας που προκαλούν ρεύματα αέρος και υγρασία μπορούν να μεταβάλλουν τόσο τη συγκέντρωση του ραδονίου όσο και την ποιότητα των μετρήσεων. Ιδιαίτερα σημαντική για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου μετρήσεων είναι οι συνθήκες υγρασίας καθώς μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τόσο τη λειτουργικότητα του εξοπλισμού όσο και την ποιότητα των μετρήσεων. Συχνά επιλέγεται η τοποθέτηση των οργάνων μέτρησης σε θαλάμους διάχυσης εφοδιασμένους με αποξηραντικά υλικά (Άνυδρος CaCl_2) για την προστασία από την υγρασία (Rovenska et al, 2009).

Ανθρώπινος παράγοντας Με δεδομένο ότι στις περισσότερες μελέτες το ζητούμενο είναι η επίδραση της συγκέντρωσης του ραδονίου είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η χρονική και γεωγραφική παρουσία των ανθρώπων στα σπήλαια (ερευνητές, ξεναγοί, τουρίστες) ώστε να επιλεγθούν τα κατάλληλα σημεία για την πραγματοποίηση των μετρήσεων και να ελεγχθεί η πιθανότητα επίδρασης από τον ανθρώπινο παράγοντα

(αύξηση των αερομεταφερόμενων σωματιδίων).

Γεωγραφική κατανομή – θέση τοποθέτησης των μετρητών εντός των σπηλαίων

Αφού αναγνωριστούν και εκτιμηθούν όλοι οι παραπάνω παράγοντες, το σημαντικότερο βήμα είναι η σωστή επιλογή των σημείων εντός των σπηλαίων, στα οποία θα πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις. Τα όργανα μέτρησης συνήθως τοποθετούνται στα σημεία που αναμένεται να μετρηθεί η υψηλότερη συγκέντρωση καθώς και στα σημεία, τα οποία εμφανίζουν αυξημένη ανθρώπινη παρουσία (σημεία στάσης των ομάδων κατά τις ξεναγήσεις) (Roveska et al, 2009)(Sanchez et al, 2006). Οι γεωγραφικές μεταβολές της συγκέντρωσης του ραδονίου συνήθως συσχετίζονται με την ύπαρξη ή την απουσία ρευμάτων αέρα στα διάφορα σημεία ενός σπηλαίου (Dagmara Eulalia Tchorz-Trzeciakiewicz et al, 2015).



Εικόνα4.1: Χωροταξική κατανομή της μέσης συγκέντρωσης του ραδονίου (Alvarez-Gallego et al, (2015)).

Εκτός από την επιλογή οργάνων ενεργών ή παθητικών μεθόδων, συνεχών ή χρονικά ολοκληρωμένων μεθόδων, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη παράμετροι σχετικά με το αν

θα μετρηθούν σωματίδια άλφα ή ακτινοβολία γάμμα από τα θυγατρικά και σχετικά με το αν οι μετρήσεις πρέπει να είναι ενεργές, το οποίο περιλαμβάνει την άντληση του αερίου του εδάφους και τη ροή του διαμέσου θαλάμων ιονισμού ή οι μετρήσεις θα πρέπει να είναι παθητικές, μετρώντας τη συγκέντρωση του ραδονίου κάτω από φυσικές και αδιατάρακτες συνθήκες. Σε μακροχρόνια παρακολούθηση για γεωφυσικές μελέτες, όπως για τον καθορισμό της σχέσης μεταξύ του ραδονίου και τεκτονικών γεγονότων όπως οι σεισμοί και οι ηφαιστειακές εκρήξεις πρωταρχική απαίτηση είναι να δουλέψουμε με παθητικό δρόμο και με υψηλή ευαισθησία μετρήσεων. Αυτού του τύπου οι μετρήσεις είναι κατάλληλες για τον εντοπισμό αλλαγών μικρής χρονικής διάρκειας. Τέτοιος παθητικός τρόπος λειτουργίας επιτυγχάνεται με χρήση αισθητηρίων που χρησιμοποιούν τη διάχυση των σωματιδίων άλφα (δίοδοι πυριτίου και θάλαμοι ιονισμού) και από ανιχνευτικά συστήματα ακτινοβολίας γάμμα. Υπάρχει μια εγγενής διαφορά μεταξύ των ανιχνευτών γάμμα και σωματιδίων άλφα που σχετίζεται με την μέθοδο ανίχνευσης. Οι ανιχνευτές ακτινοβολίας γάμμα καταγράφουν τα φωτόνια που εκπέμπουν τα προϊόντα διάσπασης του ραδονίου, PB-214 και Bi-214. Όταν τοποθετηθούν, για παράδειγμα, σε ορύγματα κάτω από το την επιφάνεια του εδάφους ή σε πετρώματα, αντιδρούν στο περιεχόμενο σε ράδιο σε ένα κυλινδρικό μπλοκ διαστάσεων 60cm X 60cm (το μέσο μήκος απορρόφησης ακτινοβολίας γάμμα είναι 30cm) και όγκο περίπου 0,15 m³. Οι ανιχνευτές σωματιδίων άλφα που τοποθετούνται σε ορύγματα αντιδρούν σε άτομα ραδονίου που θα εισέλθουν μέσω διάχυσης από τον κενό αέριο χώρο του ορύγματος στον χώρο ανίχνευσης του μετρητή (μερικές δεκάδες cm³) και μετρούν τα σωματίδια άλφα που εκπέμπονται από το ραδονιο-222 και τα θυγατρικά του Po-218 και Po-214. Η μέθοδος ανίχνευσης ακτινοβολίας γάμμα, εκτός από τη διαφορά στον όγκο ανίχνευσης (2 με 3 κλίμακες) έχει το πλεονέκτημα παρακολούθησης χρονικών μεταβολών της συγκέντρωσης του ραδονίου απευθείας στο πορώδες μέσο πριν το αέριο ραδόνιο μετακινηθεί στον ελεύθερο αέρα όπου βρίσκεται ο ανιχνευτής σωματιδίων άλφα. Η συμπεριφορά των ανιχνευτών διόδων πυριτίου σωματιδίων άλφα, κρυστάλλων σπινθηρισμού ακτινοβολίας γάμμα και θαλάμων ιονισμού όταν χρησιμοποιούνται για μακροχρόνια παρακολούθηση σε γεωλογικά μέσα μελετήθηκε πρόσφατα (Zafir et al, 2011). Βρέθηκε ότι οι ανιχνευτές γάμμα έχουν ευαισθησία και δυνατότητα καταγραφής 1 μέτρησης ανά ώρα ανταποκρινόμενοι σε επίπεδα ραδονίου του εύρους 0,01-0,09 Bq/m³ (ανάλογα με το μέγεθος και τη χημική σύσταση του κρυστάλλου του σπινθηριστή), ενώ, οι ανιχνευτές διόδων πυριτίου καταγράφουν 1

μέτρηση ανά ώρα ανταποκρινόμενοι σε συγκέντρωση 50Bq/m³ και οι ανιχνευτές θαλάμων ιονισμού ανταποκρινόμενοι σε συγκέντρωση 1-2 Bq/m³.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως φαίνεται και από τα στοιχεία που παρουσιάστηκαν στα παραπάνω κεφάλαια, η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου καταγραφής των συγκεντρώσεων του ραδονίου στα σπήλαια είναι μία πολυδιάστατη διαδικασία, που εξαρτάται τόσο από τους στόχους της συγκεκριμένης έρευνας όσο και των ιδιαίτερων συνθηκών του κάθε σπηλαίου.

Πίνακας 5.1: Μεθοδολογία μέτρησης ραδονίου σε 100 διαφορετικές μελέτες διεθνώς

ΜΕΘΟΔΟΣ	Αριθμός	Ποσοστό(%)
Ανιχνευτές πυρηνικών ιχνών	61	50,41%
Ανιχνευτές θαλάμων ημιαγωγού	28	23,14%
Ανιχνευτές κυψελίδων σπινθηρισμού	20	16,53%
Ανιχνευτής θαλάμων ιονισμού	14	11,57%
Ανιχνευτές ενεργοποιημένου άνθρακα	1	1,65%

Συγκρίνοντας έναν αριθμό διαφορετικών μελετών για την καταγραφή του ραδονίου σε διάφορα σπήλαια διαπιστώνουμε ότι προτιμήθηκαν ως όργανα καταγραφής μία μεγάλη ποικιλία οργάνων διαφόρων μεθόδων μέτρησης από παθητικές μεθόδους έως ενεργητικές. Οι βασικότεροι φυσικοί και τεχνικοί παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή της μεθόδου μέτρησης είναι οι χρονικές διακυμάνσεις της συγκεντρώσεως του ραδονίου, η ανάγκη συνεχούς τροφοδοσίας ή (και) τεχνικής υποστήριξης από εξειδικευμένο προσωπικό κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, το είδος των ακτινοβολιών που καταγράφονται από τα ανιχνευτικά συστήματα και το κόστος. Ωστόσο, εμφανίζεται μία ξεκάθαρη προτίμηση στη χρήση ανιχνευτών καταγραφής πυρηνικών ιχνών είτε ως μοναδικό όργανο καταγραφής είτε σε συνδυασμό με κάποιο όργανο ενεργής μεθόδου καταγραφής. Οι βασικοί λόγοι που οι ανιχνευτές πυρηνικών ιχνών προτιμώνται είναι οι εξής:

- **Μικρό κόστος εξοπλισμού.** Οι ανιχνευτές πυρηνικών ιχνών έχουν υποπολλαπλάσιο κόστος από τα υπόλοιπα όργανα μέτρησης ραδονίου, συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός, σε μία από τις έρευνες αναφέρεται η χρήση έως και 38 διαφορετικών ανιχνευτών. Συνεπώς, είναι δυνατόν να καλυφθεί ένας πολύ μεγαλύτερος αριθμός σημείων ελέγχου σε ένα σπήλαιο χωρίς ιδιαίτερο κόστος καθιστώντας τους ιδανική λύση για έλεγχο της γεωγραφικής κατανομής τη συγκέντρωσης του ραδονίου σε ένα σπήλαιο. Περιπτώσεις που μπορεί να καταστραφούν ή να χαθεί ένας αριθμός ανιχνευτών δεν αυξάνουν ιδιαίτερα το κόστος αντικατάστασής τους. Αντίστοιχα μικρό είναι και το κόστος συντήρησης και παρακολούθησης. Καθώς οι παθητικές μέθοδοι δεν απαιτούν πηγή ενέργειας δεν είναι απαραίτητος ο έλεγχός τους και δεν υπάρχει κίνδυνος απώλειας δεδομένων λόγω δυσλειτουργίας της πηγής ενέργειας όπως μπορεί να συμβεί στις συσκευές ενεργών μεθόδων μετρήσεων.
- **Δυνατότητα για μακροχρόνια καταγραφή μετρήσεων** χωρίς ιδιαίτερη απαίτηση σε ανθρώπινο δυναμικό ή τη δέσμευση ακριβών οργάνων για μεγάλο διάστημα για τις ανάγκες ενός και μόνο ερευνητικού προγράμματος. Στις έρευνες που μελετήθηκαν υπήρχαν περιπτώσεις που οι ανιχνευτές παρέμειναν εκτεθειμένοι σε περιβάλλον ραδονίου έως και έξι μήνες. Οι μέθοδοι χρονικά ολοκληρωμένων μετρήσεων είναι ιδανικές για ερευνητικά

προγράμματα όπου είναι σημαντικό να μελετηθεί η εποχιακή διακύμανση των μεταβολών της συγκέντρωσης του ραδονίου καθώς δεν απαιτούν τροφοδοσία ρεύματος και συνεπώς έχουν μηδενικές απαιτήσεις απασχόλησης τεχνικού προσωπικού για όλο το χρονικό διάστημα που απαιτείται για τη λήψη των δεδομένων.

Αντίθετα, οι μέθοδοι αρπαγής θεωρούνται ως οι πλέον ακατάλληλες, καθώς απαιτείται συνεχής τροφοδοσία ενέργειας και απασχόληση προσωπικού που θα αλλάζει και θα καταμετρά τους ηθμούς όταν συλλέγονται. Η εφαρμογή μεθόδων αδιάκοπης καταγραφής λόγω της πλήρους αυτοματοποίησής τους επιτρέπουν την δίχως επιτήρηση καταμέτρηση για μεγάλα χρονικά διαστήματα, (ακόμα και με τη χρήση συστημάτων εσωτερικής τροφοδοσίας). Σε σύγκριση ωστόσο με τους ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται σε χρονικά ολοκληρωμένες μετρήσεις, τα συστήματα συνεχούς καταγραφής έχουν μεγαλύτερο κόστος, είναι μεγαλύτερα σε μέγεθος και παρέχουν μικρότερη δυνατότητα μετακίνησης καθώς συνήθως απαιτείται εγκατάσταση από εξειδικευμένο προσωπικό (Πατήρης, 2009).

- **Ανθεκτικότητα σε απαιτητικά περιβάλλοντα.** Λόγω της απλής κατασκευής του οι ανιχνευτές πυρηνικών ιχνών παρουσιάζουν μηχανική αντοχή, ενώ είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά σε συνθήκες υψηλής υγρασίας, σε αντίθεση με άλλα όργανα, λόγω των οποίων, όπως είδαμε στις περιπτώσεις που μελετήσαμε, μπορεί να προκύψει απώλεια δεδομένων λόγω δυσλειτουργίας τους σε συνθήκες υγρασίας.
- **Μεγάλη προσαρμοστικότητα.** Λόγω της απλής αρχής λειτουργίας τους με τη χρήση δευτερευόντων περιβλημάτων ή φίλτρων μπορεί να γίνει προσαρμογή των μετρητών πυρηνικών ιχνών, ώστε να καταγράφουν επιλεκτικά μόνο τα ίχνη των σωματιδίων α του ραδονίου και όχι των παραγώγων της διάσπασής τους. Ωστόσο, το παραπάνω χαρακτηριστικό δημιουργεί ταυτόχρονα προβλήματα συσχετισμού των δεδομένων διαφορετικών μελετών που χρησιμοποιούν διαφορετικούς τύπους ή διαφορετικές διατάξεις μετρητών πυρηνικών ιχνών.

Βασικό μειονέκτημα των ανιχνευτών καταγραφής πυρηνικών ιχνών και των μεθόδων

χρονικά ολοκληρωμένων μετρήσεων γενικότερα είναι ότι λόγω της παρατεταμένης έκθεσής τους, τα συστήματα αυτά δεν επηρεάζονται σημαντικά από παράγοντες που διαφοροποιούν τη συγκέντρωση του ραδονίου για μικρά χρονικά διαστήματα, όπως οι αλλαγές των ατμοσφαιρικών συνθηκών, ο απότομος εξαερισμός του χώρου, η μεταβολή του ρυθμού εκροής του ραδονίου από το έδαφος κ.λπ. Συνεπώς, οι μέθοδοι ολοκληρωμένων μετρήσεων δεν είναι κατάλληλες για την παρακολούθηση των μεταβολών δυναμικών.

Αντίθετα, οι ενεργές και συνεχείς μέθοδοι μετρήσεων της συγκέντρωσης ραδονίου προτιμώνται για τους παρακάτω λόγους:

- **Δυνατότητα άμεσης καταγραφής των μετρήσεων.** Οι συγκεκριμένες μέθοδοι μπορούν να δώσουν μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως προκαταρκτικές, ώστε να αποφασιστεί η κατάλληλη μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη ενός σπηλαίου σε περιοχές ενεργών ρηγμάτων, όπου η συγκέντρωση του ραδονίου μπορεί μεταβληθεί ραγδαία και σε μεγάλο βαθμό. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για γρήγορες μετρήσεις στο πεδίο που θα αποτελέσουν στατιστικό δείγμα ελέγχου επάρκειας μίας παθητικής μεθόδου ή να χρησιμοποιηθούν για τη βαθμονόμηση άλλων οργάνων.
- **Μεγαλύτερη χρονική ακρίβεια μετρήσεων.** Όταν ο σκοπός μίας έρευνας είναι η μελέτη των φαινομένων που επηρεάζουν την έκλυση, την παραμονή και την απομάκρυνση του ραδονίου σε ένα χώρο, συνιστώνται μέθοδοι, στις οποίες πραγματοποιούνται μετρήσεις ανά τακτά μικρά χρονικά διαστήματα καθώς τα φαινόμενα αυτά παρουσιάζουν πιο δυναμικές εναλλαγές σε σχέση με τον χρόνο. Σε αντίθεση με τις παθητικές μεθόδους που συνήθως μπορούν να μας προσφέρουν μέτρηση μόνο της μέσης τιμής της συγκέντρωσης, οι ενεργές μέθοδοι μπορούν να καλύψουν ένα πυκνό χρονικό φάσμα δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στον μελετητή να εντοπίσει απότομες μεταβολές στις συγκεντρώσεις του ραδονίου.

- **Συνδεσιμότητα με υπολογιστικές μονάδες και ηλεκτρονικές μονάδες αποθήκευσης.** Δεδομένων των υπολογιστικών δυνατοτήτων των σύγχρονων υπολογιστών είναι πολύ σημαντική η δυνατότητα των ενεργών μεθόδων μέτρησης για αποθήκευση χιλιάδων μετρήσεων στη μνήμη τους, αλλά και την απευθείας ανάλυση και μετατροπή των μετρούμενων μεγεθών. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η άμεση λήψη δεδομένων τόσο από τους μελετητές, αλλά και η άμεση πρακτική χρήση του από μη εξειδικευμένα άτομα, όπως για παράδειγμα τους τουριστικούς οδηγούς των σπηλαίων, αλλά και τους αρχαιολόγους.

Συνοπτικά στις δημοσιευμένες εργασίες που επεξεργάστηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας στον επόμενο πίνακα 5.1 παρατίθενται τα ποσοστά των διαφόρων μεθοδολογιών μέτρησης ραδονίου σε σπήλαια ανά τον κόσμο

Πίνακας 5.1: Μεθοδολογία μέτρησης ραδονίου σε 100 διαφορετικές μελέτες διεθνώς

<i>ΜΕΘΟΔΟΣ</i>	<i>Αριθμός</i>	<i>Ποσοστό(%)</i>
Ανιχνευτές πυρηνικών ιχνών	61	50,41%
Ανιχνευτές θαλάμων ημιαγωγού	28	23,14%
Ανιχνευτές κυψελίδων σπινθηρισμού	20	16,53%
Ανιχνευτής θαλάμων ιονισμού	14	11,57%
Ανιχνευτές ενεργοποιημένου άνθρακα	1	1,65%

Πέραν των ανωτέρω συμπερασμάτων η επεξεργασία των δεδομένων που παρουσιάζονται στις δημοσιευμένες εργασίες που επεξεργάστηκαν στα πλαίσια αυτής της διατριβής, συνέλεξε μία σωρεία χρήσιμων στοιχείων που αφορούν την έρευνα συγκέντρωσης ραδονίου που παρουσιάζεται σε περιληπτικά στο συνοδό ενεργό αρχείο που δημιουργήθηκε. Χαρακτηριστικά μπορούν να αναφερθούν τα ακόλουθα:

- 1) Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν στα σπήλαια/τμήματα των σπηλαίων με χαμηλότερη ποιότητα αερισμού
- 2) Σε διάφορα σπήλαια έχουν καταγραφεί εμφανείς μηνιαίες αποκλίσεις που καταδεικνύουν τη σημαντικότητα των χρονικά ολοκληρωμένων μετρήσεων. Οι σημαντικότερες δε αποκλίσεις είναι εποχιακές και οφείλονται στις μεταβολές της θερμοκρασίας ανάμεσα σε αυτές τις εποχές.

- 3) Η ταυτόχρονη χρήση διαφορετικών μεθόδων μέτρησης συμβάλει σημαντικά στη συλλογή ποιοτικά ολοκληρωμένων μετρήσεων που μπορούν με μεγαλύτερη ασφάλεια να οδηγήσουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τους μηχανισμούς έκλυσης και συγκέντρωσης του αερίου ραδονίου.
- 4) Οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν κοντά στις εισόδους των σπηλαίων, ενώ οι υψηλότερες σε σημεία που έχουν σημαντική απόσταση από τις εισόδους αυτών.
- 5) Στις περισσότερες περιπτώσεις η μεταβολή της συγκέντρωσης του ραδονίου είναι ανάλογη της μεταβολής της εξωτερικής θερμοκρασίας.
- 6) Λόγω των πολλαπλών παραμέτρων που επηρεάζουν την συγκέντρωση του ραδονίου στα σπήλαια είναι απαραίτητη η συνεχής και συστηματική καταγραφή των συγκεντρώσεων αυτών για την έγκαιρη πρόληψη και προστασία των επισκεπτών των σπηλαίων αυτών.
- 7) Τέλος σαφής είναι η έλλειψη κοινώς διεθνώς αποδεκτής πρότυπης μεθόδου και διαδικασία για την διενέργεια μετρήσεων ραδονίου στα σπήλαια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

- Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (2005): Ραδόνιο [Εγχειρίδιο], Αθήνα, 2005.
- Κασινάλης Χ. (2008): Μέθοδος in situ μετρήσεις Ραδονίου στο νερό Αξιολόγηση της μεθόδου και εφαρμογή της στη μέτρηση ραδονίου σε πηγή μεταλλικού νερού. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Θεσσαλονίκη, 2008.
- Πατήρης Δ. (2009): Μελέτη συμπεριφοράς των θυγατρικών ραδιοϊσοτόπων του ραδονίου στον ατμοσφαιρικό αέρα.
- Τσουκαλά Α. (2013): Μετρήσεις ραδονίου και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων σε σπήλαια και ζώνες ρηγμάτων στην Κρήτη.

Διεθνής

- Albergi S., Pecequilo B.R.S., Campos M.P., (2005): Radon concentrations in caves of Parque Estadual do Alto Ribeira (PETAR), SP, Brazil: preliminary results, International Congress Series 1276 (2005) 403– 404.
- Alvarez-Gallego M., Garcia-Anton E., Fernansez-Cortes A., Cuezva S., Sanchez-Moral S., (2015): High radon levels in subterranean environments: monitoring and technical criteria to ensure human safety, Journal of Environmental Radioactivity 145 (2015) 19-29.
- Al-Mustafa H., Al-Jarallah M.I., Rehman F., Abu-Jarad F., (2005): Radon concentration measurements in the desert caves of Saudi Arabia.
- Anjos R.M., Umisedo N., da Sillva A.A.R., Estellita L., Rizzotto M., Yoshimura E.M., Velasco H., Santos A.M.A (2010): Occupational exposure to radon and natural gamma radiation in the La Carolina, a former gold mine in San Luis Province, Argentina, Journal of Environmental Radioactivity 101 (2010) 153–158.
- Ates A., Comlek U., UsluI. Kaya B.(2013): Investigation of radon level in Tinaztepe Cave (Konya/Turkey), Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research 2013 Volume (issues) 31(1): 47-56.

Bahtijari M., Vaupotic J. Gregoric A., Stegnar P., Kobal I., (2008): Exposure to radon in the Gadime Cave, Kosovo, *Journal of Environmental Radioactivity* 99 (2008) 343-348.

Balcazar M., Gomez S., Pena P., Arredondo J.Z., Gazzola J., Lillamares A., (2013): Presence of a radioactive gas in archaeological excavations, determination and mitigation, *Applied Radiation and Isotopes* 83(2014) 272–275.

Bochiolo M., Verdiya M., Chiozzi P., Pasquale V., (2012): Radiometric surveying for the assessment of radiation dose and radon specific exhalation in underground environment, *Journal of Applied Geophysics* 83 (2012) 100–106.

Borau J., Gonzalez A., Espiosa G., Gozarri J.I., (1993): Measurements of radon levels inside Mexican caves, *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, Vol 22, Nos 1-4, pp. 287-288, 1993.

Bourges F., Genthon P., Gentry D., Lorblanchet M., Mauduit E., D’Hulst D., (2014): Conservation of prehistoric caves and stability of their inner climate: Lessons from Chauvet and other French caves, *Science of the Total Environment* 493 (2014) 79–91.

Calin M.R., Calin M.A., (2010): Evaluation of the radon concentration in Ocna Dej salt mine, Romania, *J Radioanal Nucl Chem* (2010) 286: 169–173.

Calin M.R., Zoran M. Calin M.A (2012): Radon levels assessment in some Northern Romanian salt mines, *J Radioanal Nucl Chem* (2012) 293: 565–572.

Cigna A.A. (2005): Radon in Caves, *International Journal of Speleology*.

Dagmara Eulalia Tchorz-Trzeciakiewicz, Tomasz Parkitny (2015) Radon as a tracer of daily, seasonal and spatial air movements in the Underground Tourist Route “Coal Mine” (SW Poland).

Duenas C., Fernandes M.C., Canete S., (2005): ^{222}Rn concentrations and the radiation exposure levels in the Nerja Cave, Radiation Measurements 40 (2005) 630 – 632.

Duenas C., Fernandez M.C., Canete S., Carretero J., Liger E., (1998): ^{222}Rn concentrations, natural flow rate and the radiation exposure levels in the Nerja Cave, Atmospheric Environment 33 (1999) 501-510.

Duenas C., Fernandez M.C., Canete S., Perez M., Gordo E., (2011): Seasonal variations of radon and the radiation exposure levels in Nerja cave, Spain, Radiation Measurements 46 (2011) 1181e1186.

Duffy J.T., Madden J.J., Mackin G.M, and McGarry A.T., (1996): A reconnaissance survey of radon in show Cave in Ireland, Environment International, Vol. 22, Suppl. 1, pp. S415-S423, 1996.

Dumitru O.A., Onac B.P., Fornos J.J., Cosma C., Gines A., Gines J., Merino.A, (2015): Radon survey in caves from Mallorca Island, Spain, Science of the Total Environment 526 (2015) 196–203.

Eff-Daewich A., Vinas R., Soler V., Nuez J., Quesada M.L., (2008): Natural air ventilation in underground galleries as a tool to increase radon sampling volumes for geologic monitoring, Radiation Measurements 43 (2008) 1429 – 1436.

Espinosa G., Golzarri J.I., Vega-Orihuela E., Morales-Malacara J.B., (2013): Indoor radon concentration levels in Mexican caves, using nuclear track methodology, and the relationship with living habits of the bats, J RadioanalNuclChem (2013) 296:43–48.

Espinosa G., Golzarri J.I., Gammage R.B, Sajo-Bohus L., Viccon Pale J., Signoret-Poillon M., (2008): Seasonal variation measurements of radon levels in caves using SSNTD method, Radiation Measurements 43 (2008) S364–S368.

Fhulufhelo Nemangwele (2005): Radon in the Congo caves.

Fernandez-Cortes A., D. Benavente , S. Cuezva, J.C. Cañaveras, M. Alvarez-Gallego E. Garcia-Anton, V. Soler , S. Sanchez-Moral (2013): Effect of water vapor condensation on the radon content in subsurface air in a hypogeal inactive-volcanic environment in Galdarcave, Spain, *Atmospheric Environment* 75 (2013) 15e23.

Fernandez-Cortes A., Sanchez-Moral S., Cuezva S., Canaveras J.C., Abella R., (2009): Annual and transient signatures of gas exchange and transport in the Castañar de Ibor cave (Spain) – 2009.

Fernandez-Cortes A., Cuezva S., Sanchez-Moral S., Canaveras J.C., Porva E., Jurado V., Martin-Sanchez P.M., Sainz-Jimenez C., (2001): Detection of human-induced environmental disturbances in a show cave, *International Journal of Speleology* 38 (2) 153-162 Bologna (Italy) July 2009.

Fijalkowska-Lichwa L., (2015): Estimation of radon risk exposure in selected underground workplaces in the Sudetes (southern Poland), *Journal of Radiation Research and Applied Sciences* 8 (2015) 334-353.

Fijalkowska-Lichwa L., (2014): Short-term radon activity concentration changes along the Underground Educational Tourist Route in the Old Uranium Mine in Kletno (Sudety Mts., SW Poland), *Journal of Environmental Radioactivity* 135 (2014) 25-35.

Friend C.R.L., Gooding T.D., (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 (2002) 45–57.

Garavaglia M., Braitenberg C., Zadro M., (1998): Radon Monitoring in a Cave of North-Eastern Italy, *Phys. Chem. Earth*, Vol. 23, No. 9-10, pp. 949-952, 1998.

Gillmore, G.K, Sperrin, M., Philips, P., and Denman, A., (2000). “Radon hazard, Geology and exposure of Cave users: A case study and some theoretical perspectives”. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 46, 279}288 (2000).

Gillmore G., Gharib H.A., Denman A., Phillips P., Bridge D., (2011): Radon concentrations in abandoned mines, Cumbria, UK: safety implications for industrial archaeologists.

Gillmore G.K., Phillips P.S., Denman A.R., Gilbertson D.D., (2002): Radon in the Creswell Crags Permian limestone caves, *Journal of Environmental Radioactivity* 62 (2002) 165–179.

Gillmore G., Gilbertson D., Grattan J., Hunt C., McLaren S., Pyatt B., Banda R., Barker G., Denman A., Phillips P., Reynolds T., (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 (2005) 213–227.

Gillmore G.K., Phillips P.S., Pearce G., Denman A., (2001): Two abandoned metalliferous in Devon and Cornwall, UK: Radon Hazards and geology, *International Radon Symposium 2001*.

Grant C.N., K Lalor G.C., Balcazar M., (2012): Radon monitoring in sites of economical importance in Jamaica, *Applied Radiation and Isotopes* 71(2012) 96–101.

Grarran J.P., Gillmore G.K., Gilbertson D.D., Pyatt F.B., Hunt C.O., McLaren S.J., Phillips P.S., Denman A., (2004): Radon and ‘King Solomon's Miners’: Faynan Orefield, Jordanian Desert.

Gregoric A., Zidansek A., Vaupotic J. (2011): Dependence of radon levels in Postojna Cave on outside air temperature, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 1523–1528, 2011.

Gregoric A., Vaupotic J., Gabrovsek F., (2013): Reasons for large fluctuation of radon and CO₂ levels in a dead-end passage of a karst cave (Postojna Cave, Slovenia), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 287–297, 2013.

Hakl J., Csige I., Hunyadi I., (1996): Radon transport in fractured porous media — Experimental study in caves, *Environment International*, Vol. 22, Suppl. 1, pp. S433-S437, 1996.

Hakl J., Hundyady I., Csige I., Geczy G., Lenart L., Varhegyi A., (1997): Radon transport phenomena studied in karst caves - international experiences on radon levels and exposures, *Radiation Measurements*, Vol. 28, Nos I-6, pp. 675-684, 1997.

Hafez A.F., Hussein A.S., (2001): Radon activity concentrations and effective doses in ancient Egyptian tombs of the Valley of the Kings, *Applied Radiation and Isotopes* 55 (2001) 355–362.

Hedt J.C., Boal T.J.: Radon in an underground cave system in Victoria.

Hunyadi I., Csige I., Gexzy G., Hakl J., (1995): Radon doses received in speleotherapy courses in Hungary, *Radiation Measurements*, Vol. 25, No~ 1--4, pp. 655-656, 1995.

Iomoto T., Tokonami S., Morishita Y., Kosako T. (2004) : Application of activated charcoal radon collectors in high humidity environments, *Journal of Environmental Radioactivity* 78 (2005) 69–76.

Jovanovic Peter (1996): Radon measurements in karst caves in Slovenia, *Environment International*, Vol. 22, Suppl. 1, pp. S429-S432, 1996.

Kapanadze N., Bezek M., Vaupotic j., Melikadze G.: Radon and thoron levels in air at selected places in Georgia.

Kavasi N., Somlai J., Vigh T., Tokinami S., Ishikawa T., Sorimchi A., Kovacs T., (2009): Difficulties in the dose estimate of workers originated from radon and radon progeny in a manganese mine, *Radiation Measurements* 44 (2009) 300–305.

Kavasi N., Vigh T., Kovacs T., Vaupotic J., Jobbagy V., Ishikawa T., Yohehata H., (2011): Dose estimation and radon action level problems due to nanosize radon

progeny aerosols in underground manganese ore mine, *Journal of Environmental Radioactivity* 102 (2011) 806-812.

Kávási N. , Somlai J., Szeiler G, Szabó B. , Schafer I. , Kovács T. (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 (2010) 1068-1071.

Klein D., Roudko N., Chambaudet A., Malakhov S., (1993): Nuclear track detectors for radon monitoring in coal mines in the Kuzbass Siberian region (Russian confederation), *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, Vol. 22, Nos 1-4, pp.365-368, 1993.

Koltai G., Orszag J., Tegzes Z., Barany-Kevei I., (2010): Comprehensive Radon Concentration Measurements in Caves Located in the Area of Mecsek Mountains.

Kotsarenko A., Grimalsky V., CillegasCeron R.A., Medina Perez L.I., Koshevaya S., Perez Enriquez R., Yutsis V., Lopez Cruz-Aveyro J.A., Valdes-Gonzales C., (2009): Anomalies of the variation of the radon concentration observed in the volcano Popocatepetl, Mexico during 2007–2008.

Kowalczk A., Froelich P., (2010): Cave air ventilation and CO₂ outgassing by radon-222 modeling: How fast do caves breathe?, *Earth and Planetary Science Letters* 289 (2010) 209–219.

Kumar R., Sengupta D., Prasad R., (2003): Natural radioactivity and radon exhalation studies of rock samples from Surda Copper deposits in Singhbhum shear zone, *Radiation Measurements* 36 (2003) 551 – 553.

Lario J., Sanchez-Moral S., Cuezva S., Taborda M., Soler V., (2006): High ²²²Rn levels in a show cave (Castañ ar de Ibor, Spain): Proposal and application of management measures to minimize the effects on guides and visitors, *Atmospheric Environment* 40 (2006) 7395–7400.

Lario J., Sanchez- Moral S., Canaveras J.C., Cuezva S., Soler V., (2005): Radon continuous monitoring in Altamira Cave (northern Spain) to assess user's annual effective dose.

Li X., Song B., Zheng B., Wang Y., Wang X., (2010): The distribution of radon in tunnels with different geological characteristics in China, *Journal of Environmental Radioactivity* 101 (2010) 345–348.

Loisy C. Cerepi A, (2012): Radon-222 as a tracer of water–air dynamics in the unsaturated zone of a geological carbonate formation: Example of an underground quarry (Oligocene Aquitaine limestone, France), *Chemical Geology* 296-297 (2012) 39–49.

Malcom S. Field (2007): Risks to cavers and cave workers from exposures to low-level ionizing a radiation from 222rn decay in caves.

Martín Sánchez A., de la Torre Pérez J., Ruano Sánchez B., Naranjo Correa F.L. (2011): Radon in workplaces in Extremadura, *Journal of Environmental Radioactivity* 107 (2012) 86-91.

Milanovic P. (1981): *Karst Hydrogeology*. Water Resources Publications, 434p, Littleton, Colorado, USA, 1981.

Mihailovic D.T., Krmar M., Mimic G., Nikolic-Doric E., Smetnova I., Holy K., Zelinka J., Omelka J., (2014): A complexity analysis of 222Rn concentration variation: A case study for Domica cave, Slovakia for the period June 2010–June 2011, *Atmospheric Environment* 33 (1999) 501-510.

Misdaq M.A. Ouguidi J., (2011): Concentrations of radon, thoron and their decay products measured in natural caves and ancient mines by using solid state nuclear track detectors and resulting radiation dose to the members of the public *JRadioanalNuclChem* (2011) 287:135–150.

Nagy H.E., Horvath A., Jordan G., Szabo C., Kiss A., (2012): Study of a cave's air exchange pattern based on radon concentration and the time dependence of radon concentration in Pál-völgy Cave (Budapest, Hungary).

Nagy H.E., Szabo Z., Jordan G., Szabo C., Horvath A., Kiss A., (2012): Time variations of ^{222}Rn concentration and air exchange rates in a Hungarian cave, *Isotopes in Environmental and Health Studies* 2012, 1–9, iFirst.

Nagy H.E., Horvath A., Jordan Gy., Szabo Cs., Kiss A., (2012): Study of a cave's air exchange pattern based on radon concentration and the time dependence of radon concentration in Pál-völgy Cave (Budapest, Hungary), *Geophysical Research Abstracts* Vol. 14, EGU2012-4912, 2012.

Nazaroff, W.W., Barbara A.M., Sextro, R.G., (1988): Soil as a Source of Indoor Radon: Generation, Migration, and Entry, In: *Radon and its decay products in indoor air*. (Nazaroff W.W. and Nero A.V. eds). New York, 1988.

Olszewski J., Chruscielewski W., Jankowski J., (2005): Radon on underground tourist routes in Poland, *International Congress Series* 1276 (2005) 360–361.

Oufni L., Misdaq M.A., (2005): Radon emanation and uranium content in an endokarstic formation using solid state nuclear track detectors, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 250, No. 2 (2001) 309–313.

Oufni L., Misdaq M.A., (2001): Radon Emanation in a Limestone Cave Using CR-39 and LR-115 Solid State Nuclear Track Detectors .

Papachristodoulou C.A,* K. G. Ioannides,* K. C. Stamoulis,* D. L. Patiris,* and S. B. Pavlides (2004): Radon activity levels and effective doses in the Perama cave, Greece. *Health Physics* June 2004, Volume 86, Number 6.

Papastefanou C. (2007): Measuring radon in soil gas and ground waters: a review, *International Congress Series* 1276 (2005) 204–205.

Papastefanou C., Manolopoulou M., Stoulos S., Ioannidou A., Gerasopoulos E., (2005): Elevated radon concentrations in a Pleistocenic cave operating as a show cave.

Perrier F., Richon P., Gautam U., Tiwari D.R., Srestha P., Sapkota S.N., (2007): Seasonal variations of natural ventilation and radon-222 exhalation in a slightly rising dead-end tunnel, *Journal of Environmental Radioactivity* 97 (2007) 220-235.

Perrier F., Richon P., (2010): Spatiotemporal variation of radon and carbon dioxide concentrations in an underground quarry: coupled processes of natural ventilation, barometric pumping and internal mixing, *Journal of Environmental Radioactivity* 101 (2010) 279–296.

Pflitsch, A., and Plasecki, J., (2003). “Detecting of an airflow system in Niedziedzia (Bear) Cave, Kletno, Poland”. *Cave and Karst Studies*. 65:160-173.

Przylibski T.A., (1999): Radon concentration changes in the air of two caves in Poland.

Przylibski T.A., (2001): Radon and its daughter products behavior in the air of an underground tourist route in the former arsenic and gold mine in Złoty Stok (Sudety Mountains, SW Poland). *Journal of Environmental Radioactivity* 57 (2001) 87–103.

Radolić Vanja, Miklavčić Igor, Poje Marina, Stanić Denis, Vuković Branko : Radon Levels in Manita Peć Cave (Croatian NP Paklenica) and Assessment of Effective Dose Received by Visitors and Tourist Guides, Department of Physics, University in Osijek, Croatia.

Rafat M.A., Eiss M.F., (2008): Radon level and radon effective dose rate determination using SSNTDs in Sannur cave, Eastern desert of Egypt, *Environ Monit Assess* (2008) 143:59–65.

Ramachandran T.V., Lalit B.Y., Mishra U.C., (1986): Measurement of radon and thoron present in the environment using nuclear track etch detector technique, Nucl. Tracks Radial. Mm., Vol. II, Nos 415, pp. 245-249, 1986.

Ridley H.E., Baldini J.U.L., Prufer K.M., Walczak I.W., Breitenbach S.F.M., (2015): High-resolution monitoring of Yok Balum cave, Belize: An investigation of seasonal ventilation regimes and the atmospheric and drip-flow response to a local earthquake. Journal of Cave and Karst Studies, v. 77, no. 3, p. 183–199, DOI: 10.4311/2014ES0117.

Rovenska K., Thinova L. (2009): Seasonal variation of radon in the Bozkov cave, Nukleonika 2010; 55(4):483–489.

Rowberry M.D., Marti X., Frontera C., Van De Wiel M.J., Briestensky M., (2016): Calculating flux to predict future cave radon concentrations.

Sainz C., Luis Santiago Quindos, Ismael Fuente, Jorge Nicolas, Luis 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 (2007) 368–371.

Sajo-Bohus L., Greaves E.D., Palfalvi J., Urbani F., Nerlo G., (1997): Radon concentration measurements in Venezuelan caves using SSNTDS.

Schery S.D., Gaedert D.H. and Wilkening, M.H. (1984): Factors affecting exhalation of radon from a gravely sandy loam. J Geophys Res 79:7299, 1984.

Solomon S.B., Langroo R., Peggie J.R., (1996): Occupational exposure to radon in Australian tourist caves in Australia - Wide study of radon levels.

Solomon S.B., Langroo R., (1996): Radon Exposure to tour guides on Australian show caves, Environment International, Vol. 22, Suppl. I, pp. S409-S413, 1996.

Shahin F., Eissa M.F., Mostafa R.M., (2005): Radon measurements using track detector in Wadi Sannur cave, 2005, Physics Department, Faculty of Science, Beni-Suef University, Beni-Suef, Egypt.

Sperrin M., Denman T., Phillips P.S., (2000): Estimating the dose from radon to recreational cave users in the Mendips, UK, *Journal of Environmental Radioactivity* 49 (2000) 235-240.

Stranded, E., Ulbak, K., Ehdwall, H., and Jonassen, N., (1985). “Measurement of radon exhalation from the ground: A usable tool for classification of radon risk of the radon of building group”. *Radiation Protection Dosimetry*. 12(1): 33-38.

Szerbin P., (1996) : Natural radioactivity of certain spas and caves in Hungary, *Environment International*, Vol. 22, Suppl. 1, pp. S389-S398, 1996.

Tchorz-Trzeciakiewicz D.E., Parkitny T., (2015): Radon as a tracer of daily, seasonal and spatial air movements in the Underground Tourist Route “Coal Mine” (SW Poland).

Thinova L., Burian I., (2008): Effective dose assessment for workers in caves in the Czech Republic: Experiments with passive radon detectors. *Radiation Protection Dosimetry* (2008), Vol. 130, No. 1, pp. 48–51.

Tsetkova T., Przlibski T.A., Nevinsky I., Nevinsky V., (2005): Measurement of radon in the East Europe under the ground, *Radiation Measurements* 40 (2005) 98 – 105.

Tufal M., Matiukkah, Ali A., Orfi S.D., Quereshi A.A., Hussain G., Khan H.A., (1988): Radon measurements in coal mines using polymeric nuclear track detectors, *Nud. Tracks Radiat. Meas.*, Vol. 15, Nos. 1-4, pp. 655--658, 1988.

UNSCEAR (1993): (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) Sources and effects of Ionizing Radiation, United Nations ed. New York. E.94.IX.2., 1993.

Valladares D.L., da Silva A.A.R., Lacerda T., Anjos R.M., Rizzotto M., Velasco H., de Rosas J.P., Tognelli G., Yoshumura E.M., Juri Ayub J., (2014): Using ²²²Rn as a tracer of geodynamical processes in underground environments, *Science of the Total Environment* 468–469 (2014) 12–18.

Vaupotic J. (2008): Nanosize radon short-lived decay products in the air of the Postojna Cave, *Science of the total environment* 393 (2008) 27-38.

Vaupotic J. (2010): Radon levels in karst caves in Slovenia, COBISS: 1.01.

Vinas R., Eff-Darwich A., Soler V., Martin Luis M.C., Quesada M.L., Nuez J., (2007): Processing of radon time series in underground environments: Implications for volcanic surveillance in the island of Tenerife, Canary Islands, Spain, Radiation Measurements 42 (2007) 101 – 115.

Tanera B. (1980) Radon migration in the ground; A supplementary review. In Proc of Natural Rad Env. III (Conf-780422), Houston, April 23-28, 1978. pp. 5-56.

Wysocka M., (2001): Radon in Jurassic caves of the Kraków-Czestochowa Upland, Geochemical Journal, Vol. 45, pp. 447 to 453, 2011.

Yong-jun Y., Li-heng W., De-xin D., Ya-li Z., Ban-bin F., (2014): Inverse method for determining radon diffusion coefficient and free radon production rate of fragmented uranium ore, Radiation Measurements 68 (2014) 1-6.

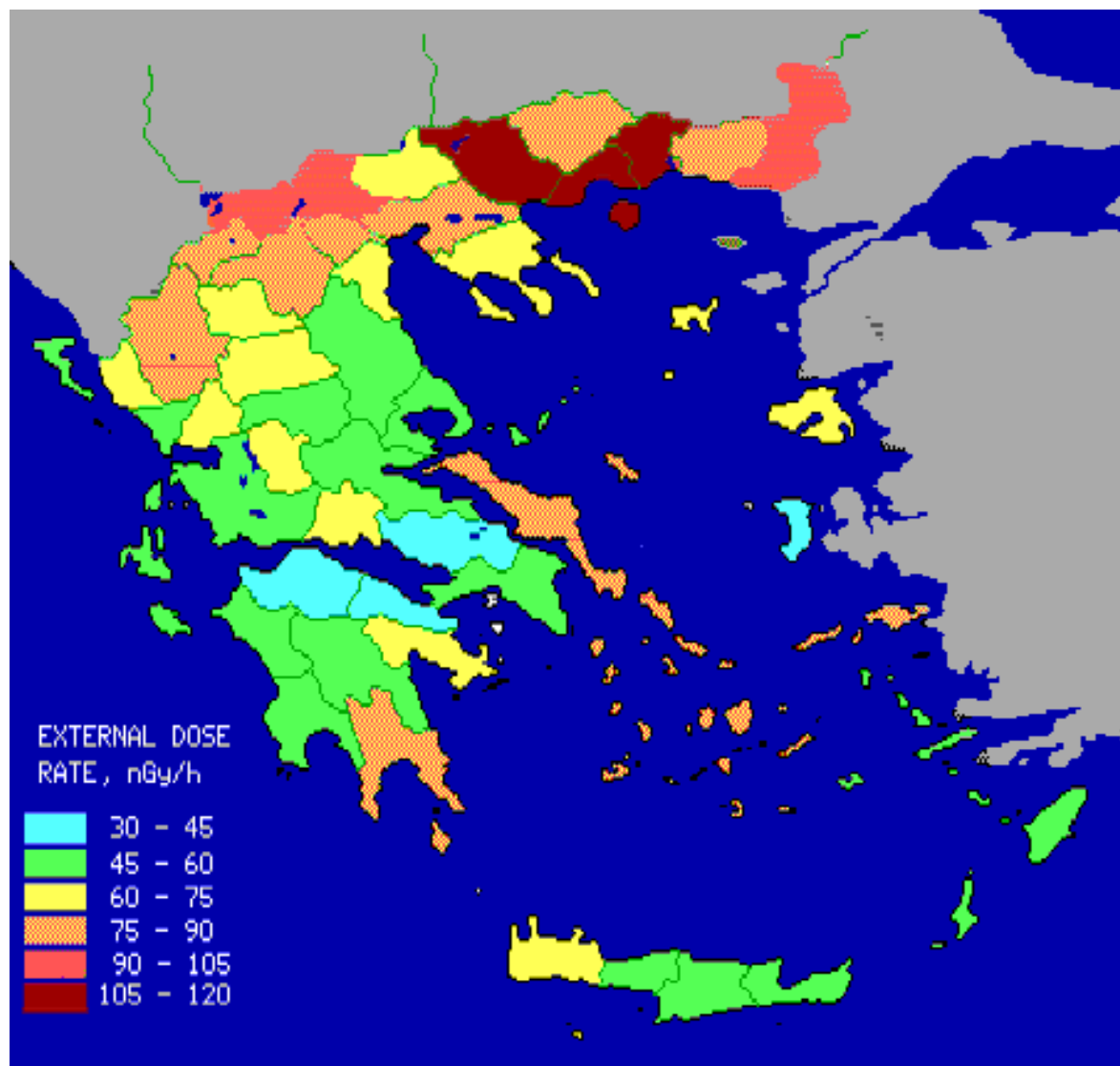
Zafir H., Barbosa S., Malic U., (2013): Differentiation between the effect of temperature and pressure on radon within the subsurface geological media, Radiation Measurements 49 (2013) 39-56.

Ziegler J. T and Biersak J P (1985). The stopping and range of ions in solids. New York: Pergamon Press.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΑ: ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΕΙΣ

Α1. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΦΥΣΙΚΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΛΑΦΩΝ

[Link: 10]



Πίνακας Α: Οι περιοχές με τη μεγαλύτερη συσσώρευση ραδονίου στην Ελλάδα.

[Link: 12]

Χωριό	Νομός	Συσσώρευση ραδονίου σε Bq/m³
Νεράιδα	Θεσπρωτίας	511 Bq/m ³
Μελιβοία	Ξάνθης	460 Bq/m ³
Κέντρο Πόλης	Καβάλας	350 Bq/m ³
Σέλερο	Ξάνθης	320 Bq/m ³
Πρασινάδα	Δράμας	280 Bq/m ³
Μύκονος	Κυκλάδων	280 Bq/m ³
Δεσκάτη	Γρεβενών	279 Bq/m ³
Πεντάλοφο	Κοζάνης	258 Bq/m ³
Νικίσιανη	Καβάλας	237 Bq/m ³
Κέντρο Πόλης	Θεσσαλονίκης	220 Bq/m ³
Δοξάτο	Δράμας	211 Bq/m ³
Γενισέα	Ξάνθη	200 Bq/m ³

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΑΚΤΙΝΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Ραδόνιο στον εσωτερικό αέρα των κατοικιών (Ε.Ε.Α.Ε., 2006)

Οι διάφοροι διεθνείς οργανισμοί καθώς και αρκετά κράτη έχουν προτείνει όρια για τη συγκέντρωση ραδονίου στον εσωτερικό αέρα των κατοικιών.

Πίνακας Β: Όρια συγκέντρωσης στον εσωτερικό αέρα των κατοικιών.

Οργανισμός / Κράτος	Υπάρχουσες κατοικίες(Bq/ m ³)	Νεόδημιτες κατοικίες(Bq/ m ³)
ICRP	400	200
CECt	400	200
WHO	200	200
Σουηδία	800	140
Νορβηγία	800	200
Φιλανδία	800	200
Η.Π.Α	ISO	150

Η Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, λαμβάνοντας υπόψη τις προτάσεις της Διεθνούς Επιτροπής Ακτινοπροστασίας (ICRP). εξέδωσε το 1990 τη σύσταση «Προστασία του πληθυσμού από την έκθεση στο ραδόνιο μέσα στα κτίρια» (90/143/Euratom), η οποία αποσκοπεί στο να καθιερώσουν τα κράτη-μέλη ένα κατάλληλο σύστημα, για τον περιορισμό της έκθεσης λόγω της συγκέντρωσης ραδονίου μέσα στα κτίρια.

Ραδόνιο και χώροι εργασίας (Ε.Ε.Α.Ε., 2006)

Σύμφωνα με τους Ελληνικούς κανονισμούς Ακτινοπροστασίας (ΦΕΚ 2Ι6Β. 5/3/2001), «που είναι πλήρως εναρμονισμένοι με την Οδηγία 96/29/EURATOM 31/5/1996, τα όρια για τη συγκέντρωση ραδονίου (Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας) στους εργασιακούς χώρους είναι:

- Εργασιακοί χώροι, στους οποίους η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου (αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια εργασίας 20ωρών) είναι μικρότερη από

400 Bq/m³. εξαιρούνται περαιτέρω ελέγχου και μέτρων ακτινοπροστασίας.

- Σε εργασιακούς χώρους, στους οποίους η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου (αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια εργασίας 2000 ωρών) είναι μεγαλύτερη από 400 Bq/m³ και μικρότερη από 1000 Bq/m³, θα πρέπει να διερευνηθεί η δυνατότητα μείωσης των ανωτέρω συγκεντρώσεων με κατάλληλες τεχνικές. Οι χώροι αυτοί χαρακτηρίζονται ως επιβλεπόμενες περιοχές, τα δε λαμβανόμενα μέτρα ακτινοπροστασίας εγκρίνονται από την ΕΕΑΕ.

- Εργασιακοί χώροι, στους οποίους η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση ραδονίου (αντιστοιχεί σε χρονική διάρκεια εργασίας 2000 ωρών) είναι μεγαλύτερη από 1000 Bq/m³ και μικρότερη από 3000 Bq/m³, χαρακτηρίζονται ως ελεγχόμενες περιοχές και οι πρακτικές αδειοδοτούνται από τη ΕΕΑΕ, τα δε λαμβανόμενα μέτρα ακτινοπροστασίας εγκρίνονται από την ΕΕΑΕ.

- Η μέση ετήσια ολοκληρωμένη συγκέντρωση του ραδονίου, σε εργασιακούς χώρους, δεν μπορεί να υπερβαίνει τα 3000 Bq/m³ λαμβανομένων υπόψη των 2000 ωρών διάρκειας εργασίας.

Στις εργασιακές δραστηριότητες, όπου ενδέχεται η παρουσία φυσικών πηγών ακτινοβολίας (γήινης ή κοσμικής) να συνεπάγεται σημαντική αύξηση της έκθεσης των εργαζομένων, η οποία δεν μπορεί να αγνοηθεί από την άποψη ακτινοπροστασίας, περιλαμβάνονται:

(α) Εργασιακές δραστηριότητες, όπου οι εργαζόμενοι και ενδεχομένως άτομα του κοινού εκτίθενται σε ακτινοβολία γ, σε θυγατρικά στοιχεία του ραδονίου ή του θορονίου, ή οποιαδήποτε άλλη δίοδο έκθεσης σε ακτινοβολία στους χώρους εργασίας. Οι εργασιακές αυτές δραστηριότητες αφορούν κυρίως σε ιαματικές πηγές, σπήλαια, ορυχεία, υπόγειους χώρους εργασίας ή υπέργειους χώρους εργασίας σε καθορισμένες ζώνες.

(β) Εργασιακές δραστηριότητες στις οποίες γίνεται χρήση ή αποθήκευση υλικών, τα οποία συνήθως δεν θεωρούνται ραδιενεργά, αλλά περιέχουν φυσικά ραδιονουκλίδια και τα οποία προκαλούν ουσιώδη αύξηση της έκθεσης των εργαζομένων και ενδεχομένως του κοινού.

(γ) Εργασιακές δραστηριότητες, οι οποίες συνεπάγονται την παραγωγή καταλοίπων που συνήθως δεν θεωρούνται ραδιενεργά, αλλά περιέχουν φυσικά ραδιονουκλίδια και τα οποία προκαλούν σημαντική αύξηση της έκθεσης των εργαζομένων και ενδεχομένως του κοινού.